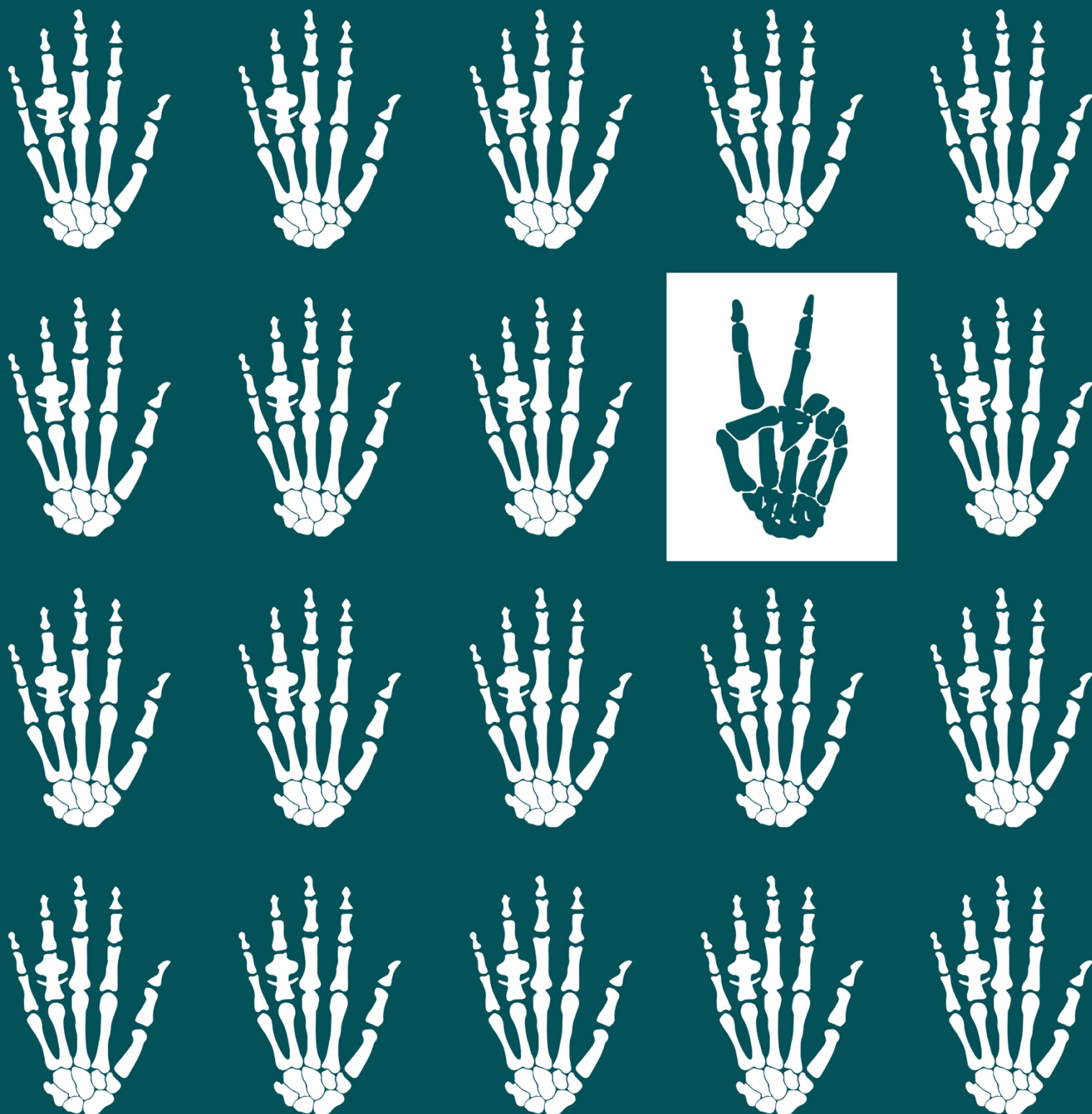


REJR

Russian Electronic Journal of Radiology

Российский Электронный Журнал Лучевой Диагностики

Том 16. No1. 2026 год.



Техническая редакция

Администратор журнала:
Бирюкова Г.К.

Редакторы сайта:
Абнизов А.С.
Вершинин Д.А.
Устюжанин Д.В.

Редакторы текстов:
Евсеева Е.В.
Гридасова И.Д.

Редакторы иностранных
текстов:
Ализада Э.Э.
Муртузова А.Б.
Павлова О.Ю.

Верстка:
Лисавин А.А.

Финансовый отдел:
Кучук О.В.

Дизайн:
Кеслер М.С.
Серова Е.А.

Адрес журнала:
www.rejr.ru
Почта журнала:
rejr@rejr.ru

Техническая поддержка:
admin@rejr.ru

REJR – рецензируемое
научное электронное
периодическое издание по
лучевой диагностике

Периодичность издания –
4 раза в год

Языки: русский и
английский

Журнал зарегистрирован в
Федеральной службе по
надзору за соблюдением
законодательства в сфере
массовых коммуникаций и
охране культурного
наследия

Регистрационный номер:
Эл №ФС77-76879
от 24 сентября 2019 г.

ISSN 2222-7415
Входит в перечень ВАК
и базу цитирования SCOPUS

Главный редактор:

Академик РАН, профессор **Серова Н.С.** (Москва)

Заместители главного редактора:

Академик РАН, профессор **Терновой С.К.** (Москва)
Профессор **Бахтиозин Р.Ф.** (Москва)
Профессор **Кондрашин С.А.** (Москва)

Редакционная коллегия:

Академик РАН, профессор **Адамян Л.В.** (Москва)
Академик РАН, профессор **Алекян Б.Г.** (Москва)
Профессор **Аржанцев А.П.** (Москва)
Академик РАН, профессор **Беляков Н.А.** (Санкт-Петербург)
Академик РАН, профессор **Глыбочко П.В.** (Москва)
Профессор **Гус А.И.** (Москва)
Академик РАН, профессор **Долгушин Б.И.** (Москва)
Профессор **Завадовская В.Д.** (Томск)
Профессор **Зеликман М.И.** (Москва)
Профессор **Игнатьев Ю.Т.** (Омск)
Академик РАН, профессор **Котельников Г.П.** (Самара)
Профессор **Кудряшова Н.Е.** (Москва)
Профессор **Митьков В.В.** (Москва)
Профессор **Рожкова Н.И.** (Москва)
Профессор **Седов В.П.** (Москва)
Профессор **Тимофеева Л.А.** (Чебоксары)
Член-корр. РАН, профессор **Трофимова Т.Н.** (Санкт-Петербург)
Профессор **Труфанов Г.Е.** (Санкт-Петербург)
Профессор **Тухбатуллин М.Г.** (Казань)
Профессор **Тюрин И.Е.** (Москва)
Профессор **Усов В.Ю.** (Новосибирск)
Профессор **Хомутова Е.Ю.** (Омск)
Профессор **Шарифуллин В.А.** (Москва)

Иностранные члены редакционной коллегии:

Professor **Ernesto Valadez** (Mexico)
Professor **Hongjun Li** (China)
Professor **Hedvig Hricak** (USA)
Professor **Adam Andreas** (Great Britain)
Professor **Nicholas Gourtsoyiannis** (Greece)
Professor **Hans Ringertz** (Sweden)
Professor **Marat Khodzhibekov** (Uzbekistan)
Professor **Teruhito Mochizuki** (Japan)
Professor **Raushan Rakhimzhanova** (Kazakhstan)
Professor **Rainer Rienmueller** (Austria)

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ.....	5
ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ	
CRANIAL-ATLANTOAXIAL VERTEBRAE-RELATIONSHIPS: A MORPHOMETRIC STUDY.....	6-19
<i>RANA A. AZIZ ALTAE, TARA FAROOQ KAREEM, SABEEH SAMEER IBRAHIM, SHAMS NAMEER QASIM AL-QADHI, RAFAL RAED KADHEM ALJANABI, YOUNIS A. RASHEED</i>	
МРТ В ДИАГНОСТИКЕ РЕДКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ КАРОТИДНОЙ АНГИОПЛАСТИКИ СО СТЕНТИРОВАНИЕМ.....	20-33
<i>СТЕГУРА Д.С., АННУШКИН В.А., РЯБИНКИНА Ю.В., ПОЛИЩУК Р.В., КОНОВАЛОВ Р.Н., КРОТЕНКОВА М.В., КРЕМНЕВА Е.И.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО И МАНУАЛЬНОГО АНАЛИЗА КТ В ПЛАНИРОВАНИИ ТРАНСКАТЕТЕРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА У ПАЦИЕНТОВ С КРИТИЧЕСКИМ АОРТАЛЬНЫМ СТЕНОЗОМ И СЛОЖНОЙ АНАТОМИЕЙ КОРНЯ АОРТЫ.....	34-41
<i>ГАФСИ Б.Э., ФЕДОТЕНКОВ И.С., ШИРКИН А.В., ИМАЕВ Т.Э.</i>	
THE DIAGNOSTIC VALUE OF AIR IN THE ANTERIOR PERICARDIAL LIGAMENTS IN PENETRATING MINE-EXPLOSIVE WOUNDS OF THE CHEST CAVITY.....	42-51
<i>АКНУЕВ М.И., КИТАЕВ В.М., АБНИЗОВ А.С., БАДУРОВ Б.Ш., КОМОГОРОВА А.А.</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ЭТАПАХ ДИАГНОСТИКИ И МАЛОИНВАЗИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ ВНУТРИПРОТОВОКОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ.....	52-64
<i>МАРУЩАК Е.А., ЗУБАРЕВА Е.А., ФИСЕНКО Е.П., МЕЛЬЧЕНКО Д.С., ПРЕСНЯКОВ Е.В.</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАТКИ И ЭНДОМЕТРИЯ У ФЕРТИЛЬНЫХ РОЖАВШИХ ЖЕНЩИН АКТИВНОГО РЕПРОДУКТИВНОГО ВОЗРАСТА.....	65-79
<i>МИНАШКИНА Е.В., ОЖОГИНА Е.В., ОЗЕРСКАЯ И.А.</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ РАННЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ РАКА ЭНДОМЕТРИЯ: КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭХОГРАФИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ В СОЧЕТАНИИ С ТИПОМ МАТОЧНОГО КРОВОТЕЧЕНИЯ И ГИНЕКОЛОГИЧЕСКИМ СТАТУСОМ.....	80-92
<i>ГАЖОНОВА В.Е., АКОПЯН Е.Г., АНТОНОВА И.Б., ЦАЛЛАГОВА З.С.</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЦЕНКА МАКРОКАЛЬЦИФИКАЦИИ УЗЛОВ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ.....	93-103
<i>ТИМОФЕЕВА Л.А., АЛЕКСАНДРОВ Ю.К., ЮМАНОВ А.О., АЛЕКСЕЕВ С.С.</i>	
APPLICATION OF SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY FOR DIFFERENTIATING PARATHYROID AD-ENOMAS AND COLLOID THYROID NODULES.....	104-114
<i>КНАМЗИНА Ф.Т., ВАГАПОВА Г.Р., ДРУЗНОВА Н.Б.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНУСНО-ЛУЧЕВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ВЫЯВЛЕНИИ СНИЖЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ КОСТИ У ПАЦИЕНТОВ С ЛИМФОМОЙ ХОДЖКИНА.....	115-125
<i>БЛИНОВ В.С., КИТАЕВА Ю.С., ПРАСКУРНИЧИЙ Е.А., ЧИБISOVA М.А.</i>	
ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕЦИДИВНОГО КАМНЕОБРАЗОВАНИЯ ПОСЛЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛИТОТРИПСИИ.....	126-137
<i>МИХАЙЛИН С.Д., КАПАНАДЗЕ Л.Б., РУДЕНКО В.И., КРУПИНОВ Г.Е., СЕРОВА Н.С.</i>	

CONTENTS

FROM THE EDITOR.....	5
ORIGINAL ARTICLES	
CRANIAL-ATLANTOAXIAL VERTEBRAE-RELATIONSHIPS: A MORPHOMETRIC STUDY.....	6-19
<i>RANA A. AZIZ ALTAE, TARA FAROOQ KAREEM, SABEEH SAMEER IBRAHIM, SHAMS NAMEER QASIM AL-QADHI, RAFAL RAED KADHEM ALJANABI, YOUNIS A. RASHEED</i>	
MRI IN THE DIAGNOSIS OF RARE COMPLICATIONS OF CAROTID ANGIOPLASTY WITH STENTING.....	20-33
<i>STEGURA D.S., ANNUSHKIN V.A., RYABINKINA YU. V., POLISCHUK R.V., KONOVALOV R.N., KROTENKOVA M. V., KREMNEVA E.I.</i>	
COMPARATIVE EFFECTIVENESS OF SEMIAUTOMATED AND MANUAL CT ANALYSIS IN PLANNING OF TRANSCATHETER AORTIC VALVE IMPLANTATION IN PATIENTS WITH CRITICAL AORTIC STENOSIS AND COMPLEX AORTIC ROOT ANATOMY.....	34-41
<i>GAFSI B.E., FEDOTENKOV I.S., SHIRKIN A. V., IMAEV T.E.</i>	
THE DIAGNOSTIC VALUE OF AIR IN THE ANTERIOR PERICARDIAL LIGAMENTS IN PENETRATING MINE-EXPLOSIVE WOUNDS OF THE CHEST CAVITY.....	42-51
<i>AKHIEV M.I., KITAYEV V.M., ABNIZOV A.S., BADUROV B.SH., KOMOGOROVA A.A.</i>	
ULTRASONIC EXAMINATION AT THE STAGES OF DIAGNOSIS AND MINIMALLY INVASIVE TREATMENT OF INTRADUCTAL BREAST LESIONS.....	52-64
<i>MARUSHCHAK E.A., ZUBAREVA E.A., FISENKO E.P., MELCHENKO D.S., PRESNYAKOV E.V.</i>	
ULTRASOUND PARAMETERS OF THE UTERUS AND ENDOMETRIUM IN FERTILE PAROUS WOMEN OF ACTIVE REPRODUCTIVE AGE.....	65-79
<i>MINASHKINA E. V., OZHOGINA E. V., OZERSKAYA I.A.</i>	
OPTIMIZATION OF EARLY ULTRASOUND DIAGNOSIS OF ENDOMETRIAL CANCER: A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF SONOGRAPHIC FEATURES IN COMBINATION WITH UTERINE BLEEDING TYPE AND GYNECOLOGICAL STATUS	80-92
<i>GAZHONOVA V.E., AKOPYAN E.G., ANTONOVA I.B., TSALLAGOVA Z.S.</i>	
ULTRASOUND ASSESSMENT OF THYROID NODULES MACROCALCIFICATION.....	93-103
<i>TI MOFEEVA L.A., ALEXANDROV YU.K., YUMANOV A.O., ALEKSEEV S.S.</i>	
APPLICATION OF SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY FOR DIFFERENTIATING PARATHYROID AD-ENOMAS AND COLLOID THYROID NODULES.....	104-114
<i>KHAMZINA F.T., VAGAPOVA G.R., DRUZHKOVA N.B.</i>	
A STUDY OF CONE-BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY IN DETECTING DECREASED BONE MINERAL DENSITY IN PATIENTS WITH HODGKIN'S LYMPHOMA.....	115-125
<i>BLINOV V.S., KITAEVA Y.S., PRASKURNICHYI E.A., CHIBISOVA M.A.</i>	
POSSIBILITIES OF MULTISPIRAL COMPUTED TOMOGRAPHY IN PREDICTING RECURRENT LITHOGENESIS AFTER THE EXTRACTION LITHOTRIPSY.....	126-137
<i>MIKHAYLIN S.D., KAPANADZE L.B., RUDENKO V.I., KRUPINOV G.E., SEROVA N.S.</i>	
PREDICTIVE VALUE OF RADIOLOGIST EXPERIENCE IN INTERPRETING MULTIPARAMETRIC PROSTATE MRI DATA ACCORDING TO PI-RADS 2.1: A RETROSPECTIVE SINGLE-CENTER STUDY.....	138-149
<i>RZAEV R.T., HE MINGZE, FELDSSHEROV M.V., TYCHINSKII A.S., TYAN A.S., SHCHEGELSKII V.V., ZAKHAROV R.S., FEDOSEEVA V.K.</i>	

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ОПЫТА РЕНТГЕНОЛОГА В ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МРТ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ВЕРСИИ PI-RADS 2.1: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ОДНОЦЕНТРОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	138-149
<i>РЗАЕВ Р.Т., ХЕ МИНТЭЕ, ФЕЛЬДШЕРОВ М.В., ТЫЧИНСКИЙ А.С., ТЯН А.С., ШЕГЕЛЬСКИЙ В.В., ЗАХАРОВ Р.С., ФЕДОСЕЕВА В.К</i>	
ПАЛЛИАТИВНАЯ СЕЛЕКТИВНАЯ ЭМБОЛИЗАЦИЯ ПОЧЕЧНЫХ АРТЕРИЙ ПРИ НЕРЕЗЕКТАБЕЛЬНЫХ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ОПУХОЛЯХ ПОЧКИМОЗГА.....	150-157
<i>КОНДРАШИН С.А., КОБЛИКОВ В.В., СОРОКИН Н.И.</i>	
LOW-DOSE CT MEDICAL IMAGE DENOISING: NLM AND SIMPLE CNN PERFORMANCE COMPARISON.....	158-164
<i>ISMAIL, SUSILO WIDODO, BRAZOVSKIY K.S.</i>	
НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ	
МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ЭЛАСТОГРАФИЯ В ИЗУЧЕНИИ ИНТРАКРАНИАЛЬНЫХ ОПУХОЛЕЙ.....	165-179
<i>ЧЕХОНИН И.В., КУПРИЯНОВ Д.А., ФАДЕЕВА Л.М., ЛАСУНИН Н.В., ПРОНИН И.Н.</i>	
СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В МЕДИЦИНЕ.....	180-190
<i>ХОМУТОВА Е.Ю., ГРИГОРОВИЧ Э.Ш., ПАХНЕВИЧ А.В., ЕВТЮХИНА Н.С.</i>	
КИСТОЗНЫЕ ОПУХОЛИ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ: ЛУЧЕВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА.....	191-209
<i>СТЕПАНОВА Ю.А., ПАКЛИНА О.В., РЕВИШВИЛИ А.Ш.</i>	
КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ МРТ В ДИАГНОСТИКЕ ДИФфуЗНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПЕЧЕНИ.....	210-222
<i>РАДЖАБОВ М.Э., БАХТИОЗИН Р.Ф.</i>	
СЛУЧАИ ИЗ ПРАКТИКИ	
КЛИНИКО-ЛУЧЕВОЙ МОНИТОРИНГ ФАЦИО-АУРИКУЛО- ВЕРТЕБРАЛЬНОГО СПЕКТРА АНОМАЛИЙ (СИНДРОМ ГОЛЬДЕНХАРА).....	223-236
<i>ХОМУТОВА Е.Ю., САВЧЕНКО Р.К., ХУДОРОЖКОВ Ю.Г., ХОМУТОВ А.Д.</i>	
SYNOVIAL LIPOMATOSIS IN A 36-YEAR-OLD FEMALE WITH CHRONIC LEFT KNEE PAIN AND MECHANICAL SYMPTOMS.....	237-242
<i>SAYF ALDEEN KASSAB BASHI, MOAMER ABDULGHAFOOR IBRAHIM, AHMED SALIH ALSHEW-ERED</i>	
АВТОРАМ	243-245
PALLIATIVE SELECTIVE EMBOLIZATION OF THE RENAL ARTERIES IN MALIGNANT UNRESECTABLE RENAL TUMORS.....	150-157
<i>KONDRASHIN S.A., KOBLIKOV V.V., SOROKIN N.I.</i>	
LOW-DOSE CT MEDICAL IMAGE DENOISING: NLM AND SIMPLE CNN PERFORMANCE COMPARISON.....	158-164
<i>ISMAIL, SUSILO WIDODO, BRAZOVSKIY K.S.</i>	
REVIEWS	
MAGNETIC RESONANCE ELASTOGRAPHY OF INTRACRANIAL TUMORS.....	165-179
<i>CHEKHONIN I.V., KUPRIYANOV D.A., FADEEVA L.M., LASUNIN N.V., PRONIN I.N.</i>	
MODERN ASPECTS OF THE MICROCOMPUTER TOMOGRAPHY APPLICATION IN MEDICINE.....	180-190
<i>KHOMUTOVA E.YU., GRIGOROVICH E.SH., PAKHNEVICH A.V., EVTYUKHINA N.S..</i>	
PANCREATIC CYSTIC NEOPLASMS: RADIOLOGY DIFFERENTIAL DIAGNOSIS.....	191-209
<i>STEPANOVA YU.A., PAKLINA O.V., REVISHVILI A.SH.</i>	
QUANTITATIVE MRI METHODS IN THE DIAGNOSIS OF DIFFUSE LIVER DISEASES.....	210-222
<i>RADZHABOV M.E., BAKHTIOZIN R.F.</i>	
CASE REPORTS	
CLINICAL AND RADIOLOGICAL MONITORING OF FACIO-AURICULO-VERTEBRAL SPECTRUM OF ANOMALIES (GOLDENHAR SYNDROME).....	223-236
<i>KHOMUTOVA E.YU., SAVCHENKO R.K., KHUDOROZHKOY YU.G., KHOMUTOV A.D.</i>	
SYNOVIAL LIPOMATOSIS IN A 36-YEAR-OLD FEMALE WITH CHRONIC LEFT KNEE PAIN AND MECHANICAL SYMPTOMS.....	237-242
<i>SAYF ALDEEN KASSAB BASHI, MOAMER ABDULGHAFOOR IBRAHIM, AHMED SALIH ALSHEW-ERED</i>	
FOR AUTHORS	243-245

От редакции



О.И. Серова

CRANIAL-ATLANTOAXIAL VERTEBRAE-RELATIONSHIPS: A MORPHOMETRIC STUDY

Rana A. Aziz Altae¹, Tara Farooq Kareem², Sabeeh Sameer Ibrahim³, Shams Nameer Qasim Al-Qadhi³, Rafal Raed Kadhemi Aljanabi³, Younis A. Rasheed⁴

1 – Department of Anatomy, Baghdad University, College of Medicine. Baghdad, Iraq.

2 – Department of Surgery, Baghdad University, College of Medicine. Baghdad, Iraq.

3 – Baghdad University, College of Medicine. Baghdad, Iraq.

4 – Department of Surgery/Orthopedic, Al-Iraqia University, College of Medicine. Baghdad, Iraq.

The skull or the neurocranium is the bony part protecting the brain, while the atlanto-axial complex is the one responsible for protecting the spinal cord during its journey from the brain to the spinal canal. Understanding these relationships is essential for surgical planning, biomechanical analyses, and diagnosing abnormalities in the craniovertebral junction. The findings of this study contribute to a more comprehensive understanding of the anatomical variations and correlations within this complex region. This study investigated the morphometric relationship between the skull's biparietal diameter and the atlanto-axial complex morphometry—a crucial region for head movement and spinal cord protection.

Materials and methods. Seventy-five patients who underwent brain CT scans were included. Various measurements were obtained, including the biparietal diameter (BPD), anterior-posterior (AP) diameter, and inner cross-sectional area (CSA) of the skull. Measurements of the atlas vertebra, specifically the atlas transverse diameter, atlas AP inner diameter (with and without dens), and atlas inner area space were also taken from the CT scans. CT scans were performed using a Siemens 64 slice multidetector scanner, and 3D multiplanar reconstruction was employed to facilitate accurate measurements.

Results. There was a strong positive correlation between the biparietal skull diameter (BPD) and the inner skull surface area in males, females, ages more than and less than 40, also there was strong positive correlation between the skull inner surface area and the atlas inner surface area, however there was only strong positive correlation between the skull BPD and the atlas inner transverse diameter in those older than 40 years. Otherwise there was weak correlation between the skull BPD and other atlanto-axial measurements.

Discussion. The atlas-axis complex is highly differentiated in mammals, reflecting adaptations for head movement and stability. The atlas and axis vertebrae are unique among the cervical vertebrae, as they are highly specialized for head movement and stability. The atlas lacks a vertebral body and spinous process, while the axis has a prominent dens that articulates with the atlas. This unique morphology allows for a wide range of head movements, including flexion, extension, and rotation.[10]

Understanding the relationship between skull dimensions and atlas morphology may have significant implications for the diagnosis and management of conditions affecting the craniovertebral junction. [11] For instance, certain genetic syndromes or developmental disorders known to affect skull growth may also impact the development of the atlas, predisposing individuals to craniovertebral instability or neurological compression. By elucidating the correlations between BPD and atlas morphometry, clinicians may be better equipped to identify individuals at risk for these complications and implement preventive or therapeutic interventions. Additionally, a comprehensive understanding of these relationships can inform the design of more effective surgical strategies for managing craniovertebral junction abnormalities [6, 12].

Conclusion. There was a strong positive correlation between the biparietal skull diameter (BPD) and the inner skull surface area in males, females, ages more than and less than 40, also there was strong positive correlation between the skull inner surface area and the atlas inner surface area, however there was only strong positive correlation between the skull BPD and the atlas inner transverse diameter in those older than 40 years.

Keywords: biparietal diameter; atlanto-axial complex; morphometry; neurosurgical; CT scan.

Corresponding author: Rana A. Aziz Altae, e-mail: za4389452@gmail.com

For citation: Rana A. Aziz Altae, Tara Farooq Kareem, Sabeeh Sameer Ibrahim, Shams Nameer Qasim Al-Qadhi, Rafal Raed Kadhem Aljanabi, Younis A. Cranial-atlantoaxial vertebrae-relationships: a morphometric study. REJR 2026; 16(1):6-19. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-6-19.

Received: 11.03.26

Accepted: 14.04.26

КРАНИО-АТЛАНТОАКСИАЛЬНЫЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ПОЗВОНКОВ: МОРФОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Рана А. Азиз Альтае¹, Тара Фарук Карим², Сабих Самир Ибрагим³,
Шамс Намир Касим Аль-Кадхи³, Рафаль Раед Кадхем Аль-Джанаби³,
Юнис А. Рашид⁴

1 – Кафедра анатомии, Багдадский университет, Колледж медицины. г.Багдад, Ирак.

2 – Кафедра хирургии, Багдадский университет, Колледж медицины. г. Багдад, Ирак.

3 – Багдадский университет, Колледж медицины. г. Багдад, Ирак.

4 – Кафедра хирургии/ортопедии, Университет Аль-Иракия, Колледж медицины. г. Багдад, Ирак.

Череп (нейрокраниум) представляет собой костную структуру, защищающую головной мозг, тогда как атлanto-аксиальный комплекс отвечает за защиту спинного мозга во время его прохождения от головного мозга к позвоночному каналу. Понимание этих взаимоотношений необходимо для планирования хирургических вмешательств, биомеханического анализа и диагностики аномалий краниовертебрального перехода. Результаты данного исследования вносят вклад в более полное понимание анатомических вариаций и корреляций в этой сложной области. В исследовании изучалась морфометрическая взаимосвязь между бипариетальным диаметром черепа и морфометрией атлanto-аксиального комплекса – ключевой области, отвечающей за движения головы и защиту спинного мозга.

Материалы и методы. В исследование были включены 75 пациентов, которым была выполнена компьютерная томография (КТ) головного мозга. Проводились различные измерения, включая бипариетальный диаметр (БПД), передне-задний диаметр и внутреннюю площадь поперечного сечения черепа. Также по данным КТ выполнялись измерения атланта: поперечный диаметр атланта, внутренний передне-задний диаметр атланта (с зубовидным отростком и без него) и внутренняя площадь пространства атланта. КТ выполнялась с использованием 64-срезового мультidetекторного сканера Siemens, для обеспечения точности измерений применялась 3D-мультипланарная реконструкция.

Результаты. Выявлена сильная положительная корреляция между бипариетальным диаметром черепа (БПД) и внутренней площадью поверхности черепа у мужчин, женщин, лиц старше и моложе 40 лет. Также отмечена сильная положительная корреляция между внутренней площадью поверхности черепа и внутренней площадью поверхности атланта. Однако сильная положительная корреляция между бипариетальным диаметром черепа и внутренним поперечным диаметром атланта наблюдалась только у лиц старше 40 лет. В остальных случаях корреляция между бипариетальным диаметром черепа и другими измерениями атлanto-аксиального комплекса была слабой.

Обсуждение. Атлanto-аксиальный комплекс высокодифференцирован у млекопитающих, что отражает адаптацию к движениям головы и обеспечению стабильности. Позвонки атланта и аксиса уникальны среди шейных позвонков, благодаря высокой специализации, обеспечивающей движения головы и стабильность. Атлант не имеет тела позвонка и остистого отростка, тогда как аксис обладает выступающим зубовидным отростком, сочленяющимся с атлантом. Та-

кая уникальная морфология обеспечивает широкий диапазон движений головы, включая сгибание, разгибание и вращение [10].

Понимание взаимосвязи между размерами черепа и морфологией атланта может иметь важное значение для диагностики и лечения заболеваний, затрагивающих краниовертебральный переход [11]. Например, некоторые генетические синдромы или нарушения развития, влияющие на рост черепа, могут также воздействовать на развитие атланта, предрасполагая индивидов к нестабильности краниовертебрального перехода или неврологической компрессии. Выяснение корреляций между бипариетальным диаметром и морфометрией атланта может помочь клиницистам лучше выявлять лиц с риском развития этих осложнений и проводить профилактические или терапевтические вмешательства. Кроме того, всестороннее понимание этих взаимосвязей может способствовать разработке более эффективных хирургических стратегий для лечения аномалий краниовертебрального перехода [6, 12].

Заключение. Выявлена сильная положительная корреляция между бипариетальным диаметром черепа (БПД) и внутренней площадью поверхности черепа у мужчин, женщин, лиц старше и моложе 40 лет. Также отмечена сильная положительная корреляция между внутренней площадью поверхности черепа и внутренней площадью поверхности атланта. Однако сильная положительная корреляция между бипариетальным диаметром черепа и внутренним поперечным диаметром атланта наблюдалась только у лиц старше 40 лет.

Ключевые слова: бипариетальный диаметр, атлanto-аксиальный комплекс, морфометрия, нейрохирургия, компьютерная томография.

Контактный автор: Рана А. Азиз Альтае, e-mail: za4389452@gmail.com

Для цитирования: Рана А. Азиз Альтае, Тара Фарук Карим, Сабих Самир Ибрагим, Шамс Намир Касим Аль-Кади, Рафаль Раед Кадхем Аль-Джанаби, Юнис А. Рашид. Кранио-атлantoаксиальные взаимоотношения позвонков: морфометрическое исследование. REJR 2026; 16(1):6-19. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-6-19.

Статья получена: 11.03.26

Статья принята: 14.04.26

I ntroduction. The craniovertebral junction (CVJ) is a complex anatomical region that includes the occiput, atlas (C1), and axis (C2), playing a crucial role in head support, movement, and protecting the spinal cord as it transitions from the brainstem [1]. The cranium or the skull, is an important bony structure its main function is to protect the precious brain giving rise to the name 'neurocranium', it consists of eight bones; occipital, two temporal, two parietal, sphenoid, ethmoid and frontal [2].

The biparietal diameter (BPD) serves as a standard biometric parameter widely used in fetal ultrasound to estimate gestational age and assess fetal growth, providing essential information about the development and well-being of the fetus, this draw our attention to the importance of this measurement pushing us towards comparing it to many other parameters in the unique atlas in addition to the skull other morphometric parameters, the BPD is the widest parameter of the skull [2].

The atlas (C1) vertebra, distinguished by its lack of a vertebral body and spinous pro-

cess, represents a unique adaptation within the vertebral column, primarily designed to articulate with the skull and facilitate head movement [3]. The same rule is applied for the vertebral column whose responsibility is to protect the delicate spinal cord [4].

Atlanto-axial part consists of two modified cervical vertebrae drawing the attention to a sort of transitional bony zone between the cranium above and the typical cervical vertebrae below the atlantoaxial joint is a type of synovial joint that represent a uniaxial pivot joint [5].

Those two vertebrae are sharing the cranium in protecting the important neural tissue in one hand and sharing the other cervical vertebrae in allowing movement of the head in many directions over the relatively more stable, less movable thoracic vertebrae [6]. However; the two unique vertebrae with their special shape allows more special movements although they do not have the spinous processes which acts as a lever of the attached 'inter-ligaments' and paraspinal muscles increasing their force of movement and concomitant protection; these

two vertebrae they have more free movement allowing better movement in the neck area. The atlas vertebra with its plane ring shape giving the feeling of being a transitional zone between the spherical skull and the remaining cervical vertebrae [7]. This vertebra with the Dennis of the axis are special area drawing the focus of the neurosurgeons and orthopedic surgeons giving rise to many special procedures related to this important area. It is important to have any information related to the morphometric parameters wether anatomical or radiological that can help these two teams of surgeons to decide their plans when attempting surgical intervention at this alarming specific area [8].

With the presence of the more sophisticated CT scan devices with its clear images that describe the radio anatomical reality of the bones, this advanced technology allows us to measure precisely the diameters with estimation of the surface area of the rounded inner skull, and the rounded spinal canal [9].

Aim of the study is to find the biometric correlation between the cranium and the atlanto-axial complex.

Materials and methods.

This study was conducted in the Oncology Teaching Hospital in Medical City Complex in Baghdad from 1st of october 2024 till 15th of february 2025.

It is a retrospective cross- sectional study in which includes the data for patients who un-

derwent a check CT scan for their skull and cervical region for any reason, the data then processed taking care while selecting the data.

Exclusion criteria

1. Any abnormal skull shape especially with congenital anomalies.
2. Congenital vertebral anomalies involving the atlas (such as bifid vertebra).
3. Images with motion artifact
4. Cases of head trauma

A total of 73 patient's CT included in this study in whom brain CT scan were performed for various indications and the skull was apparently normal in shape.

The study sample consisted of 42 male and 31 female, with their age ranges from 2 years to 76 years (mean 27.59 ± 18.093).

CT was performed on Siemens 64 slice multidetector scanner somatom definition (AS 64, Siemens). A tube voltage of 120 kVp, tube current of 250 - 300 mA, collimation of 0.652 mm, slice thickness of 5 mm and Pitch of 1 mm were used in all patients.

Variable measurement taken for each case after reconstruction of 1.5-2 mm was done followed by 3D Multiplanar reconstruction (3D MPR) and correlation between multiple variables was done.

For the skull, the biparietal diameter (BPD), the anterior-posterior (AP) diameter and the inner cross-sectional area (CSA) were taken for each patient after adjustment of the axial

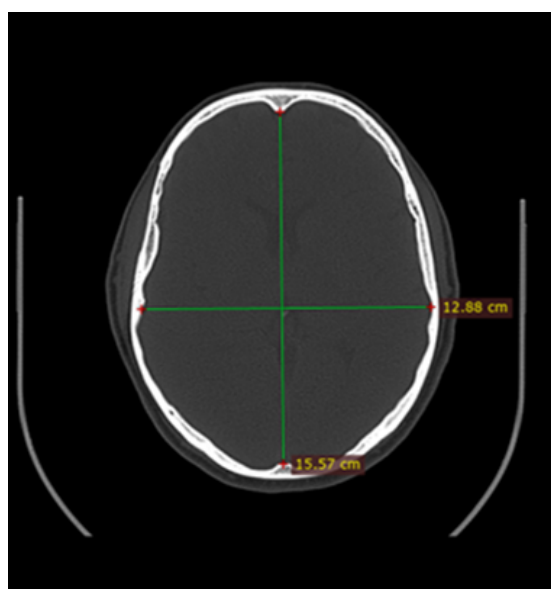


Fig. 1 a (Рис. 1 а)

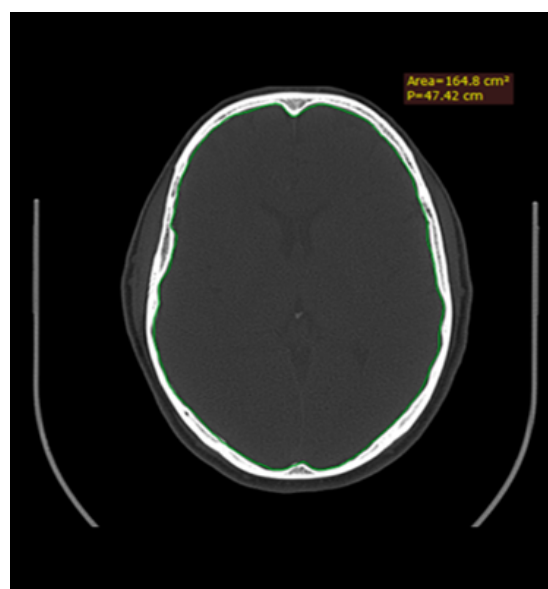


Fig. 1 b (Рис. 1 б)

Fig. 1. CT scan of the skull, axial plane, bone window.

a – Measuring the BPD and the AP diameter. b – measuring the cross-sectional area (CSA).

Рис. 1. КТ черепа, аксиальная плоскость, костное окно.

а – Измерение бипариетального диаметра (БПД) и передне-заднего диаметра. б – Измерение площади поперечного сечения (CSA).

images parallel to the corpus callosum for all the patients using the 3D MPR to overcome any abnormal tilting in patients head position. All the measurements were taken at axial view at the level of the thalami. The maximal BPD were taken between the inner surfaces of the skull, the AP diameter was taken along the midsagittal plane passes through the third ventricle and the inner CSA was traced along the inner cortical skull surface using a manual cursor and recorded automatically (fig. 1).

Other variable measurements were taken at the level of the atlas arch in axial view after adjustment of the axial slices parallel to the arch, and include: maximal inner transverse diameter (ITD), maximal inner anteroposterior (IAP) diameter, the spinal canal diameter (SCD), and the cross-sectional area (CSA) of the atlas (fig. 2).

whole inner D. cm, atlas inner area space, AP diameter, inner surface area of the skull).

Results.

The study includes 42 males (57.5%) and 31 females (42.5%). The mean age of the study population was 27.59 ± 18.09 years. The mean skull biparietal diameter was 12.81 ± 0.62 cm, while the mean atlas inner transverse and anteroposterior diameters were 2.81 ± 0.27 cm and 3.02 ± 0.28 cm, respectively. The mean atlas sagittal canal diameter measured 1.81 ± 0.28 cm, with an average atlas inner cross-sectional area of 6.35 ± 0.93 cm². The mean skull anteroposterior diameter and inner cross-sectional area were 15.15 ± 1.41 cm and 159.81 ± 13.14 cm², respectively (table №1).

Correlation analysis demonstrated weak positive, statistically non-significant correlations between skull BPD and most atlas di-

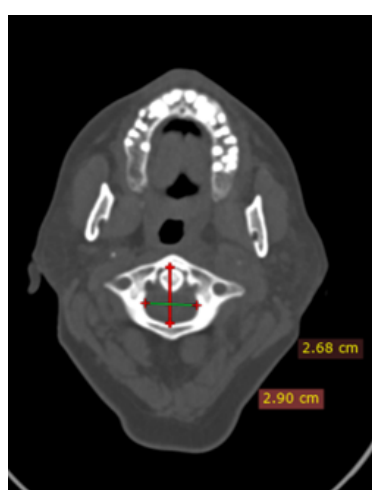


Fig. 2 a (Рис. 2 а)



Fig. 2 b (Рис. 2 б)



Fig. 2 b (Рис. 2 б)

Fig. 2. CT scan of the skull, axial plane, bone window.

a – Measuring the BPD and the AP diameter. b – measuring the cross-sectional area (CSA).

Рис. 2. КТ черепа, аксиальная плоскость, костное окно.

а – Измерение бипариетального диаметра (БПД) и передне-заднего диаметра. б – Измерение площади поперечного сечения (CSA).

The SCD was measured in axial view from the posterior edge of the odontoid process to the inner surface of the posterior portion of the atlas arch and the IAP diameter was measured from the inner surface of the anterior part of the arch to the inner surface of the posterior part. The CSA was traced along the inner cortical surface of the atlas using a manual cursor and recorded automatically.

Statistical tools.

By using SPSS (version 26) show the statistical analysis below: The Pearson correlation shows the relationship between BPD cm & (atlas transverse D cm, Atlas AP inner diameter cm, atlas AP inner diameter without dense

mensions. In contrast, skull BPD showed a strong and statistically significant positive correlation with skull inner cross-sectional area ($r = 0.739$, $p = 0.0001$; table №2, fig. 3).

Among male patients, the mean age was 23.24 ± 16.04 years. The mean skull biparietal diameter measured 12.96 ± 0.63 cm. The mean atlas inner transverse diameter and inner anteroposterior diameter were 2.86 ± 0.24 cm and 3.09 ± 0.30 cm, respectively. The atlas sagittal canal diameter averaged 1.84 ± 0.32 cm, with a mean atlas inner cross-sectional area of 6.57 ± 0.97 cm². The mean skull anteroposterior diameter and skull inner cross-sectional area were 15.03 ± 0.61 cm and 153.17 ± 8.02 cm²,

Table №1. Means of the patients age, BPD (biparental skull diameter), Atlas transverse diameter, Atlas AP (anteroposterior diameter) with the dense, Atlas AP inner diameter without dense, and with, AP diameter of the skull, Atlas inner area space and skull inner surface area.

No.	Factors	Mean $\pm$ SD
1	Age	27.59 $\pm$ 18.093
2	Skull BPD (cm)	12.809 $\pm$ 0.616
3	Atlas ITD (cm)	2.81 $\pm$ 0.273
4	Atlas IAP diameter (cm)	3.024 $\pm$ 0.275
5	Atlas SCD (cm)	1.8111 $\pm$ 0.276
6	Atlas inner CSA (cm ²)	6.348 $\pm$ 0.927
7	Skull AP diameter (cm)	15.145 $\pm$ 1.412
8	Skull inner CSA (cm ²)	159.81 $\pm$ 13.144

Table №2 Correlation between BPD with (atlas ITD, Atlas IAP, atlas SCD, atlas inner CSA, skull AP diameter, skull inner CSA).

No.	Factors	R (Pearson)	P value	Interpretation
1	Atlas ITD	0.074	0.535	Weak positive correlation
2	Atlas IAP diameter	0.223	0.058	Weak positive correlation
3	Atlas SCD	0.136	0.253	Weak positive correlation
4	Atlas inner CSA	0.086	0.469	Weak positive correlation
5	Skull AP diameter	0.197	0.116	Weak positive correlation
6	Skull inner CSA	0.739	0.0001	Strong positive correlation

respectively (table №3).

Correlation analysis in male patients demonstrated weak and statistically non-significant correlations between skull BPD and most atlas dimensions. However, a statistically significant moderate to strong positive correlation was observed between skull BPD and skull inner cross-sectional area ($r = 0.523$, $p = 0.004$; Table №4, fig. 4).

In female patients, the mean age was 33.48 ± 19.27 years. The mean skull biparietal diameter was 12.60 ± 0.54 cm. The atlas inner transverse diameter and inner anteroposterior diameter averaged 2.75 ± 0.31 cm and 2.94 ± 0.22 cm, respectively. The mean atlas sagittal canal diameter was 1.77 ± 0.21 cm, with an atlas inner cross-sectional area of 6.04 ± 0.79 cm². The mean skull anteroposterior diameter and skull inner cross-sectional area were 15.23 ± 1.82 cm and 164.84 ± 14.10 cm², respectively (Table №5).

Correlation analysis demonstrated weak and statistically non-significant correlations

between skull BPD and most atlas parameters in female patients. However, skull BPD showed a strong and statistically significant positive correlation with skull inner cross-sectional area ($r = 0.779$, $p = 0.0001$; Table №6, fig. 5).

In patients older than 40 years, skull biparietal diameter demonstrated a statistically significant strong positive correlation with atlas inner transverse diameter ($r = 0.486$, $p = 0.041$). A strong and statistically significant positive correlation was also observed between skull BPD and skull inner cross-sectional area ($r = 0.622$, $p = 0.013$). Correlations between skull BPD and the remaining atlas parameters, including inner anteroposterior diameter, sagittal canal diameter, and atlas inner cross-sectional area, were weak and not statistically significant. Skull BPD showed a weak negative, non-significant correlation with skull anteroposterior diameter (Table №, fig. 6).

In patients aged 40 years or younger, skull biparietal diameter demonstrated weak and statistically non-significant correlations

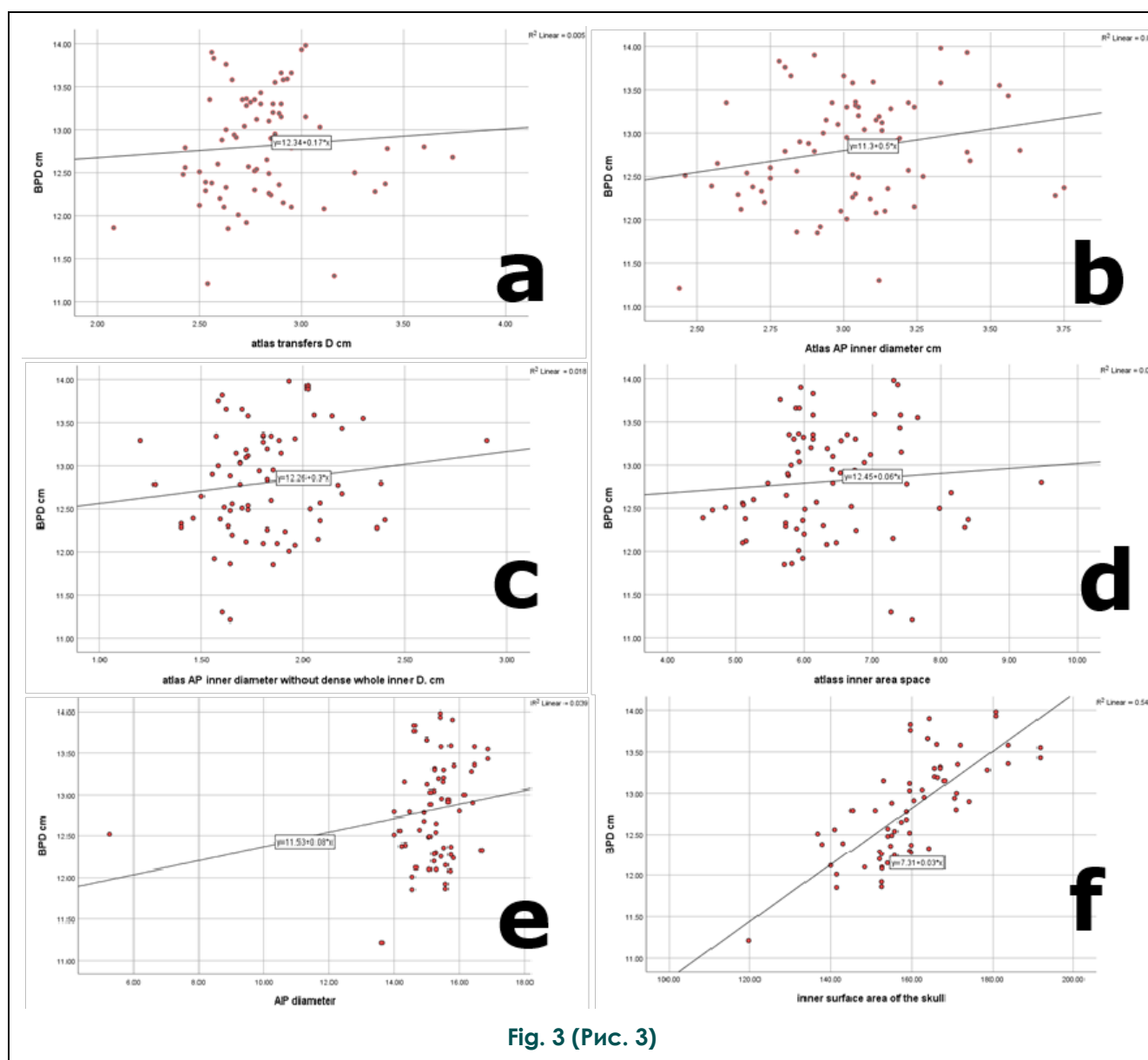


Fig. 3 (Рис. 3)

Fig. 3. Diagrams.

a – Weak correlation between skull BPD and atlas ITD. b – Weak correlation between skull BPD and Atlas inner AP diameter. c – Weak correlation between skull BPD and atlas SCD. d – Weak correlation between the skull BPD and atlas inner CSA. e – Weak correlation between the skull BPD and the skull AP diameter. f – Strong correlation between the skull BPD and the skull inner CSA.

Рис. 3. Диаграммы.

а – Слабая корреляция между бипариетальным диаметром (БПД) черепа и поперечным внутренним диаметром (ИТД) атланта. б – Слабая корреляция между БПД черепа и внутренним передне-задним диаметром (ИАП) атланта. в – Слабая корреляция между БПД черепа и сагиттальным диаметром позвоночного канала (SCD) атланта. г – Слабая корреляция между БПД черепа и внутренней площадью поперечного сечения (CSA) атланта. е – Слабая корреляция между БПД черепа и передне-задним диаметром черепа. ф – Сильная корреляция между БПД черепа и внутренней площадью поперечного сечения черепа.

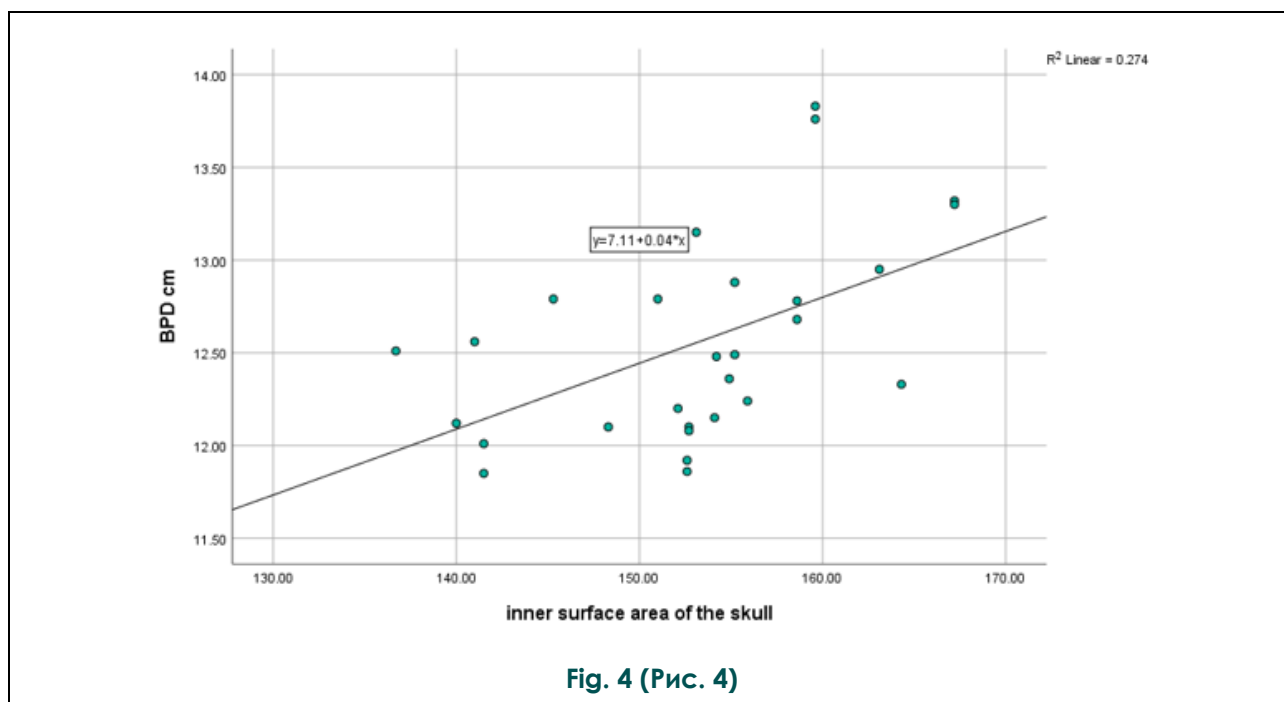


Fig. 4. Diagram.

Strong correlation between skull BPD and skull inner CSA for male patients.

Рис. 4. Диаграмма.

Сильная корреляция между бипариетальным диаметром (БПД) черепа и внутренней площадью поперечного сечения (CSA) черепа у пациентов мужского пола.

Table №3. Means of measured parameters for male.

No.	Factors	Mean $\pm$ SD
1	Age	23.238 $\pm$ 16.043
2	BPD	12.964 $\pm$ 0.626
3	Atlas ITD	2.859 $\pm$ 0.237
4	Atlas IAP diameter	3.087 $\pm$ 0.297
5	Atlas SCD	1.838 $\pm$ 0.316
6	Atlas inner CSA	6.572 $\pm$ 0.965
7	Skull AP diameter	15.028 $\pm$ 0.605
8	Skull inner CSA	153.171 $\pm$ 8.019

Table №4. Correlation between BPD cm with (atlas ITD, Atlas IAP diameter, atlas SCD, atlas inner CSA, Skull AP diameter, skull inner CSA) by using person correlation (For male).

No.	Factors	R (Pearson)	P value	Interpretation
1	Atlas ITD	-0.042	0.791	Weak negative correlation
2	Atlas IAP diameter	0.273	0.08	Weak positive correlation
3	Atlas SCD	0.212	0.177	Weak positive correlation
4	Atlas inner CSA	-0.057	0.718	Weak negative correlation
5	Skull AP diameter	-0.311	0.107	Weak negative correlation
6	Skull inner CSA	0.523	0.004	Strong positive correlation

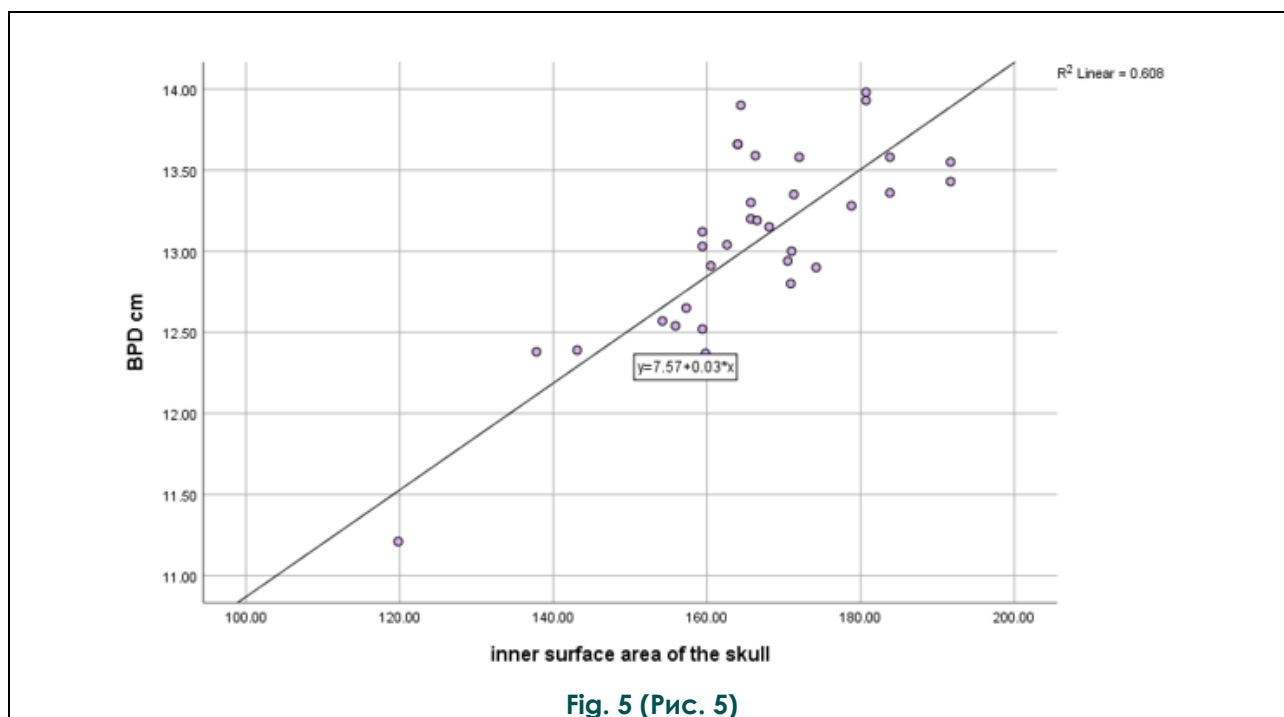


Fig. 5. Diagram.

Strong correlation between skull BPD and skull inner CSA for female patients..

Рис. 5. Диаграмма.

Сильная корреляция между бипариетальным диаметром (БПД) черепа и внутренней площадью поперечного сечения (CSA) черепа у пациентов женского пола.

Table №5. Means of measured parameters for female.		
No.	Factors	Mean ± SD
1	Age	33.483 ± 19.274
2	BPD	12.601 ± 0.543
3	Atlas ITD	2.745 ± 0.308
4	Atlas IAP diameter	2.939 ± 0.219
5	Atlas SCD	1.774 ± 0.210
6	Atlas inner CSA	6.044 ± 0.789
7	Skull AP diameter	15.233 ± 1.816
8	Skull inner CSA	164.835 ± 14.096

Table №6. Correlation between BPD with (atlas ITD, Atlas IAP diameter, atlas SCD, atlas inner CSA, skull AP diameter, skull inner CSA) by using person correlation (for female).				
No.	Factors	R (person)	P value	Interpretation
1	Atlas ITD	0.083	0.659	Weak positive correlation
2	Atlas IAP diameter	-0.090	0.629	Weak negative correlation
3	Atlas SCD	-0.138	0.459	Weak negative correlation
4	Atlas inner CSA	0.120	0.521	Weak positive correlation
5	Skull AP diameter	0.315	0.057	Weak positive correlation
6	Skull inner CSA	0.779	0.0001	Strong positive correlation

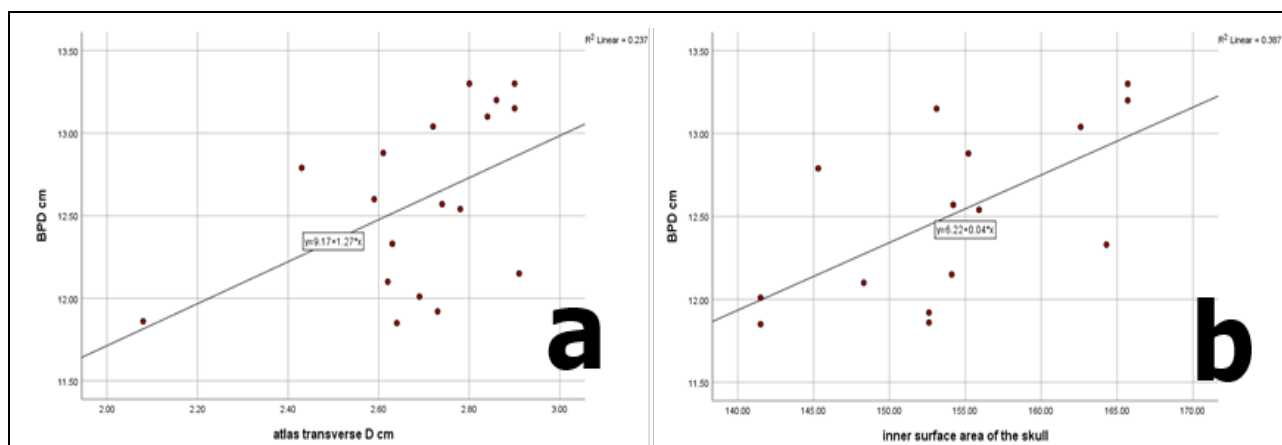


Fig. 6 (Рис. 6)

Fig. 6. Diagram.

a – Strong correlation between skull BPD and atlas ITD for patients with age greater than 40 years. b – Strong correlation between skull BPD and skull inner CSA for patients with age greater than 40 years.

Рис. 6. Диаграмма.

а – Сильная корреляция между бипариетальным диаметром (БПД) черепа и поперечным внутренним диаметром (ИТД) атланта у пациентов старше 40 лет.

б – Сильная корреляция между бипариетальным диаметром (БПД) черепа и внутренней площадью поперечного сечения (CSA) черепа у пациентов старше 40 лет.

Table №7. Correlation between BPD cm with (Atlas ITD, atlas IAP diameter, atlas SCD, atlas inner CSA, skull AP diameter, skull inner CSA) by using person correlation for age greater than 40 years.

No.	Factors	R (Pearson)	P value	Interpretation
1	Atlas ITD	0.486	0.041	Strong positive correlation
2	Atlas IAP	0.297	0.231	Weak positive correlation
3	Atlas SCD	0.099	0.696	Weak positive correlation
4	Atlas inner CSA	0.289	0.245	Weak positive correlation
5	Skull AP diameter	-0.113	0.687	Weak negative correlation
6	Skull inner CSA	0.622	0.013	Strong positive correlation

Table №8. Correlation between BPD cm with (Atlas ITD, atlas IAP diameter, atlas SCD, atlas inner CSA, skull AP diameter, skull inner CSA) by using person correlation for age equal or younger than 40 years old.

No.	Factors	R (Pearson)	P value	Interpretation
1	Atlas ITD	-0.060	0.666	Weak negative correlation
2	Atlas IAP diameter	0.193	0.158	Weak positive correlation
3	Atlas SCD	0.142	0.301	Weak positive correlation
4	Atlas inner CSA	0.001	0.997	Weak positive correlation
5	Skull AP diameter	0.246	0.086	Weak positive correlation
6	Skull inner CSA	0.743	0.0001	strong positive correlation

Table №8. Correlation between BPD cm with (Atlas ITD, atlas IAP diameter, atlas SCD, atlas inner CSA, skull AP diameter, skull inner CSA) by using person correlation for age equal or younger than 40 years old.

No.	Factors	R (Pearson)	P value	Interpretation
1	Skull inner CSA	0.354	0.004	Strong positive correlation

with atlas inner transverse diameter, inner anteroposterior diameter, sagittal canal diameter, and atlas inner cross-sectional area. A weak positive, non-significant correlation was also observed between skull BPD and skull anteroposterior diameter. In contrast, skull BPD showed a strong and statistically significant positive correlation with skull inner cross-sectional area ($r = 0.743$, $p = 0.0001$; Table №8, fig. 7).

Correlation analysis demonstrated a statistically significant positive relationship between atlas inner cross-sectional area and skull inner cross-sectional area ($r = 0.354$, $p = 0.004$), indicating that individuals with a larger skull inner cross-sectional area tend to have a proportionally larger atlas inner cross-sectional area (Table №9, fig. 8).

Discussion.

The atlas-axis complex is highly differentiated in mammals, reflecting adaptations for head movement and stability. The atlas and axis vertebrae are unique among the cervical vertebrae, as they are highly specialized for head movement and stability. The atlas lacks a vertebral body and spinous process, while the axis

has a prominent dens that articulates with the atlas. This unique morphology allows for a wide range of head movements, including flexion, extension, and rotation.[10]

Understanding the relationship between skull dimensions and atlas morphology may have significant implications for the diagnosis and management of conditions affecting the craniovertebral junction. [11]

For instance, certain genetic syndromes or developmental disorders known to affect skull growth may also impact the development of the atlas, predisposing individuals to craniovertebral instability or neurological compression. By elucidating the correlations between BPD and atlas morphometry, clinicians may be better equipped to identify individuals at risk for these complications and implement preventive or therapeutic interventions. Additionally, a comprehensive understanding of these relationships can inform the design of more effective surgical strategies for managing craniovertebral junction abnormalities [6, 12].

In the current study we measured the skull biparietal diameter in 73 patients using CT scan measurements, the statistical interpretations showed that we had 42 males (57.5%)

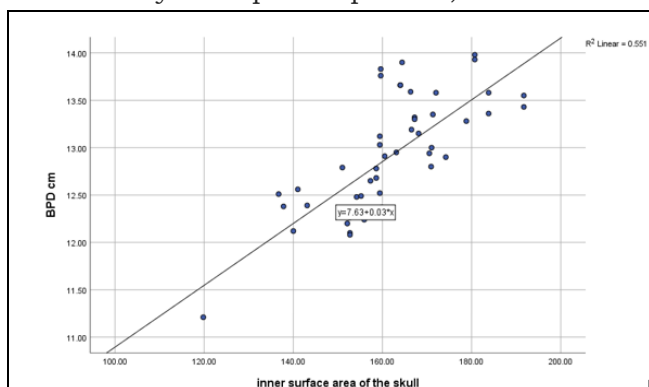


Fig. 7 (Рис. 7)

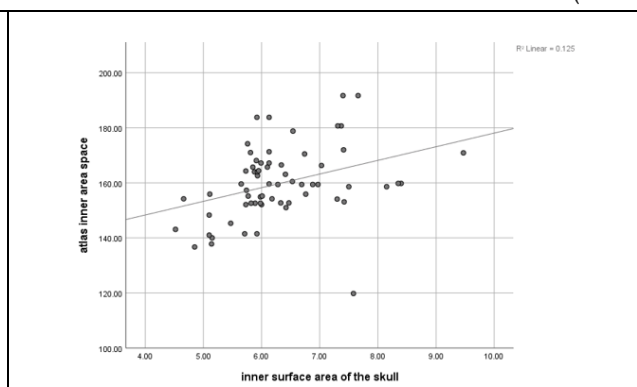


Fig. 8 (Рис. 8)

Fig. 7. Diagram.

Strong correlation between skull BPD and skull inner CSA for patients with age equal or younger than 40 years.

Рис. 7. Диаграмма.

Сильная корреляция между бипариетальным диаметром (БПД) черепа и внутренней площадью поперечного сечения (CSA) черепа у пациентов в возрасте 40 лет и младше.

Fig. 8. Diagram.

Strong correlation between the atlas inner CSA and the skull inner CSA.

Рис. 8. Диаграмма.

Сильная корреляция между внутренней площадью поперечного сечения (CSA) атланта и внутренней площадью поперечного сечения черепа.

and 31 females (42.5%).

The mean of normal biparietal diameter of the skull in this study group was 12.809 ± 0.616 cm, showing 12.964 ± 0.626 in male patients, 12.601 ± 0.543 for females, it reflects that the diameter is smaller in females than males which sounds logic. The measures are less than that obtained by Burdan, et al [12] which showed that the skull width is 149.547mm for males and 143.517mm for females, this study was conducted on Caucasian population so ethnic differences play a role in comparison to our study which conducted on Asian population.

A study conducted by Sazonova Olga et al. showed that the normal width for adult male's skull was 13.5 – 15.8cm while for females it was 13–15.6 cm indicating that there is variation in human skull morphometry according to the gender, age, and ethnicity [13].

The anteroposterior (AP) diameter of the skull means was 15.145 ± 1.412 including 15.028 ± 0.605 for males and 15.233 ± 1.816 for females. The mean skull inner CSA was 159.81 ± 13.144 cm² including 153.171 ± 8.019 cm² for males and 164.835 ± 14.096 cm² for females. Atlas vertebral morphometry was measured showing that the widest mean ITD was 2.81 ± 0.273 , which was 2.859 ± 0.237 for males and 2.745 ± 0.308 for females which seems comparable to the results obtained from (Shilpa and Vatsalaswamy study) in which the maximal atlas vertebral width was 26.89 ± 1.93 mm the study was conducted in Malaysia. [11], while Küçüköğlu et al. in their study conducted in Turki, showed a result of 44.1 ± 3.5 mm [14].

The atlas mean inner antero- posterior (IAP)diameter extending from the inner anterior arch to the inner posterior arch was 3.024 ± 0.275 cm which was 3.087 ± 0.297 cm for males and 2.939 ± 0.219 cm for females which is comparable to the results of (Shilpa & Vatsalaswamy study) which was 27.89 ± 2.59 mm [11] while Küçüköğlu et al. showed the result of 29.61 ± 3.21 mm [14].

Atlas spinal canal diameter (SCD) was measured showing a mean of 1.8111 ± 0.276 cm divided to 1.838 ± 0.316 cm for males and 1.774 ± 0.210 cm for females. The results were comparable to the study conducted by [15].

The atlas inner cross sectional area's mean was 6.348 ± 0.927 cm² including 6.572 ± 0.965 cm² for males and 6.044 ± 0.789 cm² for

females.

A strong positive correlation between the BPD and the inner CSA of the skull, while a weak negative in addition to the weak positive correlations between the BPD and other parameters. Similar results came out regarding correlation between the skull BPD and the other parameters from statistical point of view for female patients. Correlation between skull BPD and the other parameters for age greater than 40 years, showed a new strong correlation between the BPD and atlas ITD, in addition to the usual strong correlation between the BPD and the inner CSA of skull, this indicates that the increased age increases the correlation between these two factors which was not the case according to the results shown in younger patients with ages less than 40 years.

A strong correlation between the skull inner CSA and the atlas inner CSA where the significance is ($P=0.004$ which is less than 0.01), this may be explained by the fact that big skull surrounds a big brain with a big atlas vertebral foramen to surround the big spinal cord the increased overall morphometry was going hand in hand.

Conclusion.

There was a strong positive correlation between the biparietal skull diameter (BPD) and the inner skull surface area in males, females, ages more than and less than 40, also there was strong positive correlation between the skull inner surface area and the atlas inner surface area, however there was only strong positive correlation between the skull BPD and the atlas inner traverse diameter in those older than 40 years. Its highly complex region more studies are important to understand other relationships between the skull and the vertebral column.

Conflict of interest. None declared.

Funding. No funding was received to assist with the preparation of this manuscript.

Ethical approval. According to the ethical approval committee decay No.:FM.SA.158 in 28/4/2025.[the ethical committee in Al-Iraqia University, College of Medicine], the committee followed the Helsinki Declaration. We mentioned that the research is a retrospective study, depends on the patients reports, no patient's name was used no violation of patient's privacy was there according to the national regulations.

References:

1. Saba N, Faheem M, Singh H, Shakya P, Kumar N. Morphometric analysis of the lateral mass of atlas and its clinical significance in craniovertebral junction surgeries. *Surgical neurology international*. 2025. https://doi.org/10.25259/SNI_78_2025.
2. Degani S. *Fetal Biometry: Clinical, Pathological, and Technical Considerations*. Obstetrical and Gynecological Survey. 2001. <https://doi.org/10.1097/00006254-200103000->

00023.

3. Jyothi SR, Kumar JU, Patil P, Vinay SR. Atlas morphometry: A radiologic- Anatomical study. *National Journal of Clinical Anatomy*. 2024. https://doi.org/10.4103/njca.njca_13_24
4. Christopher A. Becker, MD. Skull. Reviewer: Dimitrios Mytilinaios, MD, PhD Last reviewed: November 21, 2023, [internet]. [cited 11-April 2025]. Available from: 'https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-skull'
5. Forbes J, Das JM. Anatomy, Head and Neck: Atlantoaxial Joint. [Updated 2023 Aug 28]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK563271/>
6. Nandini Bhat, Souhardya Das, Lakshmisha Rao, Ashwija Shetty, Vanishri Nayak, Sushma Prabhath, Kurian Alapatt, Suhani Sulamatha. Atlas first cervical vertebrae: Deciphering morphological complexity, quantifying morphometry and integrating clinical perspectives. *Translational Research in Anatomy* 37 (2024) 100346.
7. Yogesh M, Rajeswara Rao N, Raghavendra R. Observational Study of Atlas Vertebra in South Karnataka Population with Special Reference to Retro Articular Canals and Foramina Transversarium. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology* 2023;17(3):1-6.
8. Boyan Zhang, Yueqi Du, Can Zhang et al. Analysis of Failed Atlantoaxial Reduction: Causes of Failure and Strategies for Revision. *Orthopaedic Surgery* 2024;16:2741–2750 • DOI: 10.1111/os.14197.
9. Wieslaw L. Nowinski, Thant Shoon Let Thaung, Beng Choon Chua, Su Hnin Wut Yi, Vincent Ngai, Yili Yang, Robert

- Chrzan, Andrzej Urbanik, Three-dimensional stereotactic atlas of the adult human skull correlated with the brain, cranial nerves, and intracranial vasculature, *Journal of Neuroscience Methods*, Volume 246, 2015, Pages 65-74, ISSN 0165-0270, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.012>.
10. Bhmer C. Correlation between Hox code and vertebral morphology in the mouse: towards a universal model for Synapsida. *BioMed Central*. 2017. <https://doi.org/10.1186/s40851-017-0069-4>
11. Shilpa N Gosavi, Vatsalaswamy. Morphometric Study of the Atlas Vertebra using Manual Method. *Malaysian Orthopaedic Journal* 2012 Vol 6 No 3. <http://dx.doi.org/10.5704/MOJ.1207.015>.
12. Burdan F, W. Umlawska, W. Dworzański, R. Klepacz, J. Szumilo, E. Starosławska, A. Drop. Anatomical variances and dimensions of the superior orbital fissure and foramen ovale in adults. *Folia Morphol*. Vol. 70, No. 4, pp. 263–271.
13. Sazonova Olga, Vovk Oleg, Hordiichuk Daria, Ikramov Volodimir, Onashko Yulia. Establishing the range of variability of the skull structures in adulthood. *Journal of Education, Health and Sport*. 2017;7(12):656-664. eISSN 2391-8306. DOI <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1478808>
14. Kuçukoğlu İ, Orhan M, Bahşi İ. Morphometric and morphological evaluation of the atlas: Anatomic study and clinical implications. *Eur J Ther*. 2022;28(2):96-101.
15. Thejeshwari H.G, Shwetha B, Asha K.R, Archana B.J, Vidhya H.K. MORPHOMETRIC STUDY OF THE ATLAS VERTEBRAE. *International Journal of Academic Medicine and Pharmacy* (www.academicmed.org) ISSN (O): 2687-5365; ISSN (P): 2753-6556.

Список литературы:

1. Saba N, Faheem M, Singh H, Shakya P, Kumar N. Morphometric analysis of the lateral mass of atlas and its clinical significance in craniovertebral junction surgeries. *Surgical neurology international*. 2025. https://doi.org/10.25259/SNI_78_2025.
2. Degani S. Fetal Biometry: Clinical, Pathological, and Technical Considerations. *Obstetrical and Gynecological Survey*. 2001. <https://doi.org/10.1097/00006254-200103000-00023>.
3. Jyothi SR, Kumar JU, Patil P, Vinay SR. Atlas morphometry: A radiologic- Anatomical study. *National Journal of Clinical Anatomy*. 2024. https://doi.org/10.4103/njca.njca_13_24
4. Christopher A. Becker, MD. Skull. Reviewer: Dimitrios Mytilinaios, MD, PhD Last reviewed: November 21, 2023, [internet]. [cited 11-April 2025]. Available from: 'https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-skull'
5. Forbes J, Das JM. Anatomy, Head and Neck: Atlantoaxial Joint. [Updated 2023 Aug 28]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK563271/>
6. Nandini Bhat, Souhardya Das, Lakshmisha Rao, Ashwija Shetty, Vanishri Nayak, Sushma Prabhath, Kurian Alapatt, Suhani Sulamatha. Atlas first cervical vertebrae: Deciphering morphological complexity, quantifying morphometry and integrating clinical perspectives. *Translational Research in Anatomy* 37 (2024) 100346.
7. Yogesh M, Rajeswara Rao N, Raghavendra R. Observational Study of Atlas Vertebra in South Karnataka Population with Special Reference to Retro Articular Canals and Foramina Transversarium. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology* 2023;17(3):1-6.
8. Boyan Zhang, Yueqi Du, Can Zhang et al. Analysis of Failed Atlantoaxial Reduction: Causes of Failure and Strategies for Revision. *Orthopaedic Surgery* 2024;16:2741–2750 • DOI: 10.1111/os.14197.
9. Wieslaw L. Nowinski, Thant Shoon Let Thaung, Beng Choon Chua, Su Hnin Wut Yi, Vincent Ngai, Yili Yang, Robert

arch in Anatomy 37 (2024) 100346.

7. Yogesh M, Rajeswara Rao N, Raghavendra R. Observational Study of Atlas Vertebra in South Karnataka Population with Special Reference to Retro Articular Canals and Foramina Transversarium. *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology* 2023;17(3):1-6.
8. Boyan Zhang, Yueqi Du, Can Zhang et al. Analysis of Failed Atlantoaxial Reduction: Causes of Failure and Strategies for Revision. *Orthopaedic Surgery* 2024;16:2741–2750 • DOI: 10.1111/os.14197.
9. Wieslaw L. Nowinski, Thant Shoon Let Thaung, Beng Choon Chua, Su Hnin Wut Yi, Vincent Ngai, Yili Yang, Robert Chrzan, Andrzej Urbanik, Three-dimensional stereotactic atlas of the adult human skull correlated with the brain, cranial nerves, and intracranial vasculature, *Journal of Neuroscience Methods*, Volume 246, 2015, Pages 65-74, ISSN 0165-0270, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.02.012>.
10. Bhmer C. Correlation between Hox code and vertebral morphology in the mouse: towards a universal model for Synapsida. *BioMed Central*. 2017. <https://doi.org/10.1186/s40851-017-0069-4>
11. Shilpa N Gosavi, Vatsalaswamy. Morphometric Study of the Atlas Vertebra using Manual Method. *Malaysian Orthopaedic Journal* 2012 Vol 6 No 3. <http://dx.doi.org/10.5704/MOJ.1207.015>.
12. Burdan F, W. Umlawska, W. Dworzański, R. Klepacz, J. Szumilo, E. Starosławska, A. Drop. Anatomical variances

and dimensions of the superior orbital fissure and foramen ovale in adults. *Folia Morphol.* Vol. 70, No. 4, pp. 263–271.

13. Sazonova Olga, Vovk Oleg, Hordüchuk Daria, Ikramov Volodimir, Onashko Yulia. Establishing the range of variability of the skull structures in adulthood. *Journal of Education, Health and Sport.* 2017;7(12):656-664. eISSN 2391-8306. DOI <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1478808>

14. Kuçukoğlu İ, Orhan M, Bahşi İ. Morphometric and mor-

phological evaluation of the atlas: Anatomic study and clinical implications. *Eur J Ther.* 2022;28(2):96-101.

15. Thejeshwari H.G, Shwetha B, Asha K.R, Archana B.J, Vidhya H.K. MORPHOMETRIC STUDY OF THE ATLAS VERTEBRAE. *International Journal of Academic Medicine and Pharmacy* (www.academicmed.org) ISSN (O): 2687-5365; ISSN (P): 2753-655.

МРТ В ДИАГНОСТИКЕ РЕДКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ КАРОТИДНОЙ АНГИОПЛАСТИКИ СО СТЕНТИРОВАНИЕМ

Стегура Д.С., Аннушкин В.А., Рябинкина Ю.В., Полищук Р.В., Коновалов Р.Н., Кротенкова М.В., Кремнева Е.И.

ФГБНУ «Научный центр неврологии». г. Москва, Россия.

Эндоваскулярные методы лечения стенозирующих процессов внутренних сонных артерий являются эффективным методом профилактики первичного и вторичного инсульта. У некоторых пациентов после каротидной ангиопластики со стентированием в раннем послеоперационном периоде возможно развитие неврологической симптоматики: головной боли, судорожных приступов, очаговой неврологической симптоматики, нарушений сознания, дезориентации и психомоторного возбуждения. При проведении инструментальных методов диагностики, в частности МРТ головного мозга, – может не выявляться патологических изменений, объясняющих развитие данной симптоматики (ишемических и/или геморрагических), однако при введении контрастного средства и выполнении режима T2 FLAIR возможно выявление лептоменингеального типа контрастного усиления, которое не визуализируется в режиме T1-взвешенных изображений (T1-ВИ).

Цель исследования. Выявление изменений в головном мозге у пациентов в раннем послеоперационном периоде после проведения каротидной ангиопластики со стентированием.

Материалы и методы. В исследование было включено 38 пациентов после каротидной ангиопластики со стентированием, выполненной на базе ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук». МРТ-исследование было выполнено на томографах Philips Panorama с величиной магнитной индукции 1.0 Т и Siemens Magnetom Avanto с величиной магнитной индукции 1.5 Т. Наряду со стандартными импульсными последовательностями (T2-ВИ, T1-ВИ, T2 FLAIR, T2 hemo, DWI, T1 ВИ+КС) в МРТ-протокол был добавлен режим T2 FLAIR с контрастным усилением. Использовалось гадолинийсодержащее контрастное средство – гадобутрол в расчете 0,1 ммоль/кг массы тела пациента.

Результаты. Пациенты были разделены на 2 группы – без развития неврологической симптоматики и с развитием таковой. В первую группу был включен 31 пациент, во вторую – 7 пациентов. В группе пациентов с развитием неврологической симптоматики в раннем послеоперационном периоде более чем в половине случаев отмечалось появление психомоторного возбуждения и дезориентации, в меньшей степени имели место сенсомоторная афазия, эпизоды беспокойства, галлюцинации и гемипарез. При выполнении МРТ головного мозга у 3-х из 7-ми (42,8%) пациентов определялись мелкие очаги острой ишемии кортикальной и субкортикальной локализации. У 6-ти из 7-ми пациентов было выявлено лептоменингеальное контрастное усиление в режиме T2 FLAIR, у 1-ого пациента – контрастное усиление отсутствовало. В группе пациентов без развития неврологической симптоматики очаги острой ишемии различной локализации наблюдались в 11-ти из 31-го (35,5%) случая, накопление контрастного средства в режимах T1-ВИ и T2 FLAIR выявлено не было.

Обсуждение. Постконтрастная визуализация в режиме T2 FLAIR играет важную роль при обследовании пациентов в первые сутки после каротидной ангиопластики со стентированием при появлении неврологической симптоматики. Она позволяет выявлять участки лептоменингеального контрастного усиления в стандартных режимах сканирования, включая DWI и T2 hemo, патологических изменений, объясняющих клиническую симптоматику, как правило, не наблюдается. Выявление лептоменингеального контрастирования в режиме T2 FLAIR возможно благодаря его чувствительности к низким концентрациям контрастного средства, а также к минимальным изменениям состава цереброспинальной жидкости. Механизм лептоменингеального контрастного усиления после каротидной ангиопластики со стентированием сонной артерии изучен не окончательно. Некоторые авторы склоняются к тому, что нарушение гематоэнцефалического барьера связано с резкими гемодинамическими изменениями после оперативного вмешательства как проявление гиперперфузии, другие рассматривают данный феномен как

токсическое действие рентгенконтрастного препарата, использующегося при проведении ангиографического исследования, как при контраст индуцированной энцефалопатии. Есть основание полагать, что данные изменения стоит рассматривать как комбинацию данных процессов. По данным литературы у пациентов без развития неврологической симптоматики также может выявляться лептоменингеальное контрастное усиление в режиме T2 FLAIR, в нашем исследовании таких пациентов не было, что, вероятнее всего, связано с малой выборкой.

Заключение. Факторы, которые могут влиять на развитие неврологической симптоматики и появление лептоменингеального накопления контрастного средства у пациентов в раннем послеоперационном периоде после стентирования внутренних сонных артерий требуют дальнейшего изучения. Исходя из полученных данных, целесообразным является проведение МРТ головного мозга в режиме T2 FLAIR с контрастным усилением всем пациентам с развитием неврологической симптоматики после каротидной ангиопластики со стентированием.

Ключевые слова: каротидная ангиопластика со стентированием, внутренняя сонная артерия, магнитно-резонансная томография, контрастное средство, T2 FLAIR, лептоменингеальное контрастное усиление.

Контактный автор: Стегура Диана Сергеевна, e-mail: stegura@neurology.ru

Для цитирования: Стегура Д.С., Аннушкин В.А., Рябинкина Ю.В., Полищук Р.В., Коновалов Р.Н., Кротенкова М.В., Кремнева Е.И. МРТ в диагностике редких осложнений каротидной ангиопластики со стентированием. REJR 2026; 16(1):20-33. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-20-33.

Статья получена: 27.03.26

Статья принята: 06.05.26

MRI IN THE DIAGNOSIS OF RARE COMPLICATIONS OF CAROTID ANGIOPLASTY WITH STENTING

Stegura D.S., Annushkin V.A., Ryabinkina Yu.V., Polischuk R.V., Konovalov R.N., Krotenkova M.V., Kremneva E.I.

Research Center of Neurology and Neurosciences. Moscow, Russia.

Endovascular methods of treatment of stenotic processes of internal carotid arteries are an effective method of prevention of primary and secondary stroke. Some patients after carotid angioplasty with stenting in the early postoperative period may develop neurologic symptoms: headache, convulsive seizures, focal neurologic symptoms, disorders of consciousness, disorientation and psychomotor agitation. Instrumental diagnostic methods, in particular MRI of the brain – may not reveal pathological changes explaining the development of these symptoms (ischemic and/or hemorrhagic), but when administering a contrast agent and performing a T2 FLAIR pulse sequence, a leptomeningeal type of contrast enhancement may be detected, which is not visualized in the mode of T1 weighted images.

Purpose. Detection of brain changes in patients in the early postoperative period after carotid angioplasty with stenting.

Materials and Methods. The study included 38 patients after carotid angioplasty with stenting performed on the basis Research Center of Neurology and Neurosciences. MRI examination was performed on Philips Panorama 1.0T and Siemens Magnetom Avanto 1.5T. Along with standard pulse sequences (T2WI, T1WI, T2 FLAIR, T2 hemo, DWI, T1WI+CE), the T2 FLAIR mode with contrast enhancement was added to the MRI protocol. The contrast agent gadobutrol at the rate of 0.1 mmol/kg of the patient's body weight was used.

Results. Patients were divided into 2 groups – without and with the development of neurologic symptoms. The first group included 31 patients, the second group included 7 patients. In the group of patients with the development of neurological symptoms in the early postoperative period, more than half of the cases showed psychomotor agitation and disorientation, and to a lesser extent sensorimotor aphasia, episodes of anxiety, hallucinations, and hemiparesis. When MRI of the brain was performed in 3 out of 7 (42.8%) patients, small foci of acute ischemia of cortical and subcortical localization were detected. In 6 out of 7 patients leptomeningeal contrast enhancement in T2 FLAIR

mode was detected, in 1 patient there was no accumulation. In the group of patients without neurological symptoms development the foci of acute ischemia of different localization were observed in 11 out of 31 (35.5%) cases, no contrast agent accumulation was detected in T1 WI and T2 FLAIR modes.

Discussion. Post-contrast T2 FLAIR imaging plays an important role in the evaluation of patients during the first 24 hours after carotid artery stenting when neurological symptoms develop. It allows detection of areas of leptomeningeal contrast enhancement, whereas standard MRI sequences, including DWI and T2 hemo, usually do not demonstrate pathological changes that could explain the clinical symptoms. The detection of leptomeningeal enhancement on T2 FLAIR is possible due to its sensitivity to low concentrations of contrast agent as well as to minimal changes in cerebrospinal fluid composition. The mechanism of leptomeningeal contrast enhancement after carotid artery stenting has not yet been fully elucidated. Some authors suggest that blood-brain barrier disruption is related to abrupt hemodynamic changes after the procedure as a manifestation of hyperperfusion, whereas others interpret this phenomenon as a toxic effect of the iodinated contrast agent used during angiographic examination, similar to contrast-induced encephalopathy. There is reason to believe that these changes should be regarded as a combination of both processes. According to the literature, leptomeningeal contrast enhancement on T2 FLAIR may also be observed in patients without neurological symptoms; however, no such patients were identified in our study, most likely due to the small sample size.

Conclusion. The factors that may influence the development of neurological symptoms and the appearance of leptomeningeal accumulation of contrast agent in patients in the early postoperative period after stenting of internal carotid arteries require further study. Based on the obtained data, it is reasonable to perform MRI of the brain in T2 FLAIR mode with contrast enhancement in all patients with the development of neurologic symptoms after carotid angioplasty with stenting.

Keywords: carotid angioplasty with stenting, internal carotid artery, magnetic resonance imaging, contrast agent, T2 FLAIR, leptomeningeal contrast enhancement.

Corresponding author: Stegura D.S., e-mail: stegura@neurology.ru

For citation: Stegura D.S., Annushkin V.A., Ryabinkina Yu.V., Polischuk R.V., Konovalov R.N., Krotenkova M.V., Kremneva E.I. MRI in the diagnosis of rare complications of carotid angioplasty with stenting. REJR 2026; 16(1):12-25. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-12-25.

Received: 27.03.26

Accepted: 06.05.26

Цереброваскулярные заболевания, в частности, ишемический инсульт (ИИ), являются одной из наиболее актуальных проблем XXI века, сопровождающейся значимыми медицинскими, социальными и экономическими последствиями. Одной из причин развития нарушений мозгового кровообращения по ишемическому типу является атеросклеротическое поражение ветвей магистральных артерий головы. Атеросклероз – хроническое мультифакториальное прогрессирующее заболевание, возникающее в результате нарушения жирового обмена, характеризующееся деструктивно-пролиферативными и склеротическими изменениями стенок крупных артерий эластического и мышечно-эластического типов с формированием на их внутренней поверхности атероматозных бляшек, обуславливающих нарушение гемодинамики в органах, в частности, в головном мозге с развитием

ишемического инсульта (ИИ) и транзиторной ишемической атаки (ТИА) [1–3].

Для уточнения степени стеноза сонных артерий необходимо проведение таких инструментальных методов диагностики, как ультразвуковое дуплексное сканирование (УЗДС), мультиспиральная компьютерно-томографическая ангиография (МСКТА), магнитно-резонансная ангиография (МРА) [3, 4].

К ангиореконструктивным методам лечения стеноза сонных артерий относятся каротидная эндартерэктомия (КЭАЭ) и каротидная ангиопластика со стентированием (КАС). Такие операции являются эффективным методом профилактики первичного и вторичного инсульта [3]. Ангиореконструктивные операции могут быть сопряжены с риском развития периоперационного нарушения мозгового кровообращения. Согласно данным Полищука Р.В. и соавторов (2021 год) проведение КАС в 70% случаев сопро-

вождается развитием синдрома каротидного синуса [5]. При раздражении барорецепторов, расположенных в каротидном синусе, может происходить снижение артериального давления (гипотензия) и/или замедление сердечного ритма (брадикардия), в ряде случаев, с развитием кратковременной асистолии. «Не контролируемый» медикаментозно синдром каротидного синуса в периоперационном периоде чаще приводит к ишемическим повреждениям головного мозга у пациентов, перенесших каротидную ангиопластику со стентированием по сравнению с пациентами после каротидной эндартерэктомии [6, 7]. Более редкими осложнениями ангиореконструктивных оперативных вмешательств являются развитие внутримозгового кровоизлияния (внутричерепное, субарахноидальное), синдрома гиперперфузии или контраст-индуцированной энцефалопатии (КИЭ) (при КАС) [8–10].

Причиной возможных острых эмболических осложнений могут являться особенности проведения КАС: механическая манипуляция системой доставки стента в области дуги аорты и сонных артерий, удаление системы временной защиты от тромбоза, пролабирование частей бляшки через ячейки стента после его установки [8]. В исследовании Танашиян М.М. и соавторов (2019 год) с целью выявления острых эмболических изменений после проведения ангиопластики со стентированием внутренней сонной артерии (ВСА) было выполнено МРТ головного мозга в режиме диффузионно-взвешенных изображений – *diffusion-weighted images* (DWI) до и после оперативного лечения стенозирующего процесса ВСА. По данным режима DWI очаги острой ишемии были выявлены у 28/54 (52%) пациентов, локализация изменений – преимущественно корковая в бассейне кровоснабжения оперированной артерии, размеры очагов – до 5 мм. Все выявленные очаги острой ишемии были признаны асимптомными [11].

Синдром церебральной гиперперфузии (СЦГ) – редкое осложнение после операций на сонных артериях. По данным Sundt et al. (1975), Крайник и др. (2011) и Hayashi et al. (2012) синдром церебральной гиперперфузии – это состояние, возникающее в результате чрезмерного увеличения церебрального кровотока после хирургического вмешательства, которое превышает метаболические потребности головного мозга [15–17]. Согласно систематическому обзору 2018 года (Huibers et al.) распространенность СЦГ после каротидной ангиопластики со стентированием составляет 3,5% (2,6–4,7%). Развитие синдрома

церебральной гиперперфузии после ангиореконструктивных операций имеет переменный временной характер. После каротидной эндартерэктомии пик развития СЦГ приходится на 5-ый, 6-ой дни. В то время как после каротидной ангиопластики со стентированием сонной артерии СЦГ может развиваться в раннем послеоперационном периоде [33, 34]. Клинически данный синдром характеризуется следующими симптомами, возникающими в отсутствии церебральной ишемии: ипсилатеральной головной болью мигренозного типа, которая может сопровождаться болью в глазах и лице, эпилептическими припадками, очаговой неврологической симптоматикой. Наряду с этим, возможно развитие нарушений сознания (делирия), когнитивных расстройств с дезориентацией [16, 20]. Значительное увеличение мозгового кровотока, нарушение механизмов ауторегуляции, а также использование рентгенконтрастных веществ могут являться пусковыми факторами в патофизиологии синдрома гиперперфузии [19–21].

Контраст-индуцированная энцефалопатия (КИЭ) – это редкое состояние, которое может возникать после введения контрастного средства внутрисосудистым или интракардиальным путем. Чаще оно ассоциируется с применением йодсодержащих контрастных средств, нежели с контрастными веществами на основе гадолиния. Группой риска являются пациенты, страдающие хронической болезнью почек (ХБП) ввиду замедленного выведения контрастного средства. КИЭ может развиваться в течение нескольких минут или часов после введения контрастного средства [22]. Клинически КИЭ может проявляться нарушениями сознания, судорогами, изменением психического состояния. Вопрос о механизме развития контраст-индуцированной энцефалопатии остается дискуссионным, предполагается, что она является результатом токсической реакции на введенное контрастное средство, которое может нарушать гематоэнцефалический барьер. Факторами риска, которые могут влиять на развитие КИЭ являются заболевания почек, сахарный диабет, гипотония, а также высокие дозы контрастного средства. Контраст-индуцированная энцефалопатия является обратимым состоянием в условиях успешной диагностики и лечения, однако в более тяжелых случаях она может привести к стойкому неврологическому дефициту или быть фатальной [9, 12–15]. В рамках инструментальной диагностики контраст-индуцированной энцефалопатии при проведении нативной компьютерной томографии

может быть выявлено ипсилатеральное или билатеральное повышение плотности в субарахноидальном пространстве, которое разными авторами трактуется как экстравазация контрастного средства или субарахноидальное кровоизлияние [25–27].

Использование таких инструментальных методов диагностики, как компьютерная томография и магнитно-резонансная томография является первоочередным при появлении очаговой и общемозговой неврологической симптоматики после ангиореconstructивных операций [26–28]. После КЭАЭ и КАС, ввиду резкого увеличения мозгового кровотока, может наблюдаться нарушение проницаемости гематоэнцефалического барьера, что представляется возможным оценить при проведении МРТ с контрастным усилением [28].

Предпочтительной импульсной последовательностью после контрастного усиления в диагностике внутричерепных патологий являются T1-взвешенные изображения, однако последние не всегда в полной мере могут отразить имеющиеся изменения в веществе и оболочках головного мозга. Отличительной чертой импульсной последовательности T2 FLAIR (fluid attenuation inversion recovery) является подавление сигнала от свободной жидкости (цереброспинальной жидкости и движущейся крови). Кроме того, последовательность T2 FLAIR крайне чувствительна к минимальным изменениям цереброспинальной жидкости. Ввиду своих особенностей после введения контрастного средства в режиме T2 FLAIR не отмечается накопления контрастного средства в сосудистых структурах и неизмененных оболочках головного мозга [29, 30]. В связи с этим МРТ головного мозга с контрастным усилением является важным методом инструментальной диагностики после реконструктивных операций на артериях в условиях отсутствия ишемического поражения, топически ответственного за появившуюся неврологическую симптоматику.

При проведении МРТ головного мозга с контрастным усилением пациентам после каротидной ангиопластики со стентированием внутренней сонной артерии возможно выявление лептоменингеального контрастного усиления на изображениях в режиме T2 FLAIR с отсутствием таковых изменений в режиме T1-ВИ.

Цель исследования.

Определение состояния оболочек и вещества головного мозга у пациентов в раннем послеоперационном периоде после проведения каротидной ангиопластики со стентированием.

тированием.

Материалы и методы.

Исследование проводилось на базе отдела лучевой диагностики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский центр неврологии и нейронаук». В исследование было включено 38 пациентов, направленных на оперативное вмешательство – каротидную ангиопластику со стентированием (КАС).

Ангиопластика со стентированием проводилась на аппарате Innova General Electric. Диагностическую рентгеноконтрастную церебральную ангиографию выполняли до и после стентирования. В качестве систем противоэмболической защиты головного мозга во время операции использовались фильтры Emboshield NAV (США) и Filter Wire EZ (США). Для стентирования использовались стенты фирм ХАСТ Abbott Vascular (США) диаметрами 9-7, 8-6, 10-8 мм и длиной 40 мм, CASPER Carotid Stent System R (США) диаметром 9 мм, длиной 30 мм, Cguard Carotid EPS (Бельгия) диаметром 9 мм, длиной 40 мм. Для достижения оптимального результата всем пациентам после позиционирования и раскрытия стента проводилась постдилатация с помощью баллонного катетера Viatrac 14 Plus. Время баллонной дилатации составляло 5-6 секунд, давление составляло 9-14 атмосфер. Всем пациентам внутривенно болюсно вводился гепарин для обеспечения антикоагулянтного эффекта. Во время операции использовались рентгеноконтрастные вещества: йопромид (300 мг йода/мл) и йомерол (300 мг йода/мл). Последние относятся к неионным водорастворимым низкомолекулярным рентгеноконтрастными препаратами, йомерол является нефротропным. После проведения операции пациенты были переведены в отделение реанимации и интенсивной терапии для мониторинга витальных показателей.

Всем пациентам было выполнено МРТ-исследование головного мозга на томографах Philips Panorama с величиной магнитной индукции 1.0 Т и Siemens Magnetom Avanto с величиной магнитной индукции 1.5 Т по протоколу, включающему следующие импульсные последовательности с соответствующими параметрами: T2: TR=4336/4000 мс., TE=100/106 мс, толщина среза – 5 мм; T2 FLAIR: TR=11000/9000 мс, TE=140/92 мс, TI=2800/2500 мс, толщина среза – 5 мм; T1 ВИ: TR=25/1940 мс, TE=6,91/3,1 мс, толщина среза – 1,6/1,0 мм; DWI: количество направлений – 5, параметры b=0; b=500; b=800/1000*10-3секунд/мм², TR=3439,7/3600 мс, TE=91,5/102 мс, толщина среза – 5

мм, T2 hemo: TR=717,1/800 мс, TE=20,7/26 мс, толщина среза – 5 мм; после введения контрастного средства были выполнены режимы: T1-ВИ и T2 FLAIR с аналогичными доконтрастными параметрами. Задержка сканирования после внутривенного введения КС перед режимом T1 составляла 10 минут, перед режимом T2 FLAIR – 20 минут. В качестве контрастного средства использовался гадоутрол из расчета 0,1 ммоль/кг массы тела пациента.

Статистический анализ проводился с применением программного пакета SPSS Statistics версии 26.0 (IBM, США). Тип распределения количественных переменных оценивался путем анализа частотных гистограмм и с помощью критерия Шапиро-Уилка. Для описания количественных переменных использовались медиана и квартили. Для сравнения 2 несвязанных групп по количественной переменной с нормальным распределением применялся Т-тест для несвязанных совокупностей. Для сравнения 2 несвязанных групп по количественным переменным с ненормальным распределением применялся тест Манна-Уитни.

Результаты.

Были получены результаты 38 исследований пациентов в возрасте от 52 до 84 лет, медиана возраста составила 68,2 [62,8;74,8] года. Распределение по полу: мужчины – 27 (71,1%), женщины – 11 (28,9%). Сопутствующие заболевания: артериальная гипертензия присутствовала у всех пациентов, сахарный диабет – у 11 (28,9%), хроническая болезнь почек разной степени выраженности – у 14 (36,8%) человек. Неврологическая симптоматика развилась у 7 пациентов (18,4%). При выполнении рентгенодиагностической церебральной ангиографии во время операции были использованы следующие контрастные средства: йопромид в 73,7% случаев, йоме-рол – в 26,3%. МРТ головного мозга с контрастным усилением была выполнена в течение 25,0 [23,0; 28,0] часов после операции на томографах: Siemens Magnetom Avanto, 1,5 Т – 3 (7,9%) исследования, Philips Panorama, 1,0 Т – 35 (92,1%). Используемое контрастное средство: гадоутрол (из расчета 0,1 ммоль/кг) – 100%. Сравнительная характеристика по группам представлена в таблице №1. Выявленные изменения в головном мозге при проведении МРТ представлены в таблице №2. Среди всех участников после каротидной ангиопластики со стентированием преобладали пациенты с наличием небольшого количества очагов сосудистого генеза (Fazekas grade 1) – 23 (60,5%), у 13 (34,2%) пациентов отмечался Fazekas grade 2, у 1

(2,6%) – Fazekas grade 3. В стандартных режимах при проведении МРТ головного мозга, в том числе в режиме T2 hemo, данных за наличие геморрагических изменений получено не было. Очаги «острой» ишемии были выявлены у 14/38 (36,8%) пациентов, их локализация в большинстве случаев была кортикальной и субкортикальной. В большинстве случаев в обеих группах «острые» очаги были выявлены ипсилатерально относительно оперативного вмешательства.

Группа пациентов без развития неврологической симптоматики.

В данную группу вошел 31 пациент в возрасте от 52 до 84 лет: 22 (71%) мужчины и 9 (29%) женщин. Медиана степени стеноза составила 75,0% [70,0;90,0]. Атеросклеротическое поражения правой ВСА отмечалось у 17 (54,8%) человек, левой ВСА – у 14 (45,2%) человек. Контралатеральный стеноз разной степени выраженности присутствовал у 10 (32,3%) человек, контралатеральная окклюзия – у 3 (9,7%) человек. Двум (6,4%) пациентам в предшествующие 3 месяца была проведена каротидная ангиопластика со стентированием контралатерально и ипсилатерально. Медиана артериального давления до операции: САД – 132,0 [125,0;145,0] мм рт. ст., ДАД – 70,0 [70,0;80,0] мм рт. ст.; после операции: САД – 130,0 [120,0;135,0] мм рт. ст., ДАД – 75,0 [70,0;80,0] мм рт. ст. Длительность операции составила 30,0 [25,0;35,0] минут. Количество рентгенконтрастного вещества составило 150,0 [150,0; 150,0] мл. После оперативного вмешательства у большинства пациентов (22 человека, 71%) отмечалась нестабильность гемодинамики в виде развития синокаротидного синдрома. Очаги «острой» ишемии были выявлены у 11 (35,5%) пациентов.

Группа пациентов с развитием неврологической симптоматики.

В данную группу вошло 7 пациентов, в возрасте от 63 до 77 лет: 5 (71,4%) мужчин и 2 (28,6%) женщины. Медиана степени стеноза составила 90,0% [70,0;90,0]. Атеросклеротическое поражения правой ВСА отмечалось у 2 (28,6%) человек, левой ВСА – у 5 (71,4%) человек. Контралатеральный стеноз разной степени выраженности присутствовал у 2 (28,6%) человек. Одному (14,3%) пациенту в предшествующие 3 месяца была проведена каротидная ангиопластика со стентированием контралатерально. Медиана артериального давления до операции: САД – 140,0 [125,0;160,0] мм рт. ст., ДАД – 78,0 [70,0;90,0] мм рт. ст.; после операции: САД – 123,0 [125,0;140,0] мм рт. ст., ДАД – 78,0 [70,0;80,0] мм рт. ст. Длительность операции

Таблица №1. Сравнительная характеристика пациентов после каротидной ангиопластики со стентированием.

		Пациенты без неврологической симптоматики (n=31)	Пациенты с развитием неврологической симптоматики (n=7)
САД (мм рт. ст.), Ме [Q1; Q3]	До операции	132,0 [125,0;145,0]	140,0 [125,0;160,0]
	После операции	130,0 [120,0;135,0]	123,0 [125,0;140,0]
ДАД (мм рт. ст.), Ме [Q1; Q3]	До операции	70,0 [70,0;80,0]	78,0 [70,0;90,0]
	После операции	75,0 [70,0;80,0]	78,0 [70,0;80,0]
Контралатеральный стеноз /окклюзия, n (%)		Стеноз – 10 (32,3%) Окклюзия – 3 (9,7%)	Стеноз – 2 (28,6%)
КАС в предшествующие 3 месяца, n (%)		2 (6,4%)	1 (14,3%)
Длительность операции (мин.), Ме [Q1; Q3]		30,0 [25,0;35,0]	25,0 [25,0;40,0]
Количество рентгеноконтрастного средства (мл), Ме [Q1; Q3]		150,0 [150,0; 150,0]	150,0 [100,0;250,0]
Развитие синдрома каротидного синуса, n (%)		22 (71%)	6 (86%)
Симптоматика после КАС (%)		нет	- дезориентация (57,1%) - псих. возбуждение (57,1%) - нарушение сознания (42,8%) - сенсомоторная афазия (28,6%) - эпизоды беспокойства (14,2%) - галлюцинации (14,2%) - моторная афазия (14,2%) - гемипарез (14,2%) - монопарез (14,2%)

составила 25,0 [25,0;40,0] минут. Количество рентгеноконтрастного вещества составило 150,0 [100,0;250,0] мл. После оперативного вмешательства у большинства пациентов (6 человек, 86%) отмечалась нестабильность гемодинамики в виде развития синокаротидного синдрома. Очаги «острой» ишемии были выявлены у 3 (42,8%) пациентов. Наряду с этим у пациентов развилась очаговая и общемозговая неврологическая симптоматика, которая проявлялась в виде: дезориентации (57,1%), психомоторного возбуждения (57,1%), нарушения сознания разной степени

выраженности (42,8%), сенсомоторной афазии (28,6%), эпизодов беспокойства (14,2%), галлюцинаций (14,2%), моторной афазии (14,2%), гемипареза (14,2%), монопареза (14,2%). Медиана времени появления неврологической симптоматики после оперативного вмешательства составила 5,0 [1,0;6,0] часов. В группе пациентов с развитием неврологической симптоматики после операции в 6/7 (85,7%) случаев было выявлено накопление контрастного средства по лептоменингеальному типу в режиме T2 FLAIR. У 3 (50%) из них контрастное усиление наблюдалось со

стороны вмешательства, у остальных 3 (50%) – в обоих полушариях большого мозга. Данных за наличие контрастного усиления в режиме T1-ВИ во всех 7 случаях получено не было.

При проведении МРТ-исследования головного мозга с контрастным усилением у пациентов были выявлены следующие изменения в головном мозге (табл. №2, рис. 1):

Обсуждение.

Роль постконтрастных изображений в режиме T1-ВИ в диагностике внутричерепных поражений несомненно важна, однако на фоне контрастирования сосудов и неизмененных оболочек головного мозга не всегда удастся визуализировать все составляющие патологического процесса. Постконтрастные изображения в режиме T2 FLAIR в

отличие от T1-ВИ не показывают контрастное усиление в сосудистых структурах и неизмененных оболочках головного мозга. В исследовании Lee et al. (2016) описана ценность использования последовательности T2 FLAIR после контрастирования для возможности получения дополнительной информации. Наряду с этим, на фантоме была показана большая чувствительность постконтрастных изображений в режиме T2 FLAIR к укорочению T1 релаксации по сравнению с таковыми в режиме T1-ВИ при низких концентрациях контрастного средства. Исследователями был сделан вывод, что слабо контрастирующиеся поражения в режиме T1-ВИ могут быть более четко визуализированы в режиме T2 FLAIR [28]. Лептоменингеальное контрастное усиление в нашей когорте паци

Таблица №2. МРТ изменения в головном мозге у пациентов после КАС.

	Пациенты без неврологической симптоматики (n=31)	Пациенты с развитием неврологической симптоматики (n=7)
Наличие очагов ишемии, n (%)	11 (35,5%)	3 (42,9%)
Локализация очагов ишемии (при наличии), n (%)		
- кортикальная	2 (18,1%)	2 (66,6%)
- субкортикальная	2 (18,1%)	-
- суб- и кортикальная	3 (27,2%)	1 (33,3%)
- подкорковая	3 (27,2%)	-
-подкорковая, суб- и кортикальная	1 (9%)	-
Гиперинтенсивность белого вещества, шкала Fazekas, n (%)		
- grade 0	-	1 (14,3%)
- grade 1	21 (67,7%)	2 (28,6%)
- grade 2	9 (29%)	4 (57,1%)
- grade 3	1 (3,2%)	-
Кистозно-глиозные изменения, n (%)	12 (38,7 %)	3 (42,8%)
Накопление КС в режиме T2 FLAIR		
- отсутствует	31 (100%)	1 (14,2%)
- ипсилатерально	-	3 (42,8%)
- оба полушария	-	3 (42,8%)
Характер накопления КС в режиме T2 FLAIR		
- гиральный	-	1 (16,7 %)
- лептоменингеальный	-	4 (66,7 %)
-оба типа	-	1 (16,7 %)

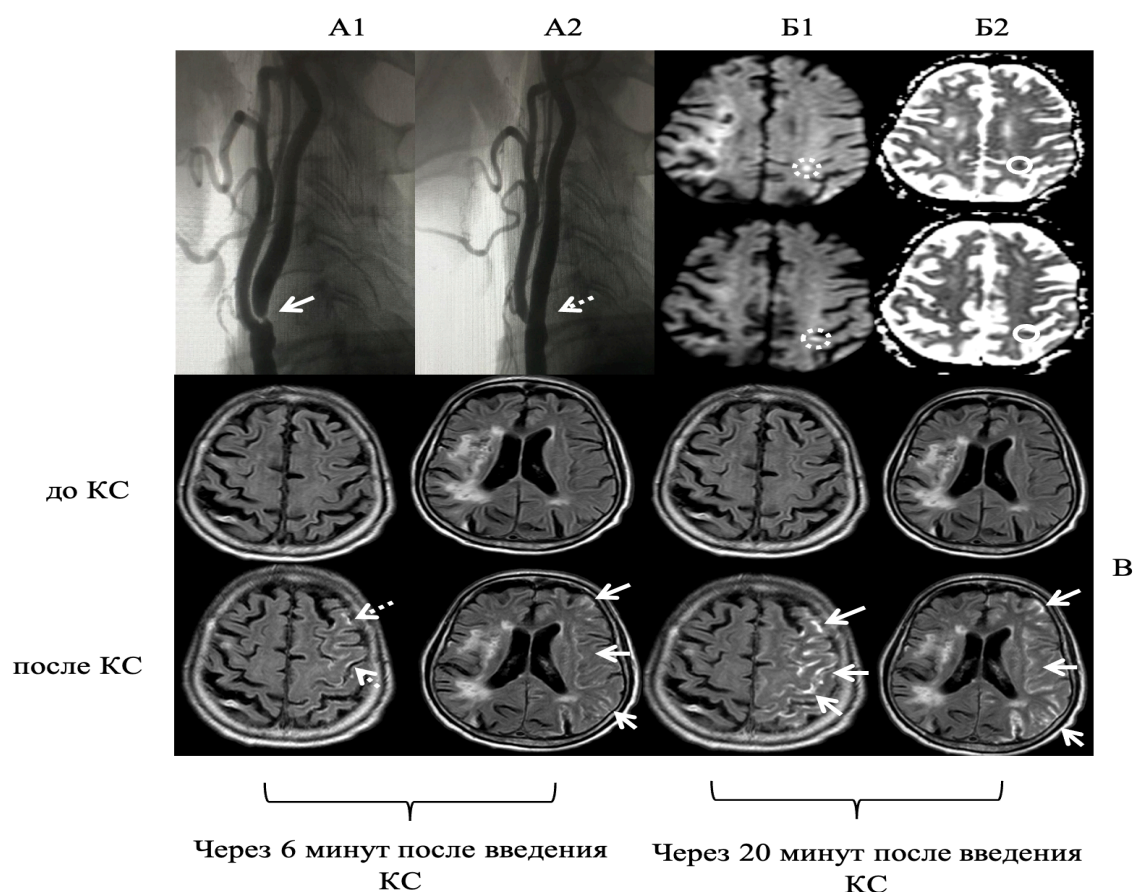


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Ангиография и МРТ головного мозга с контрастным усилением после стентирования левой внутренней сонной артерии. Пациент К., 75 лет.

A1 – Ангиография до операции; обращает на себя внимание наличие субтотального стеноза левой ВСА в области ее устья (сплошная стрелка).

A2 – Восстановление кровотока после установки стента (пунктирная стрелка).

Б – МРТ головного мозга, аксиальная плоскость, в области центральных извилин левого полушария большого мозга, выявляются единичные очаги повышенной интенсивности МР-сигнала в режиме DWI (Б1, белый пунктирный круг) со снижением показателей на карте измеряемого коэффициента диффузии – apparent diffusion coefficient (ADC) (Б2, белый круг) – очаги острой ишемии.

В – МРТ, режим T2 FLAIR; в левом полушарии большого мозга через 6 минут после введения контрастного средства отмечается контрастное усиление по двум типам: гиральному (белые пунктирные стрелки), а также лептоменингеальному (белые сплошные стрелки), через 20 мин – отмечается усиление выраженности.

Fig. 1. Angiography and MRI of the brain with contrast enhancement after stenting of the left internal carotid artery. Patient K., 75 years old.

A1 – Preoperative angiography shows subtotal stenosis of the left ICA in the region of its orifice (solid arrow).

A2 – Restoration of blood flow after stent placement (dotted arrow).

B – MRI of the brain, axial plane, revealed single foci of increased MR-signal intensity in DWI mode (B1, white dotted circle) with decreased values on the ADC (B2, white circle) – foci of acute ischemia in the area of the central gyrus of the left cerebral hemisphere.

C – MRI, T2 FLAIR; in the left cerebral hemisphere 6 minutes after contrast agent injection contrast enhancement of two types is noted: gyral (white dotted arrows), as well as leptomeningeal (white solid arrows), 20 minutes later – increased severity of leptomeningeal type of contrast enhancement is noted (white solid arrows).

ентов 6/38 может быть объяснено низкой концентрацией гадолинийсодержащего контрастного средства (ГСКС) в связи с высокой чувствительностью режима T2 FLAIR к минимальным изменениям состава цереброспинальной жидкости, что сопоставимо с данными, полученными Lee et al. (2016) [28].

Механизм лептоменингеального контрастного усиления после каротидной ангиопластики со стентированием сонной артерии изучен не окончательно. Некоторые авторы склоняются к тому, что нарушение гематоэнцефалического барьера связано с резкими гемодинамическими изменениями после оперативного вмешательства (Cho et al. 2014), другие (Suthiphosuwat et al. 2018) рассматривают данный феномен как токсическое действие рентгеноконтрастного препарата, использующегося при проведении ангиографического исследования [31–33]. В нашем исследовании у 6 из 7 пациентов при проведении МРТ головного мозга с контрастным усилением в связи с развитием неврологической симптоматики в режиме T2 FLAIR было выявлено накопление КС по гиральному и лептоменингеальному типам. В большинстве случаев накопление наблюдалось ипсилатерально относительно оперативного вмешательства. Подобные результаты были получены в исследовании Cho et al. (2014) [31]. В исследованиях Cho et al. (2014), Lee et al. (2016) лептоменингеальное контрастное усиление в режиме T2 FLAIR было рассмотрено как маркер острой реперфузии – hyperintense acute reperfusion marker (HARM) у 8 из 45 пациентов (17,8%) после операции реваскуляризации. У 4 из 8 пациентов HARM был ассоциирован с неврологическим ухудшением после операции. HARM может протекать бессимптомно, что было показано в исследовании Cho et al. (2014). По результатам нашего исследования у пациентов без неврологической симптоматики после операции не было выявлено накопление контрастного средства в режиме T2 FLAIR, вероятнее всего, это связано с малой выборкой [28, 32]. Также в исследовании Cho et al. (2014) симптоматический маркер острой реперфузии связывали с более высоким уровнем систолического артериального давления (САД) после операции ($p=0,025$), однако в нашем исследовании подобной корреляции выявлено не было [32].

По данным Huibers et al. (2018) и Ogasawara et al. (2007) среднее время от процедуры стентирования до развития синдрома гиперперфузии (СЦГ) составило 12 часов. После каротидной эндартерэктомии пик заболеваемости приходится на пятый и

восьмой послеоперационный дни. В тоже время развитие синдрома гиперперфузии после каротидной ангиопластики со стентированием может быть отсроченным и проявиться в течение месяца после оперативного вмешательства [34, 35, 39]. Описанные результаты сопоставимы с полученными нами данными: в нашей когорте пациентов медиана времени возникновения неврологической симптоматики после процедуры стентирования сонной артерии составила 5,0 [1,0; 6,0] часов.

В исследовании Guimaraens et al. (2010) после проведения ангиографической процедуры с применением 300 мл йодсодержащего контрастного средства йопромид (370 мг йода/мл) у пациента развились психомоторное возбуждение, дезориентация и гемипарез. При проведении нативной КТ головного мозга ипсилатерально оперативному вмешательству была выявлена гиперденсивность в субарахноидальном пространстве, что было расценено как экстравазация контрастного средства при нарушении целостности гематоэнцефалического барьера. Подобные результаты были получены в исследовании Velden et al. (2003) [26, 36]. Наше исследование имеет ограничения для подтверждения данной теории, ввиду отсутствия данных КТ-диагностики пациентов после стентирования.

У 1 из 6 пациентов в нашей выборке наряду с наличием лептоменингеального контрастного усиления в режиме T2 FLAIR, снижением уровня сознания до оглушения были выявлены повышение температуры, а также изменения в ликворе, а именно: цитоз 1856/3 (нейтрофилы 98%, макрофаги 2%), белок 1,850 г/л. В анализе крови – лейкоцитоз до $12,2 \times 10^9/\text{л}$. По совокупности выявленных данных пациенту был поставлен диагноз: «Асептический менингит, ассоциированный с развитием синдрома реперфузии». Полученные нами данные сопоставимы с подобным единичным клиническим наблюдением в исследовании Budhram et al. (2017) [37].

У 1 пациента из 7 не наблюдалось контрастное усиление в режиме T2 FLAIR после эндоваскулярного оперативного вмешательства, что, вероятнее всего, связано с разрешением неврологической симптоматики до выполнения МРТ-исследования головного мозга, которое было исполнено через 51 час после оперативного вмешательства.

Заключение.

Патогенез лептоменингеального контрастного усиления после ангиореконструктивных операций является мультифактори-

альным: вклад в его развитие вносят нарушение гемодинамики после оперативного вмешательства, использование рентгеноконтрастных средств при проведении ангиографии, которые, в свою очередь, могут выступать в качестве одного из пусковых механизмов в развитии нарушения проницаемости гематоэнцефалического барьера. Факторы, которые могут влиять на развитие симптоматики и появление лептоменингеального типа контрастного усиления у пациентов после стентирования внутренней сонной артерии требуют дальнейшего изучения. Исходя

из полученных нами данных, целесообразным является проведение МРТ головного мозга с контрастным усилением в режиме T2 FLAIR всем пациентам с развитием неврологической симптоматики после каротидной ангиопластики со стентированием.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Zeiler S.R., Hubbard R., Gibson E.M., Zheng T., Ng K.L., O'Brien T.E., et al. Paradoxical motor recovery from a first stroke after induction of a second stroke: reopening a postischemic sensitive period. *Neurorehabil Neural Repair*. 2016;30(8):794-800. doi:10.1177/1545968315624783.
2. Новицкий В.В., Гольдберг ЕД, Уразова ОИ, ред. Патопфизиология: учебник: в 2 т. 4-е изд., перераб. и доп. Т. 2. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2009. 640 с.
3. Чернявский МА, Иртюга ОБ, Янишевский СН, Алиева АС, Самочерных КА, Абрамов КБ, и др. Российский консенсус по диагностике и лечению пациентов со стенозом сонных артерий. *Российский Кардиологический Журнал*. 2022;27(11):5284. doi:10.15829/1560-4071-2022-5284. EDN DUSVKS
4. Naylor R, Rantner B, Ancetti S, de Borst GJ, De Carlo M, Halliday A, et al. Editor's Choice - European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2023 Clinical Practice Guidelines on the Management of Atherosclerotic Carotid and Vertebral Artery Disease. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2023 Jan;65(1):7-111. doi: 10.1016/j.ejvs.2022.04.011.
5. Полищук Р.В., Пирадов М.А., Рябинкина Ю.В., Щипакин В.А., Коцеев А.Ю., Проказова П.Р. Синдром каротидного синуса при ангиопластике со стентированием внутренних сонных артерий. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2021; 15(3): 15-5.
6. Altinbas A, van Zandvoort M, de Borst GJ, Algra A, van der Worp HB, Kappelle LJ, et al. Periprocedural hemodynamic depression is associated with a higher number of new ischemic brain lesions after stenting in the International Carotid Stenting Study-MRI Substudy. *Stroke*. 2014;45(1):146-151. doi:10.1161/STROKEAHA.113.003071.
7. Медведев Р. Б. и др. Структурные особенности атеросклеротических бляшек каротидного синуса и их предполагаемая роль в возникновении ишемических изменений головного мозга после каротидной эндартерэктомии. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2016; 22 (Приложение): 233-233.
8. Karpenko A., Starodubtsev V., Ignatenko P., Dixon F., Bugurov S., Bochkov I., et al. Comparative analysis of carotid artery stenting and carotid endarterectomy in clinical practice. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2020;29(5):104751. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.104751.
9. Babalova L., Ruzinak R., Ballova J., Sivak S., Kantorova E., Kurca E., et al. Contrast-induced encephalopathy. *Bratislav Lek Listy*. 2021; 122:618-620. doi: 10.4149/BLL_2021_098.
10. Okamura A., Nakaoka M., Ohbayashi N., Yahara K., Nabika S. Intraoperative idiopathic subarachnoid hemorrhage during carotid artery stenting: A case report and literature review. *Interv Neuroradiol*. 2015 Oct;21(5):592-7. doi: 10.1177/1591019915594332. Epub 2015 Jul 16. PMID: 26184053; PMCID: PMC4757341
11. Танамян М.М., Медведев Р.Б., Гемджян Э.Г., Скрылев С.И., Кротенкова М.В., Щипакин В.А., и др. Предикторы острых церебральных эмболических повреждений при стентировании сонной артерии. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2019; 25 (4): 83-90.
12. Ramalho J., Semelka R.C., Ramalho M., Nunes R.H., AlOubaidy M., Castillo M. Gadolinium-Based Contrast Agent Accumulation and Toxicity: An Update. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2016; 37:1192-1198. doi: 10.3174/ajnr. A4615.
13. Davis P.W., Krisanapan P., Tangpanithandee S., Thongprayoon C., Miao J., Hassanein M., et al. Contrast-Induced Encephalopathy in Patients with Chronic Kidney Disease and End-Stage Kidney Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicines (Basel)*. 2023;10(8):46. doi: 10.3390/medicines10080046. PMID: 37623810; PMCID: PMC10456913
14. Monforte M., Marca G.D., Lozupone E. Contrast-induced Encephalopathy. *Neurol. India*. 2020; 68:718-719. doi: 10.4103/0028-3886.288986
15. Zhang G., Wang H., Zhao L., Li T., Sun M., Zhang Y., et al. Contrast-Induced Encephalopathy Resulting from use of ioversol and iopromide. *Clin. Neuropharmacol*. 2020; 43:15-19. doi: 10.1097/WNF.0000000000000374.
16. Крайник В. М., Козлов С. П. Острые реперфузионные повреждения центральной нервной системы при операциях на внутренних сонных артериях. *Вестник анестезиологии и реаниматологии*. 2011; 8 (2): 49-57.
17. Hayashi K., Horie N., Suyama K., Nagata, I. Incidence and clinical features of symptomatic cerebral hyperperfusion syndrome after vascular reconstruction. *World neurosurgery*. 2012; 78 (5): 447-454.
18. Sundt T.M., Sandok B.A., Whisnant J.P. Carotid endarterectomy. Complications and preoperative assessment

of risk. *Mayo Clin Proc.* 1975; 50: 301-306.

19. Кошкин А.В., Нелимовский А.М., Данилов В.И. Синдром церебральной гиперперфузии у пациентов со стенозирующими и окклюзирующими поражениями внутренних сонных артерий после хирургического лечения. обзор литературы. *Неврологический вестник.* 2018; L (4): 44-51. doi: 10.17816/nb14144 (<https://doi.org/10.17816/nb14144>)

20. Adhiyaman V., Alexander S Cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy. *QJM.* 2007; 100 (4): 239-244.

21. Bouri S., Thapar A., Shalhoub J. et al. Hypertension and the post-carotid endarterectomy cerebral hyperperfusion syndrome. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery.* 2011; 41 (2): 229-237.

22. Nicosia A., Nikas D., Reinmers B. Manifestation, management and prevention of periprocedural complications of carotid artery stenting. *Journal of medical Research and Science.* 2011; 1 (2): 12-28.

23. Donepudi B, Trotter S. A Seizure and Hemiplegia following Contrast Exposure: Understanding Contrast-Induced Encephalopathy. *Case Rep Med.* 2018; 2018:9278526. doi: 10.1155/2018/9278526. PMID: 29686712; PMCID: PMC5857315.

24. Nanba T., Ogasawara K., Nishimoto H. et al. Postoperative cerebral white matter damage associated with cerebral hyperperfusion and cognitive impairment after carotid endarterectomy: a diffusion tensor magnetic resonance imaging study. *Cerebrovascular Diseases.* 2012; 34 (5-6): 358-367.

25. Naylor A.R., Ruckley C.V. The postcarotid endarterectomy hyperperfusion syndrome. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery.* 1995; 9 (4): 365-367.

26. Dangas G, Monsein LH, Laureno R, Peterson MA, Laird JR Jr, Satler LF, et al. Transient contrast encephalopathy after carotid artery stenting. *J Endovasc Ther.* 2001;8(2):111-3. doi: 10.1177/152660280100800202. PMID: 11357968.

27. Velden J, Milz P, Winkler F, Seelos K, Hamann GF. Nonionic contrast neurotoxicity after coronary angiography mimicking subarachnoid hemorrhage. *Eur Neurol.* 2003;49(4):249-51. doi: 10.1159/000070198. PMID: 12736546.

28. Przewlocki T, Pieniazek P, Kablak-Ziembicka A, Motyl R, Moczulski Z, Tracz W. Subarachnoid hemorrhage after carotid artery stenting. *J Vasc Surg.* 2007;45(5):1072-5. doi: 10.1016/j.jvs.2007.01.041. PMID: 17466804.

29. Lee EK, Lee EJ, Kim S, Lee YS. Importance of Contrast-Enhanced Fluid-Attenuated Inversion Recovery Magnetic Resonance Imaging in Various Intracranial Pathologic Conditions. *Korean J Radiol.* 2016;17(1):127-41. doi: 10.3348/kjr.2016.17.1.127. Epub 2016 Jan 6. PMID: 26798225; PMCID: PMC4720800

30. Essig M, Knopp MV, Schoenberg SO, Hawighorst H,

Wenz F, Debus J, et al. Cerebral gliomas and metastases: assessment with contrast-enhanced fast fluid-attenuated inversion-recovery MR imaging. *Radiology.* 1999; 210:551-557.

31. Tsuchiya K, Katase S, Yoshino A, Hachiya J. FLAIR MR imaging for diagnosing intracranial meningeal carcinomatosis. *AJR Am J Roentgenol.* 2001; 176:1585-1588.

32. Cho HJ, Kim YJ, Lee JH, Choi JW, Moon WJ, Roh HG et al. Post-carotid stenting reperfusion injury with blood-brain barrier disruption on gadolinium-enhanced FLAIR MRI. *BMC Neurol.* 2014; 14:178. doi: 10.1186/s12883-014-0178-z. PMID: 25204402; PMCID: PMC4174251

33. Cho AH, Cho YP, Lee DH, Kwon TW, Kwon SU, Suh DC, et al. Reperfusion injury on magnetic resonance imaging after carotid revascularization. *Stroke.* 2014;45(2):602-4. doi: 10.1161/STROKEAHA.113.003792. Epub 2013 Dec 17. PMID: 24347424

34. Suthiphosuwat S, Hsu CC, Bharatha A. HARMless: Transient Cortical and Sulcal Hyperintensity on Gadolinium-Enhanced FLAIR after Elective Endovascular Coiling of Intracranial Aneurysms. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2018;39(4):720-726. doi: 10.3174/ajnr.A5561. Epub 2018 Feb 22. PMID: 29472303; PMCID: PMC7410778.

35. Huibers AE, Westerink J, de Vries EE, Hoskam A, den Ruijter HM, Moll FL, de Borst GJ. Editor's Choice – Cerebral Hyperperfusion Syndrome After Carotid Artery Stenting: A Systematic Review and Meta-analysis. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2018;56(3):322-333. doi: 10.1016/j.ejvs.2018.05.012. Epub 2018 Jun 29. PMID: 30196814

36. Ogasawara K, Sakai N, Kuroiwa T, Hosoda K, Iihara K, Toyoda K, Sakai C, Nagata I, Ogawa A; Japanese Society for Treatment at Neck in Cerebrovascular Disease Study Group. Intracranial hemorrhage associated with cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy and carotid artery stenting: retrospective review of 4494 patients. *J Neurosurg.* 2007;107(6):1130-6. doi: 10.3171/JNS-07/12/1130. PMID: 18077950

37. Guimaraens, L., Vivas, E., Fonnegra, A. et al. Transient Encephalopathy from Angiographic Contrast: A Rare Complication in Neurointerventional Procedures. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2010; 33: 383-388. <https://doi.org/10.1007/s00270-009-9609-4>

38. Budhram A., S.A. Climans., C. Le, C.S. Casserly, M. Mayich, S.P. Lownie, L.A. Sposato Aseptic meningitis due to reperfusion injury after carotid artery stenting. *J. Neurol. Sci.* 2017; 381: 269-271.

39. Карабанов И.С., Попов В.В., Богомякова О.Б., Станкевич Ю.А., Тулупов А.А. Изучение структурной реорганизации головного мозга в раннем постинсультном периоде методами на основе диффузионной МРТ. *REJR.* 2023; 13(3):14-29. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-14-29.

References:

1. Zeiler S.R., Hubbard R., Gibson E.M., Zheng T., Ng K.L., O'Brien T.E., et al. Paradoxical motor recovery from a first stroke after induction of a second stroke: reopening a postischemic sensitive period. *Neurorehabil Neural Repair.* 2016;30(8):794-800. doi:10.1177/1545968315624783.

2. Novitsky V.V., Goldberg E.D., Urazova O.I. (eds.). *Pathophysiology: Textbook: in 2 vols. 4th ed., revised and enlarged. Vol. 2.* Moscow: GEOTAR-Media; 2009. 640 p. (in Russian).

3. Chernyavsky M.A., Irtyuga O.B., Yanishevsky S.N., Alieva

- A.S., Samochernykh K.A., Abramov K.B., et al. Russian consensus statement on the diagnosis and treatment of patients with carotid stenosis. *Russian Journal of Cardiology*. 2022;27(11):5284. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2022-5284> (in Russian).
4. Naylor R, Rantner B, Ancetti S, de Borst GJ, De Carlo M, Halliday A, et al. Editor's Choice – European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2023 Clinical Practice Guidelines on the Management of Atherosclerotic Carotid and Vertebral Artery Disease. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2023;65(1):7-111. doi: 10.1016/j.ejvs.2022.04.011.
5. Polishchuk R.V., Piradov M.A., Ryabinkina Y.V., Shchipakin V.L., Koshcheev A.Yu., Prokazova P.R. Carotid sinus syndrome in carotid angioplasty with stenting]. *Annals of clinical and experimental neurology*. 2021; 15(3): 15-25. DOI: <https://doi.org/10.54101/ACEN.2021.3.2> (in Russian).
6. Altinbas A, van Zandvoort M, de Borst GJ, Algra A, van der Worp HB, Kappelle LJ, et al. Periprocedural hemodynamic depression is associated with a higher number of new ischemic brain lesions after stenting in the International Carotid Stenting Study-MRI Substudy. *Stroke*. 2014;45(1):146-151. doi:10.1161/STROKEAHA.113.003071.
7. Medvedev R.B., et al. Structural features of atherosclerotic plaques of the carotid sinus and their presumed role in the development of ischemic brain changes after carotid endarterectomy. *Angiology and Vascular Surgery*. 2016; 22 (Suppl.): 233 (in Russian).
8. Karpenko A., Starodubtsev V., Ignatenko P., Dixon F., Bugurov S., Bochkov I., et al. Comparative analysis of carotid artery stenting and carotid endarterectomy in clinical practice. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2020;29(5):104751. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.104751.
9. Babalova L., Ruzinak R., Ballova J., Sivak S., Kantorova E., Kurca E., et al. Contrast-induced encephalopathy. *Bratisl Lek Listy*. 2021; 122:618-620. doi:10.4149/BLL_2021_098.
10. Okamura A., Nakaoka M., Ohbayashi N., Yahara K., Nabika S. Intraoperative idiopathic subarachnoid hemorrhage during carotid artery stenting: A case report and literature review. *Interv Neuroradiol*. 2015;21(5):592-7. doi: 10.1177/1591019915594332. Epub 2015 Jul 16. PMID: 26184053; PMCID: PMC4757341
11. Tanashyan M.M., Medvedev R.B., Gemdzhian E.G., Skrylev S.I., Krotchenkova M.V., Shchipakin V.L., Koshcheev A.Yu., Sinitsyn I.A. Predictors of acute cerebral embolic lesions during carotid artery stenting. *Angiology and vascular surgery*. 2019; 25(4): 83-90. doi: 10.33529/ANGIO2019410 (in Russian).
12. Ramalho J., Semelka R.C., Ramalho M., Nunes R.H., AlObaidy M., Castillo M. Gadolinium-Based Contrast Agent Accumulation and Toxicity: An Update. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2016; 37:1192-1198. doi: 10.3174/ajnr. A4615.
13. Davis P.W., Krisanapan P., Tangpanithandee S., Thongprayoon C., Miao J., Hassanein M., et al. Contrast-Induced Encephalopathy in Patients with Chronic Kidney Disease and End-Stage Kidney Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicines (Basel)*. 2023;10(8):46. doi: 10.3390/medicines10080046. PMID: 37623810; PMCID: PMC10456913
14. Monforte M., Marca G.D., Lozupone E. Contrast-induced Encephalopathy. *Neurol. India*. 2020; 68:718-719. doi: 10.4103/0028-3886.288986
15. Zhang G., Wang H., Zhao L., Li T., Sun M., Zhang Y., et al. Contrast-Induced Encephalopathy Resulting from use of ioversol and iopromide. *Clin. Neuropharmacol*. 2020; 43:15-19. doi: 10.1097/WNF.0000000000000374.
16. Krainik V. M., Kozlov S. P. Acute reperfusion lesions of the central nervous system during operations on the internal carotid arteries. *Bulletin of Anesthesiology and Resuscitation*. 2011; 8(2): 49-57 (in Russian).
17. Hayashi K., Horie N., Suyama K., Nagata, I. Incidence and clinical features of symptomatic cerebral hyperperfusion syndrome after vascular reconstruction. *World neurosurgery*. 2012; 78 (5): 447-454.
18. Sundt T.M., Sandok B.A., Whisnant J.P. Carotid endarterectomy. Complications and preoperative assessment of risk. *Mayo Clin Proc*. 1975; 50: 301-306.
19. Kokshin A.V., Nemirovsky A.M., Danilov V.I. Cerebral hyperperfusion syndrome in patients with stenotic and occlusive lesion internal carotid arteries after surgery. literature review. *Neurological Bulletin*. 2018; 4: 44-51. doi: 10.17816/nb14144 (<https://doi.org/10.17816/nb14144>) (in Russian).
20. Adhiyaman V., Alexander S Cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy. *QJM*. 2007; 100 (4): 239-244.
21. Bouri S., Thapar A., Shalhoub J. et al. Hypertension and the post-carotid endarterectomy cerebral hyperperfusion syndrome. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*. 2011; 41 (2): 229-237.
22. Nicosia A., Nikas D., Reinmers B. Manifestation, management and prevention of periprocedural complications of carotid artery stenting. *Journal of medical Research and Science*. 2011; 1 (2): 12-28.
23. Donepudi B, Trottier S. A Seizure and Hemiplegia following Contrast Exposure: Understanding Contrast-Induced Encephalopathy. *Case Rep Med*. 2018; 2018:9278526. doi: 10.1155/2018/9278526. PMID: 29686712; PMCID: PMC5857315.
24. Nanba T., Ogasawara K., Nishimoto H. et al. Postoperative cerebral white matter damage associated with cerebral hyperperfusion and cognitive impairment after carotid endarterectomy: a diffusion tensor magnetic resonance imaging study. *Cerebrovascular Diseases*. 2012; 34 (5-6): 358-367.
25. Naylor A.R., Ruckley C.V. The postcarotid endarterectomy hyperperfusion syndrome. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*. 1995; 9 (4): 365-367.
26. Dargas G, Monsein LH, Lauren R, Peterson MA, Laird JR Jr, Satler LF, et al. Transient contrast encephalopathy after carotid artery stenting. *J Endovasc Ther*. 2001;8(2):111-3. doi: 10.1177/152660280100800202. PMID: 11357968.
27. Velden J, Milz P, Winkler F, Seelos K, Hamann GF. Nonionic contrast neurotoxicity after coronary angiography mimicking subarachnoid hemorrhage. *Eur Neurol*. 2003;49(4):249-51. doi: 10.1159/000070198. PMID: 12736546.
28. Przewlocki T, Pieniazek P, Kablak-Ziembicka A, Motyl R, Moczulski Z, Tracz W. Subarachnoid hemorrhage after carotid artery stenting. *J Vasc Surg*. 2007;45(5):1072-5. doi: 10.1016/j.jvs.2007.01.041. PMID: 17466804.

29. Lee EK, Lee EJ, Kim S, Lee YS. Importance of Contrast-Enhanced Fluid-Attenuated Inversion Recovery Magnetic Resonance Imaging in Various Intracranial Pathologic Conditions. *Korean J Radiol.* 2016;17(1):127-41. doi: 10.3348/kjr.2016.17.1.127. Epub 2016 Jan 6. PMID: 26798225; PMCID: PMC4720800
30. Essig M, Knopp MV, Schoenberg SO, Hawighorst H, Wenz F, Debus J, et al. Cerebral gliomas and metastases: assessment with contrast-enhanced fast fluid-attenuated inversion-recovery MR imaging. *Radiology.* 1999; 210:551-557.
31. Tsuchiya K, Katase S, Yoshino A, Hachiya J. FLAIR MR imaging for diagnosing intracranial meningeal carcinomatosis. *AJR Am J Roentgenol.* 2001; 176:1585-1588.
32. Cho HJ, Kim YJ, Lee JH, Choi JW, Moon WJ, Roh HG et al. Post-carotid stenting reperfusion injury with blood-brain barrier disruption on gadolinium-enhanced FLAIR MRI. *BMC Neurol.* 2014; 14:178. doi: 10.1186/s12883-014-0178-z. PMID: 25204402; PMCID: PMC4174251
33. Cho AH, Cho YP, Lee DH, Kwon TW, Kwon SU, Suh DC, et al. Reperfusion injury on magnetic resonance imaging after carotid revascularization. *Stroke.* 2014;45(2):602-4. doi: 10.1161/STROKEAHA.113.003792. Epub 2013 Dec 17. PMID: 24347424
34. Suthiphosuwon S, Hsu CC, Bharatha A. HARMless: Transient Cortical and Sulcal Hyperintensity on Gadolinium-Enhanced FLAIR after Elective Endovascular Coiling of Intracranial Aneurysms. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2018;39(4):720-726. doi: 10.3174/ajnr. A5561. Epub 2018 Feb 22. PMID: 29472303; PMCID: PMC7410778.
35. Huibers AE, Westerink J, de Vries EE, Hoskam A, den Ruijter HM, Moll FL, de Borst GJ. Editor's Choice – Cerebral Hyperperfusion Syndrome After Carotid Artery Stenting: A Systematic Review and Meta-analysis. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2018;56(3):322-333. doi: 10.1016/j.ejvs.2018.05.012. Epub 2018 Jun 29. PMID: 30196814
36. Ogasawara K, Sakai N, Kuroiwa T, Hosoda K, Iihara K, Toyoda K, Sakai C, Nagata I, Ogawa A; Japanese Society for Treatment at Neck in Cerebrovascular Disease Study Group. Intracranial hemorrhage associated with cerebral hyperperfusion syndrome following carotid endarterectomy and carotid artery stenting: retrospective review of 4494 patients. *J Neurosurg.* 2007;107(6):1130-6. doi: 10.3171/JNS-07/12/1130. PMID: 18077950
37. Guimaraens, L., Vivas, E., Fonnegra, A. et al. Transient Encephalopathy from Angiographic Contrast: A Rare Complication in Neurointerventional Procedures. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 2010; 33: 383-388. <https://doi.org/10.1007/s00270-009-9609-4>
38. Budhram A., S.A. Climans., C. Le, C.S. Casserly, M. Mayich, S.P. Lownie, L.A. Sposato Aseptic meningitis due to reperfusion injury after carotid artery stenting. *J. Neurol. Sci.* 2017; 381: 269-271.
39. Karabanov I.S., Popov V.V., Bogomyakova O.B., Stankevich Y.A., Tulupov A.A. Study of the structural reorganization of the brain in the early post-stroke period using methods based on diffusion MRI. *REJR.* 2023; 13(3):14-29. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-14-29 (in Russian).

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО И МАНУАЛЬНОГО АНАЛИЗА КТ В ПЛАНИРОВАНИИ ТРАНСКАТЕТЕРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА У ПАЦИЕНТОВ С КРИТИЧЕСКИМ АОРТАЛЬНЫМ СТЕНОЗОМ И СЛОЖНОЙ АНАТОМИЕЙ КОРНЯ АОРТЫ

Гафси Б.Э.¹, Федотенков И.С.², Ширкин А.В.², Имаев Т.Э.²

1 – ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет). г. Москва, Россия.

2 – ФГБУ НМИЦ кардиологии им. академика Е.И. Чазова МЗ РФ. г. Москва, Россия.

Цель исследования. Оценка сравнительного анализа ручного и полуавтоматического методов анализа КТ и влияния данных методов на принятие клинического решения о выборе типа и размера протеза для транскатетерной имплантации аортального клапана.

Материалы и методы. Было исследовано 168 пациентов с тяжелым аортальным стенозом, которые в период с октября 2022 года по октябрь 2023 года были госпитализированы в ФГБУ НМИЦ им. ак. Е.И. Чазова МЗ РФ для дальнейшего проведения транскатетерной имплантации аортального клапана. Всем пациентам была выполнена эхокардиография и КТ-аортография, по данным которой принималось решение о тактике хирургического лечения. По результатам предоперационной КТ-аортографии у 30 пациентов была выявлена сложная анатомия корня аорты, что потребовало более глубокого и индивидуального подхода в интерпретации полученных данных врачами-рентгенологами и сердечно-сосудистыми хирургами.

В рамках предоперационной подготовки перед транскатетерной имплантацией аортального клапана по данным КТ были оценены такие параметры, как периметр, площадь, диаметры фиброзного кольца, синусов Вальсальвы, выводного тракта левого желудочка с помощью ручного измерения и с использованием полуавтоматического программного обеспечения (Vitrea, Canon).

Результаты. При оценке ручного и полуавтоматического методов анализа КТ отмечалась минимальная разница (1.5-3.4% для ключевых параметров фиброзного кольца) в результатах измерений. Время, необходимое на анализ КТ, сокращается при использовании полуавтоматического метода оценки параметров корня аорты.

Обсуждение. В работе были выявлены статистически значимые, но клинически незначительные расхождения (1.5-3.4%) по большинству параметров при оценке КТ ручным или полуавтоматическим методом, при этом время анализа изображений сократилось при использовании полуавтоматического анализа. На основании комплексной оценки был подобран самораскрывающийся протез, имплантация которого прошла успешно, без парапротезной регургитации и нарушений проводимости.

Полученные данные демонстрируют высокую корреляцию между методами анализа корня аорты. Занижение размеров при полуавтоматическом анализе может быть связано с более точным выделением границ структур, исключая артефакты частичного объема от кальция. Это подтверждает возможность интеграции полуавтоматических инструментов в клиническую практику для повышения эффективности работы, особенно при массовых обследованиях. Однако окончательное решение о размере протеза требует экспертной оценки радиолога и кардиохирурга, учитывающей все анатомические нюансы.

Заключение. Полуавтоматический анализ КТ корня аорты у пациентов перед транскатетерной имплантацией аортального клапана является точным, воспроизводимым методом, занимающим относительно меньшее время по сравнению с ручными измерениями. Полуавтоматический метод может служить надежным инструментом для скрининга и первичного предоперационного планирования, в том числе у пациентов со сложной анатомией корня аорты и выраженным кальцинозом аортального клапана.

Ключевые слова: транскатетерная имплантация аортального клапана, ТИАК, компьютерная томография, предоперационное планирование, аортальный стеноз, полуавтоматический

Контактный автор: Гафси Б.Э., e-mail: gafsibehaeddine@gmail.com

Для цитирования: Гафси Б.Э., Федотенков И.С., Ширкин А.В., Имаев Т.Э. Сравнительная эффективность полуавтоматического и мануального анализа КТ в планировании транскатетерной имплантации аортального клапана у пациентов с критическим аортальным стенозом и сложной анатомией корня аорты. REJR 2026; 16(1):34-41. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-34-41.

Статья получена: 26.03.26

Статья принята: 14.04.26

COMPARATIVE EFFECTIVENESS OF SEMIAUTOMATED AND MANUAL CT ANALYSIS IN PLANNING OF TRANSCATHETER AORTIC VALVE IMPLANTATION IN PATIENTS WITH CRITICAL AORTIC STENOSIS AND COMPLEX AORTIC ROOT ANATOMY

Gafsi B.E.¹, Fedotenkov I.S.², Shirkin A.V.², Imaev T.E.²

1 – Sechenov University.

2 – E.I. Chazov National Medical Research Center of Cardiology. Moscow, Russia.

Purpose. To evaluate the comparative analysis of manual and semi-automatic CT analysis methods and the impact of these methods on the clinical decision-making process regarding the choice of a prosthesis for transcatheter aortic valve implantation.

Materials and methods. A total of 168 patients with severe aortic stenosis were studied. They were hospitalized between October 2022 and October 2023 at the E.I. Chazov National Medical Research Center of Cardiology and Surgery for transcatheter aortic valve implantation. All patients underwent echocardiography and CT aortography, which were used to determine the surgical approach. Preoperative CT aortography revealed complex aortic root anatomy in 30 patients, requiring a more in-depth and individualized approach to data interpretation by radiologists and cardiovascular surgeons. As part of the preoperative preparation for transcatheter aortic valve implantation, parameters such as perimeter, area, diameters of the fibrous ring, sinuses of Valsalva, and left ventricular outflow tract were assessed using CT data using manual measurements and semi-automated software (Vitrea, Canon).

Preoperative work-up included echocardiography and ECG-gated CT angiography. Key annular dimensions (perimeter, area, diameters of the aortic valve annulus, sinuses of Valsalva, left ventricular outflow tract) were measured independently using traditional manual techniques and a semi-automatic software platform (Vitrea, Canon). Measurement times and values were compared.

Results. When evaluating manual and semiautomated CT analysis methods, minimal differences (1.5-3.4% for key annular parameters) in measurement results were observed. The time required for CT analysis was less, using the semiautomated method for assessing aortic root parameters.

Discussion. This study presents the comparative effectiveness of semiautomated and manual CT image analysis in planning transcatheter aortic valve implantation in a patient with critical aortic stenosis, severe valve calcification, and ellipsoidal annulus deformity.

Our study identified statistically significant but clinically insignificant discrepancies (1.5-3.4%) for most parameters when evaluating CT images using manual and semiautomated methods. Furthermore, image analysis time reduced, using semiautomated analysis. Based on this comprehensive assessment, a self-expanding graft was selected, and implantation was successful, without paraprosthetic regurgitation or conduction disturbances.

The obtained data demonstrate a high correlation between the aortic root analysis methods. A slight underestimation of the dimensions with semiautomated analysis may be due to more accurate delineation of the structural boundaries, eliminating partial volume artifacts from calcium. This confirms the feasibility of integrating semiautomated instruments into clinical practice to improve efficiency, especially during mass screenings. However, the final decision on the prosthesis size requires expert evaluation by a radiologist and cardiac surgeon, taking into account all anatomical nuances.

Conclusion. Semiautomated analysis of aortic root CT images in patients undergoing

transcatheter aortic valve implantation is an accurate, reproducible, and less time-consuming method compared to manual measurements. This semiautomated method can serve as a reliable tool for screening and initial preoperative planning, including in patients with complex aortic root anatomy and severe aortic valve calcification.

Keywords: transcatheter aortic valve implantation (TAVI), computed tomography, preoperative planning, aortic stenosis, semi-automatic analysis, aortic root.

Corresponding author: Gafsi B.E., e-mail: gafsibehaeddine@gmail.com

For citation: Gafsi B.E., Fedotenkov I.S., Shirkin A.V., Imaev T.E. Comparative effectiveness of semiautomated and manual CT analysis in planning of transcatheter aortic valve implantation in patients with critical aortic stenosis and complex aortic root anatomy. REJR 2026; 16(1):34-41. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-34-41.

Received: 26.03.26

Accepted: 14.04.26

Транскатетерная имплантация аортального клапана (ТИАК) является методом выбора для пациентов с тяжелым симптомным аортальным стенозом и высоким или промежуточным хирургическим риском [1, 2]. Успех процедуры и минимизация таких осложнений, как парапротезная регургитация, миграция клапана, блокада проводящих путей сердца или окклюзия коронарных артерий, в решающей степени зависят от точного предоперационного планирования [3, 4].

«Золотым стандартом» визуализации для планирования ТИАК является ЭКГ-синхронизированная КТ [5]. Она позволяет получить трехмерное представление о сложной анатомии корня аорты, точно измерить размеры фиброзного кольца (ФК), оценить степень и распределение кальциноза, расстояние до устьев коронарных артерий, а также состояние периферического сосудистого доступа [6, 7]. Традиционно эти измерения выполняются рентгенологом вручную на рабочих станциях с использованием мультипланарных и трехмерных реконструкций. Этот процесс требует значительного времени (15-25 минут на анализ КТ) и подвержен субъективной вариабельности, особенно при определении плоскости фиброзного кольца у пациентов с выраженной эллипсоидностью или двустворчатым клапаном [8].

В последние годы активно разрабатываются и внедряются полуавтоматические и автоматические программные решения для анализа КТ корня аорты [9, 10]. Их основные потенциальные преимущества – значительное сокращение времени обработки, высокая воспроизводимость результатов и стандартизация измерений. Однако ключевым вопросом для клиницистов остается клиническая сопоставимость этих измерений с проверен-

ными ручными методами, особенно в сложных случаях с массивным кальцинозом или атипичной анатомией, где ошибка измерения может привести к неправильному выбору размера протеза [11].

Цель исследования.

Оценка сравнительного анализа ручного и полуавтоматического методов анализа КТ и влияния данных методов на принятие клинического решения о выборе протеза для транскатетерной имплантации аортального клапана.

Материалы и методы.

Было исследовано 168 пациентов с тяжелым аортальным стенозом, которые в период с октября 2022 года по октябрь 2023 года были госпитализированы в ФГБУ НМИЦК им. ак. Е.И.Чазова МЗ РФ для дальнейшего проведения транскатетерной имплантации аортального клапана. Всем пациентам была выполнена эхокардиография и КТ-аортография, по данным которой принималось решение о тактике хирургического лечения. По данным предоперационной КТ-аортографии у 30 пациентов была выявлена сложная анатомия корня аорты, что требовало более глубокого и индивидуального подхода в интерпретации полученных данных врачами-рентгенологами и сердечно-сосудистыми хирургами.

Пример сложной анатомии корня аорты у пациента с тяжелым аортальным стенозом: пациент – мужчина, 78 лет. Основной диагноз: ИБС. Стенокардия напряжения III ФК. Критический кальцинированный аортальный стеноз. ХСН IIБ стадии, III ФК по NYHA. Гипертоническая болезнь III стадии. Сопутствующая патология: хроническая болезнь почек С3а стадии (СКФ 45 мл/мин/1.73м²), ожирение II степени (ИМТ 34 кг/м²), сахарный диабет 2 типа. Жалобы

при поступлении: прогрессирующая одышка при минимальной физической нагрузке (подъем на 1 этаж), приступы сжимающих загрудинных болей, возникающие при ходьбе в среднем темпе на 100-150 метров, общая слабость, головокружение.

Учитывая высокий хирургический риск (логистический EuroSCORE II — 8.5%), возраст и полиморбидность пациента, сердечно-сосудистая команда (кардиолог, кардиохирург, интервенционный кардиолог, рентгенолог) приняла решение о выполнении ТИАК.

При аускультации: грубый систолический шум с максимумом во втором межреберье справа, проводящийся на сосуды шеи. Артериальное давление 145/85 мм рт. ст., ЧСС 68 уд/мин.

Данные трансторакальной эхокардиографии (ЭхоКГ): выявлен тяжелый кальцинированный аортальный стеноз с показателями, соответствующими критическому пороку: пиковая скорость трансаортального потока (V_{max}) — 4.8 м/с, средний трансаортальный градиент (ΔP_{mean}) — 58 мм рт. ст., расчетная площадь отверстия аортального клапана (ПОАК) по уравнению непрерывности — 0.7 см², индекс площади — 0.35 см²/м². Фракция выброса левого желудочка сохранена — 60%. Выявлена концентрическая гипертрофия миокарда левого желудочка (ЛЖ).

Проведена КТ-аортография: исследование выполнено на 320-срезовом компьютерном томографе Aquilion ONE (Canon, Япония). Протокол исследования включал:

1. нативную фазу (для оценки кальциноза): проспективная ЭКГ-синхронизация, объем головки детектора 160 мм, от нижней границы дуги аорты до верхушки сердца; параметры: напряжение 120 кВ, автоматическая модуляция тока;

2. ангиографическую фазу с контрастным усилением: ретроспективная ЭКГ-синхронизация, спиральный режим. Введение 80 мл йодсодержащего контрастного вещества (Омнипак 350) со скоростью 5 мл/с с последующим болюсным введением физиологического раствора. Верхняя граница исследования от уровня брахиоцефальных артерий до общих бедренных артерий.

Реконструкции изображений выполнялись с толщиной среза 0,5 мм с интервалом 0,25 мм.

Ручной анализ выполнен рентгенологом на рабочей станции (Vitrea, Canon). Определялись и измерялись в систолическую фазу (30% R-R интервала) следующие параметры:

- плоскость фиброзного кольца аортального клапана (ФК АК): максимальный (D_{max}) и минимальный (D_{min}) диаметры, пе-

риметр (P), площадь (S), усредненный диаметр;

- плоскость синусов Вальсальвы: D_{max} , D_{min} , P, S;

- плоскость выносящего тракта левого желудочка (ВТАЖ): P, S;

- расстояние от ФК АК до устьев правой (ПКА) и левой (ЛКА) коронарных артерий;

- объем и локализация кальциноза аортального клапана (шкала Агатстона);

- оценка доступа: минимальные диаметры и степень кальциноза подвздошно-бедренных артерий;

- общее время, затраченное на все измерения и создание отчета.

Полуавтоматический анализ выполнен с помощью специализированного программного модуля для планирования ТИАК в системе Vitrea Advanced Visualization (Canon, Япония). Алгоритм работы включал:

- автоматическое выделение просвета аорты и построение ее центральной линии;

- интерактивное указание пользователем примерного уровня аортального клапана;

- автоматическое определение плоскости ФК АК, синусов Вальсальвы, синотубулярного соединения на основе алгоритмов распознавания границ и анатомических ориентиров;

- автоматический расчет всех вышеперечисленных диаметров, периметров и площадей;

- возможность ручной коррекции плоскостей измерения при необходимости (в данном случае не потребовалась);

- автоматический расчет объема кальция в заданной области интереса;

- фиксация времени автоматизированной обработки.

Результаты.

По данным КТ-аортографии: визуализирован трехстворчатый аортальный клапан с выраженным глыбчатым кальцинозом всех трех створок, преимущественно по комиссурам и свободным краям. Кальциевый индекс клапана составил 3850 единиц Агатстона (Agatston score), что соответствует категории тяжелого кальциноза у мужчин. Фиброзное кольцо имело выраженную эллипсоидную форму (индекс сферичности $D_{min}/D_{max} = 0.72$) (рис. 1).

Результаты параллельных измерений представлены в таблице №1.

Анализ сосудистого доступа: подвздошно-бедренные артерии не имели критических стенозов, минимальный диаметр правой общей бедренной артерии составил 7.5 мм, умеренный кальциноз сегмента. Трансфеморальный доступ признан приемлемым.

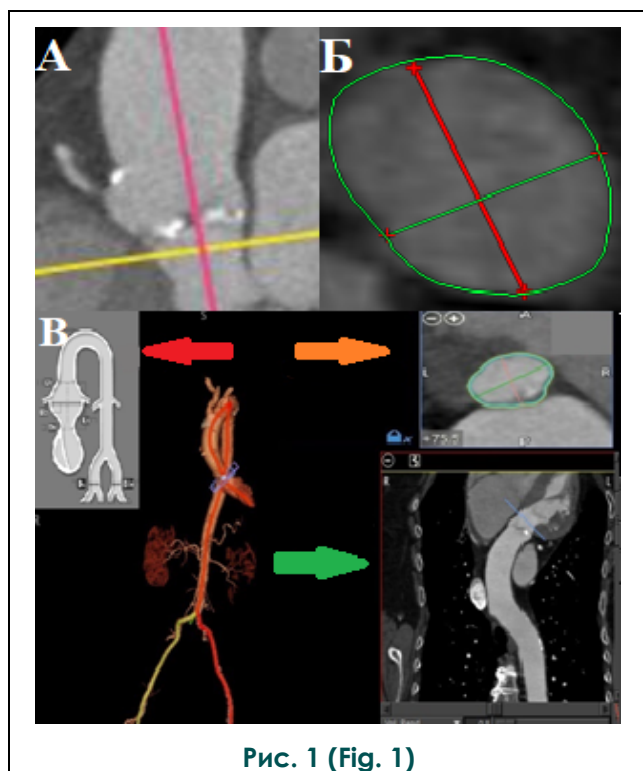


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. КТ-аортография, мультипланарная и 3D-реконструкция, систолическая фаза.

Пациент Н., мужчина, 78 лет. А – Мультипланарная реконструкция, определение плоскости фиброзного кольца (обозначена желтой линией) при мануальном измерении. Визуализируется выраженный узловатый кальциноз створок (черная стрелка). Б – Поперечное сечение на уровне ФК АК при мануальном анализе: измерение максимального (27.5 мм) и минимального (19.8 мм) диаметров, расчет площади (495 мм²). В – Автоматически построенное поперечное сечение на уровне ФК АК полуавтоматическим программным обеспечением Vitrea. Отмечается схожая эллипсоидная форма, автоматически рассчитанная площадь – 478 мм².

Fig. 1. CT aortography, multiplanar and 3D reconstruction, systolic phase.

Patient H., 78 years old, male. A – Multiplanar reconstruction for defining the plane of the fibrous annulus (demarcated by the yellow line) during manual measurement. Marked nodular calcification of the valve is visualized (arrows). B – Cross-sectional view at the level of the aortic valve annulus during manual analysis: measurement of the maximum (27.5 mm) and minimum (19.8 mm) diameters, calculation of the area (495 mm²). C – Cross-sectional view at the level of the aortic valve annulus, automatically generated by the semi-automatic Vitrea software. A similar ellipsoid shape is noted; the automatically calculated area is 478 mm².

Интерпретация и влияние на тактику лечения: несмотря на статистически значимые различия ($p < 0.05$ для периметра и площади ФК), абсолютные расхождения между методами были минимальны (1.5-3.4% для ключевых параметров ФК). Полуавтоматический метод дал систематически чуть меньшие значения, что, вероятно, связано с более точным алгоритмическим определением внутреннего контура, исключающим добавление прилежащего кальция в измерение.

На мультидисциплинарном консилиуме были рассмотрены оба набора данных. Учитывая выраженную эллипсоидность и тяжелый кальциноз аортального клапана, для минимизации риска парапротезной регургитации и обеспечения стабильной фиксации, предпочтение было отдано самораскрывающемуся протезу (Medtronic CoreValve Evolut PRO+). Окончательный размер (29 мм) был выбран на основе ручных измерений периметра (83.2 мм), так как именно этот параметр является решающим для выбора самораскрывающихся систем. Полуавтоматические данные (81.7 мм) указали бы на тот же размерный ряд протеза, подтвердив тем самым клиническую согласованность методов.

Ход вмешательства ТИАК: процедура выполнена под местной анестезией через правосторонний трансфеморальный доступ. Имплантация протеза прошла без осложнений. Контрольная интраоперационная чреспищеводная ЭхоКГ показала оптимальное положение протеза, его полное раскрытие и отсутствие парапротезной регургитации. Нарушений атриовентрикулярной проводимости не возникло.

Обсуждение.

Представленные данные наглядно иллюстрируют современные возможности и проблемы планирования ТИАК. Основной акцент сделан на сравнительном анализе двух методов получения ключевых метрических данных из КТ-изображений.

Наши результаты согласуются с данными последних исследований [9, 10, 12], которые также демонстрируют высокую корреляцию между ручными и автоматизированными измерениями при небольших систематических погрешностях последних. В нашем случае полуавтоматический алгоритм «занизил» размеры на 1.5-3.4%. С клинической точки зрения, эта разница не является критической, так как размерные сетки современных протезов имеют шаг в несколько миллиметров. Оба метода привели бы к выбору протеза одного размера. Однако это подчеркивает важность понимания специфики работы алгоритма: он стремится к сег-

Таблица №1. Сравнение измерений параметров корня аорты ручным и полуавтоматическим методами.

Параметр	Ручной метод	Полуавтоматический метод	Абсолютная разница	Относительная разница (%)
Фиброзное кольцо АК				
Периметр (P), мм	83.2	81.7	-1.5	-1.8%
Площадь (S), мм ²	495	478	-17	-3.4%
Dmax, мм	27.5	26.9	-0.6	-2.2%
Dmin, мм	19.8	19.5	-0.3	-1.5%
Синусы Вальсальвы				
Периметр (P), мм	105.6	104.1	-1.5	-1.4%
Площадь (S), мм ²	865	850	-15	-1.7%
ВТЛЖ				
Площадь (S), мм ²	520	505	-15	-2.9%
Расстояние до устьев КА				
До ПКА, мм	14.2	13.9	-0.3	-2.1%
До ЛКА, мм	12.8	12.5	-0.3	-2.3%

Примечание: АК – аортальный клапан, Dmax – максимальный диаметр, Dmin – минимальный диаметр, КА – коронарные артерии, ПКА – правая коронарная артерия, ЛКА – левая коронарная артерия.

ментации «истинного» просвета, что может быть особенно полезно при массивном кальцинозе, затрудняющем визуальное определение границы.

Преимущество полуавтоматического метода – относительное сокращение времени анализа за счёт автоматической сегментации анатомических структур корня аорты. В условиях растущего объема выполняемых ТИАК это является экономией ресурсов врачей-рентгенологов и ускорение процесса планирования. Кроме того, программное обеспечение обеспечивает стандартизацию измерений, минимизируя внутри- и межоператорскую вариабельность, которая для некоторых параметров (например, определение плоскости ФК при двустворчатом клапане) может достигать клинически значимых величин [8].

Важно отметить, что работа полуавтоматического алгоритма зависит от качества исходных изображений (отсутствие артефактов, адекватное контрастирование). В сложных случаях (например, при подклапанном кальцинозе, атипичном ходе коронарных артерий, наличии артефактов от металла) окончательная верификация плоскостей измерения и интерпретация данных остаются за врачом-рентгенологом. Как показано в нашем случае, окончательное решение о типе и размере клапана принимается консилиумом на основе комплексной оценки, где КТ-данные – лишь один, хотя и ключевой, элемент.

Таким образом, полуавтоматический анализ можно рекомендовать в качестве эффективного инструмента первого этапа анализа КТ перед ТИАК. Он позволяет быстро получить точные и воспроизводимые измерения, сформировать предварительный отчет. Это освобождает время эксперта для углубленного анализа сложных аспектов анатомии, консультаций с хирургами и принятия итогового решения, повышая общую

эффективность работы отделения.

Заключение.

Полуавтоматический анализ КТ корня аорты для планирования ТИАК демонстрирует высокую степень согласованности с традиционными ручными измерениями корня аорты, с клинически незначимыми расхождениями в ключевых размерах.

Преимущество метода – относительное сокращение времени обработки и стандартизация измерений, что снижает субъективную вариабельность.

Метод особенно полезен для скрининга и первичного анализа, но не заменяет экспертной оценки врача-рентгенолога. Окончательное планирование процедуры ТИАК, особенно у пациентов со сложной анатомией и выраженным кальцинозом, должно основываться на комплексном рассмотрении всех данных, включая проверку и интерпретацию результатов автоматизированного анализа специалистом.

Внедрение полуавтоматических программных решений в рутинную практику позволяет оптимизировать рабочий процесс предоперационного планирования ТИАК, повышая его эффективность без ущерба для точности.

Информированное согласие.

Были подписаны информированные согласия на использование обезличенных клинических и визуализационных данных в научных целях.

Благодарности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отделения томографии за помощь в сборе материала.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Vahanian A., Beyersdorf F., Praz F., Milojevic M., Baldus S., Bauersachs J. et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J.* 2022;43(7):561-632.
2. Smith C.R., Leon M.B., Mack M.J., Miller D.C., Moses J.W., Svensson L.G. et al. Transcatheter versus surgical aortic valve replacement in high-risk patients. *N Engl J Med.* 2011;364(23):2187-2198.
3. Blanke P., Weir-McCall J.R., Achenbach S., Delgado V., Hausleiter J., Jilaihawi H. et al. Computed tomography imaging in the context of transcatheter aortic valve implantation (TAVI)/transcatheter aortic valve replacement (TAVR): an

expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *J Cardiovasc Comput Tomogr.* 2019;13(1):1-20.

4. Гафси Б.Э., Веселова Т.Н., Терновой С.К., Ширкин А.В. Компьютерная томография в оценке состояния корня аорты у пациентов с критическим аортальным стенозом. *REJR.* 2023; 13(4):101-109. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-101-109.

5. La Grutta L., Toia P., Grassedonio E., Pasta S., Albano D., Agnello F. et al. TAVI imaging: over the echocardiography. *Radiol Med.* 2020;125(11):1148-1166.

6. Budde R.P., Stella P.R., Götte M.J., Fukui M., Wang C.,

Phichaphop A. et al. Multislice computed tomography for pre-procedural planning of transcatheter aortic valve replacement. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*. 2011;12(4):268-276.

7. Веселова Т.Н., Ширкин А.В., Терновой С.К., Имаев Т.Э., Сырхаева А.А. Компьютерная томография в оценке ранних постоперационных осложнений после транскатетерного протезирования аортального клапана. *REJR*. 2023; 13(2):75-82. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-2-75-82

8. Horehledova B., Muhl C., Schwemmer C., Hendriks B., Eijssvoegel N., Kietselaer B. et al. Aortic root evaluation prior to transcatheter aortic valve implantation – Correlation of manual and semi-automatic measurements. *PLoS One*. 2018;13(6):e0199732.

9. Watanabe Y., Morice M., Bouvier E., Leong T., Hayashida K., Lefèvre T. et al. Automated 3-dimensional aortic annular assessment by multidetector computed tomography in

transcatheter aortic valve implantation. *JACC Cardiovasc Interv*. 2013;6(9):955-964.

10. Astudillo P., Mortier P., Bosmans J., De Backer O., de Jaegere P., Iannaccone F. et al. Automatic Detection of the Aortic Annular Plane and Coronary Ostia from Multidetector Computed Tomography. *J Interv Cardiol*. 2020;2020:9843275.

11. Murphy D.T., Blanke P., Alaamri S., Naoum C., Rubinshtein R., Pache G. et al. Dynamism of the aortic annulus: effect of diastolic versus systolic CT annular measurements on device selection in transcatheter aortic valve replacement (TAVR). *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2016;10(1):37-43.

12. Abdeldayem E., Ibrahim A., Osman A. CT aortic annulus parameters for pre-operative TAVI assessment: a comparative study between manual post processing and automated software tool. *Egypt J Radiol Nucl Med*. 2018;49(2):352-358.

References:

1. Vahanian A., Beyersdorf F., Praz F., Milojevic M., Baldus S., Bauersachs J. et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur Heart J*. 2022;43(7):561-632.

2. Smith C.R., Leon M.B., Mack M.J., Miller D.C., Moses J.W., Svensson L.G. et al. Transcatheter versus surgical aortic-valve replacement in high-risk patients. *N Engl J Med*. 2011;364(23):2187-2198.

3. Blanke P., Weir-McCall J.R., Achenbach S., Delgado V., Hausleiter J., Jilaihawi H. et al. Computed tomography imaging in the context of transcatheter aortic valve implantation (TAVI)/transcatheter aortic valve replacement (TAVR): an expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2019;13(1):1-20.

4. Gafsi B.E., Veselova T.N., Ternovoy S.K., Shirkin A.V. Computed tomography in assessing the condition of the aortic root in patients with critical aortic stenosis. *REJR*. 2023; 13(4):101-109. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-101-109 (in Russian).

5. La Grutta L., Toia P., Grassedonio E., Pasta S., Albano D., Agnello F. et al. TAVI imaging: over the echocardiography. *Radiol Med*. 2020;125(11):1148-1166.

6. Budde R.P., Stella P.R., Götte M.J., Fukui M., Wang C., Phichaphop A. et al. Multislice computed tomography for pre-procedural planning of transcatheter aortic valve replacement. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*. 2011;12(4):268-276.

7. Veselova T.N., Shirkin A.V., Ternovoy S.K., Imaev T.E.,

Syrkhaeva A.A. Computed tomography in the evaluation of early postoperative complications after transcatheter aortic valve replacement. *REJR*. 2023; 13(2):75-82. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-2-75-82 (in Russian).

8. Horehledova B., Muhl C., Schwemmer C., Hendriks B., Eijssvoegel N., Kietselaer B. et al. Aortic root evaluation prior to transcatheter aortic valve implantation – Correlation of manual and semi-automatic measurements. *PLoS One*. 2018;13(6):e0199732.

9. Watanabe Y., Morice M., Bouvier E., Leong T., Hayashida K., Lefèvre T. et al. Automated 3-dimensional aortic annular assessment by multidetector computed tomography in transcatheter aortic valve implantation. *JACC Cardiovasc Interv*. 2013;6(9):955-964.

10. Astudillo P., Mortier P., Bosmans J., De Backer O., de Jaegere P., Iannaccone F. et al. Automatic Detection of the Aortic Annular Plane and Coronary Ostia from Multidetector Computed Tomography. *J Interv Cardiol*. 2020;2020:9843275.

11. Murphy D.T., Blanke P., Alaamri S., Naoum C., Rubinshtein R., Pache G. et al. Dynamism of the aortic annulus: effect of diastolic versus systolic CT annular measurements on device selection in transcatheter aortic valve replacement (TAVR). *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2016;10(1):37-43.

12. Abdeldayem E., Ibrahim A., Osman A. CT aortic annulus parameters for pre-operative TAVI assessment: a comparative study between manual post processing and automated software tool. *Egypt J Radiol Nucl Med*. 2018;49(2):352-358.

THE DIAGNOSTIC VALUE OF AIR IN THE ANTERIOR PERICARDIAL LIGAMENTS IN PENETRATING MINE-EXPLOSIVE WOUNDS OF THE CHEST CAVITY

Akhiyev M.I.^{1,2}, Kitayev V.M.^{1,3}, Abnizov A.S.¹, Badurov B.SH.¹, Komogorova A.A.¹

1- A.A. Vishnevsky National Medical Research Center of High Medical Technologies. Krasnogorsk, Russia.

2-Branch of the S.M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Ministry of Defense. Moscow, Russia.

3- Central State Medical Academy. Department of Radiology and Ultrasound Diagnostics. Moscow, Russia.

To substantiate the presence of isolated air collection in the anterior pericardial ligaments as a sign of rupture and pericardial contusion.

Materials and methods. A retrospective analysis of CT scans was performed in 97 wounded patients with diagnosed pericardial contusion and 117 wounded patients without contusion. Inclusion criteria included the presence of penetrating mine-explosive wounds of the chest cavity and a CT scan performed no later than five days after injury. Exclusion criteria included abdominal surgery performed during previous stages of medical evacuation. In all selected cases, CT scans were performed on the day of admission and were performed in the standard "chest cavity" mode. The image reconstruction thickness was 1.5 mm. A repeat analysis of the electronic CT scan records examined the distribution and quantity of air in the mediastinal regions. To quantify the air collection, the concepts of minimal, small, and large volume were introduced.

Results and discussion. It was established that air was present in the mediastinum in 69 cases with pericardial contusions, and in 30 cases without contusion ($P = 0.042$). In cases without contusion, on the contrary, there was a significant excess of absence of air – 88 versus 27 ($P = 0.037$). In cases of isolated air accumulation only in the anterior mediastinum and pericardial ligaments, the ratio of the number of observations with air accumulations in pericardial contusion exceeded observations without contusion by more than five times, as 33:6 ($P = 0.014$). Moreover, large-volume accumulations corresponded to contusion in 14 observations, and in the absence of contusion, cases of large air accumulation were not detected ($P < 0.05$). Minimal and small air accumulations in contusions were detected in 11 cases versus 2 without contusion ($P = 0.019$). When air accumulated in the middle and posterior mediastinum, no air was detected in the anterior mediastinal space; the ratio of cases with and without contusion was virtually identical, 5:6. Air accumulation in the pericardial ligaments and in all sections of the mediastinum, both in presence and volume, also showed no significant difference between cases with and without contusion. Thus, a significant predominance of air localization in cases of contusion was observed only with the first distribution pattern, indicating air migration along the following pathway: pleural cavity, anterior pericardial ligaments, indicating their rupture, and the anterior mediastinal space.

Conclusion. Comparison of the presence and volume of air in the pericardial ligaments confirms that direct air entry from the pleural cavity is a consequence of the ligament rupture. Therefore, air within the anterior mediastinum area and pericardial ligaments, in the absence of air in other areas of the mediastinum, indirectly indicates on pericardial contusion.

Keywords: pericardial contusion, rupture of the anterior pericardial ligaments, pneumomediastinum, mediastinal wounds.

Corresponding author: Akhiyev M.I., e-mail: akhiyev@yandex.com

For citation: Akhiyev M.I., Kitayev V.M., Abnizov A.S., Badurov B.SH., Komogorova A.A. The diagnostic value of air in the anterior pericardial ligaments in penetrating mine-explosive wounds of the chest cavity. REJR 2026; 16(1):42-51. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-42-51.

Received: 31.03.26

Accepted: 06.05.26

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВОЗДУХА В ПЕРЕДНИХ СВЯЗКАХ ПЕРИКАРДА ПРИ ПРОНИКАЮЩИХ МИННО-ВЗРЫВНЫХ РАНЕНИЯХ ГРУДНОЙ ПОЛОСТИ

Ахиев М.И.^{1,2}, Китаев В.М.^{1,3}, Абнизов А.С.¹, Бадуров Б.Ш.¹, Комогорова А.А.¹

1 – ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр высоких медицинских технологий им. А.А. Вишневого» Минобороны России. г. Красногорск, Россия.

2 – Филиал Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова МО РФ. г. Москва, Россия.

3 – ФГБУ ДПО «ЦГМА» Управления делами президента РФ. Кафедра рентгенологии и ультразвуковой диагностики. г. Москва, Россия.

Цель исследования. Обосновать наличие изолированного скопления воздуха в передних связках перикарда как признака их разрыва и ушиба перикарда.

Материалы и методы. Проведен ретроспективный анализ КТ-исследований 97 раненых с диагностированным ушибом перикарда и 117 раненых без ушиба. Критериями включения служило наличие проникающего минно-взрывного ранения (МВР) грудной полости и выполнение КТ не позднее пяти суток от момента ранения, критерием исключения – наличие проведенных на предыдущих этапах медицинской эвакуации полостных хирургических операций. Во всех отобранных наблюдениях КТ выполнялась в день поступления в стандартном режиме «грудная полость». Толщина реконструкции изображений – 1,5 мм. При повторном анализе электронных записей томограмм изучали распределение и количество воздуха по отделам средостения. Для количественной характеристики скопления воздуха были введены понятия минимального, малого и большого объема.

Результаты и обсуждение. Установлено, что при ушибах перикарда воздух присутствовал в средостении в 69 наблюдениях, а без ушиба – в 30 ($P=0,042$). В наблюдениях без ушиба, наоборот, имелось существенное превышение отсутствия воздуха – 88 против 27 ($P = 0,037$). В случаях изолированного скопления воздуха только в переднем отделе средостения (ПОС) и связках перикарда соотношение количества наблюдений со скоплениями воздуха при ушибе перикарда превышало наблюдения без ушиба более чем в пять раз, как 33:6 ($P = 0,014$). При этом скопления большого объема 14 наблюдениях соответствовали ушибу, а при отсутствии ушиба случаев большого скопления воздуха не обнаружено ($P < 0,05$). Минимальные и малые скопления воздуха при ушибах обнаружены в 11 случаях против 2 без ушиба ($P = 0,019$). При скоплении воздуха в среднем и заднем отделах средостения воздух в ПОС не обнаруживался, соотношение наблюдений с ушибом и без ушиба почти не отличалось, как 5:6. Скопления воздуха в связках перикарда и во всех отделах средостения, как по присутствию, так и по объему, так же не показали достоверного отличия в наблюдениях с ушибом и без ушиба. Таким образом, достоверное превосходство локализации воздуха при ушибах наблюдалось только при первом варианте распределения, что указывает на миграцию воздуха по пути: плевральная полость – передние связки перикарда, что указывало на их разрыв и ПОС.

Заключение. Сопоставление присутствия воздуха и его объема в переднем средостении и связках перикарда подтверждает его прямое поступление из плевральной полости и является следствием разрыва связки. Из этого следует, что воздух в переднем отделе средостения и связках перикарда, при его отсутствии в других отделах средостения, косвенно указывает на ушиб перикарда.

Ключевые слова: ушиб перикарда, разрыв передних связок перикарда, пневмомедиастинум, ранения средостения.

Контактный автор: Ахиев М.И., e-mail: akhiev@yandex.com

Для цитирования: Ахиев М.И., Китаев В.М., Абнизов А.С., Бадуров Б.И., Комогорова А.А. Диагностическое значение воздуха в передних связках перикарда при проникающих минно-взрывных ранениях грудной полости. REJR 2026; 16(1):42-51. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-42-51.

Статья получена: 31.03.26

Статья принята: 06.05.26

Visualization of gas accumulation in the mediastinum is a common and easily recognizable sign, the sensitivity of which in the examination of wounded patients by CT approaches 100% [1-4]. Air penetration into tissue occurs quite frequently in penetrating gunshot wounds, and is observed with greater consistency in wounds to the mediastinum, neck, or abdomen [5-10]. The cause of pneumomediastinum is the entry of air from the pleural cavity, in penetrating wounds with damage to the mediastinal pleura or through connective tissue layers along the vessels and bronchi from the damaged lung parenchyma, direct, reverse mechanism, and Macklin C.C. effect [11-14]. Air may enter the mediastinum from the abdominal cavity through the connective tissue running along the natural openings of the diaphragm [15-18]. This is sometimes observed after operations on abdominal organs or the retroperitoneal space, as well as as a result of penetrating wounds: of the esophagus, abdominal cavity and diaphragm [4,10, 16-18]. Air entry into the mediastinum is facilitated by the pressure gradient between the anatomical spaces and the suction action of respiratory movements and cardiac contractions. Air distribution within the mediastinum largely depends on the patient's static position [14]. As a result, air accumulates predominantly in the upper and anterior mediastinum (AMS).

While studying the symptoms of pericardial contusion in penetrating blast wounds (PBL) of the lung, observations were made of air accumulation in the anterior pericardial ligaments (APL) without the presence of air in other parts of the mediastinum [19,20]. This suggested a rupture of the APL and air penetration through the resulting defect. Thus, the hypothesis of "air accumulation in the pericardial ligaments" as an indicator of rupture emerged.

Purpose.

Substantiating the presence of an isolated accumulation of air in the anterior pericardial ligaments as a sign of rupture and contusion of the pericardium.

Material and methods.

To achieve this goal, a repeat retrospective analysis of 214 cases previously selected to

determine the ability of chest CT to detect cardiac contusions during thoracic mine-explosive wounds was conducted. Inclusion criteria included the presence of penetrating thoracic mine-explosive wounds and a CT scan performed no later than five days after injury. Exclusion criteria included abdominal surgery performed during previous stages of medical evacuation. The average age was 35 ± 11 years. In all selected cases, CT scans were performed on the day of admission; the examination was performed in the standard "chest cavity" mode. The vast majority (209 wounded) had mine-explosive wounds; the remaining 5 had gunshot wounds. Chest injuries were characterized by combined damage to the head (32), abdomen (69), and extremities (94). The choice of this group was due to the peculiarities of mine-explosive wounds, in which the shock wave has a strong damaging effect on the lung and pericardium, therefore the risk of ligament damage is maximized. According to the selection conditions, all wounds were penetrating, and the time for the initial CT scan ranged from 2 to 5 days, with an average of 3.6 days. During a repeat analysis of the electronic CT scan records, the distribution and amount of air in the mediastinal sections was studied. To quantify air accumulation, the concepts of minimal, small, and large volume were introduced. With regard to the PSP, the minimal amount of air corresponded to the presence of single bubbles (symbol +). A small accumulation denoted conditions when air was present between the ligament fibers; the superior or inferior ligament was filled with linear accumulations located along the connective tissue layers, while the volume of the PSP did not increase (symbol ++). A large accumulation corresponded to air distribution throughout the entire ligament(s), an increase in their volume, and air spread to the fibrous layer of the pericardium (symbol +++). With regard to the upper mediastinal floor (UMF) and the lower mediastinal floor (LMF), minimal air accumulation corresponded to the presence of single bubbles only in the UMF (symbol x); small air accumulation corresponded to the spread of single air bubbles in the UMF and LMF (symbol xx). Large - air spread over two floors in the form of linear clusters

along the connective tissue layers (designation xxx). The volume of air in the pleural cavity and subcutaneous fat was not taken into account.

Statistical analysis of the data was performed using quantitative distributions and simple percentage ratios. The Shapiro-Wilk Z-test (P value) was used to assess the normality of the distribution of the quantitative variable. The statistical significance of the results was determined based on the P value. Differences were considered statistically significant at a P value of <0.05. To correct for potential error in the analysis of multiple comparisons of contusion detection in groups with different air localizations, the Holm-Bonferroni correction was used. Statistica 10.0 and Medcalc v20.104 software were used for data processing and statistical analysis.

Results and discussion.

As a result of the previously conducted analysis, pericardial contusion in the selected group was diagnosed by CT in 97 (45.2%) of the

wounded. Contusion was not detected in 117 (54.8%). Signs of an established contusion included pericardial thickening up to 2-3 mm due to edema and accumulation of blood in the pericardium, indicated by an increase in pericardial thickness of more than 3 mm. Large pneumothorax was detected on CT in 65 (30.4%) of the wounded. In the remaining 149 (69.6%), air in the pleural cavities was localized subpleurally as a thin layer or was not detected at all, which we explained by the presence of pleural drains in all admitted patients and the time interval between the injury and the CT examination. Given the fact of the presence of a penetrating wound, the presence of air in the pleural cavity was assumed to be 100% in all selected observations. Under these conditions, there were theoretically several pathways for air to spread from the pleural cavity to the pulmonary artery:

Pathway 1: lung wound – perivascular connective tissue – mediastinum – pericardial

Table №1. Comparative statistics of air distribution and volume in the mediastinum with and without pericardial contusion (n=214).						
Localization of air accumulations in the mediastinal regions	Contusion: there is (n=96) no (n=118)	Air distribution by localization		Air distribution by volume		
		Number of observations	P	Air volume	Number of observations	P
Option 1 Air only in the pericardial sac and pericardial ligaments (n=39)	There is a bruise	33 (15,4%)	0,014	+	11	0,019
				++	8	
				+++	14	
	There is no bruise	6 (2,8%)	>0,05	+	2	<0,05
				++	4	
				+++	0	
Option 2: Air in the middle and posterior mediastinum (n=11)	There is a bruise	5 (2,3%)	>0,05	x	2	
				xx	3	
				xxx	0	
	There is no bruise	6 (2,8%)	>0,05	x	1	
				xx	4	
				xxx	1	
Option 3 Air in the pericardial ligaments and in all parts of the mediastinum (n=49)	There is a bruise	31 (14.5%)	0,0744	+(x)	10	>0,05
				(++) (x)	15	
				(+++)(xx)	4	
	There is no bruise	18 (8,4%)	>0,05	(++) (xxx)	2	>0,05
				(+) (xx)	3	
				(++) (xx)	9	
				(+) (xxx)	4	
				(++) (xxx)	2	
In total with air in the mediastinum (n=99)	There is a bruise			69 (32.2%)	0,042	
	There is no bruise			30 (14.0%)		
Total without air in the mediastinum (n=115)	There is a bruise			27 (12,6%)	0,037	
	There is no bruise			88 (41,1%)		

ligaments and pericardial ligaments;

Pathway 2: pleural cavity – mediastinum – pericardial ligaments and pericardial ligaments;

Pathway 3: pleural cavity – pericardial ligaments and pericardial ligaments.

It was possible that air could migrate in several directions, but this scenario was not considered due to its unprovability. Therefore, air distribution in the mediastinum was analyzed using the three proposed approaches. The goal of the analysis was to identify reliable differences between patterns of air accumulation in various mediastinal regions with and without pericardial contusion. It was also assumed that air accumulation in the pericardial septum should be an indicator of its rupture. The results of comparative statistics for air distribution and its volume in various mediastinal regions with and without contusion are shown in Table 1. For ease of presentation, air accumulation in the anatomical regions of the mediastinum is conventionally divided into patterns,

These findings further support a third route for air entry, as a large air volume in the cerebrospinal fluid (CSF), formed via the first or second pathways, inevitably predetermines a similar accumulation in the mediastinum, which should leave at least a minimal trace along its migration. Equally, this trace could not completely disappear through diffusion, as the average time to perform a CT scan after injury was 3.6 ± 1 day. Air accumulations in the mediastinum do not disappear within this time period. Minimal and small air accumulations in the first pattern were detected in 11 cases with contusions versus 2 without contusions ($P = 0.019$). In the third distribution variant, large air accumulations in the pericardial ligament with contusions were detected in only four out of 31 observations. It should be noted that in these four observations, the mediastinal air accumulations corresponded to small volumes, which is more indicative of retrograde air migration from the ligament. However, overall, the third volume distribution variant also did not

Table №2. Association of the "Air Accumulation in the Mediastinum" Symptom with Pericardial Contusion.						
Localization of air in the mediastinal compartments	Presence of a bruise	Test result		Ch	S	R
All departments (3rd option)	There is a bruise (n = 96)	TP = 69	FP = 30	0,72	0,74	0,45
	No bruise (n = 118)	FN = 27	TN = 88			
PSP only (Option 1)	There is a bruise n = 33	TP = 33	FP = 6	-	-	-
	No bruise (n = 6)	FN = 0	TN = 0			

designated by numbers.

The table shows that with pericardial contusions, air penetrated into the mediastinum in 69 observations, and without contusion in 30 ($P = 0.042$). In the absence of contusion, on the contrary, there was a significant excess of the absence of air over its presence – 88 versus 27 ($P = 0.037$). In the first variant of distribution, the ratio of the number of observations with air accumulations in pericardial contusion exceeded observations without contusion by more than five times, as 33:6 ($P = 0.014$). In the second variant of distribution, in which air was not detected in the POS, a similar ratio differed little, as 5:6. In the third variant of distribution, the differences in the localization of air in pericardial contusions and without this did not show a significant difference ($P = 0.74$). Thus, a statistically significant advantage in air localization in bruises was observed only with the first distribution option, which indicates in favor of the third route of air migration. A comparison of the volume of incoming air in the first distribution pattern revealed that a large volume of air in 14 cases corresponded to a contusion, while no significant air accumulations were detected in the absence of a contu-

reveal a significant difference between observations with and without contusions ($P > 0.05$). A comparison of the association between mediastinal air localization and pericardial contusion is shown in Table №2.

The table's data confirm that in cases of mediastinal air distribution according to the third scenario, the probability of a rupture of the posterior ventricle is extremely low ($O = 0.72$). In the absence of air in the mediastinum, the probability of a lack of rupture is also inconclusive ($C = 0.74$). Therefore, air accumulation according to the third scenario has no diagnostic value. When air is distributed according to the first scenario, it is impossible to correctly calculate sensitivity and specificity, since the conditions for selecting the LO and LP result in zero cases. Nevertheless, a 100% PI rate of air accumulation observations according to the first scenario indicates a high probability of a rupture of the posterior ventricle.

Various variants of air accumulation due to rupture of the ligament along the third air migration path are shown in Fig. 1-4; along the first path – in Fig. 5.

Thus, comparing the presence and volume of air in the pericardial ligament confirms

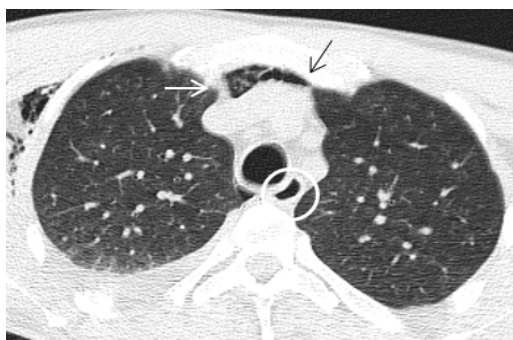


Fig. 1 а (Рис. 1 а)

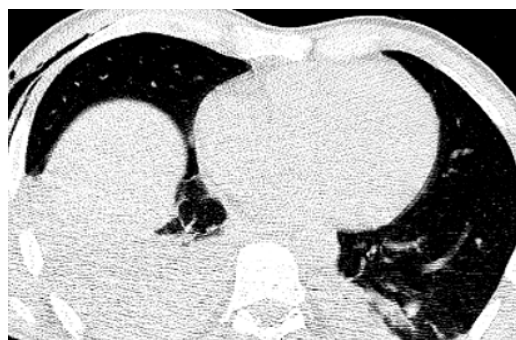


Fig. 1 б (Рис. 1 б)

Fig. 1. CT scan of the chest, axial plane, native examination.

a - mine-explosive blind shrapnel thoracoabdominal wound. CT scan reveals contusion of the lower lobes of the lungs and pericardium, rupture of the superior anterior pericardial ligament with air penetration forming an upper horizontal border with blood (black arrow), and a hematoma along the right edge of the ligament (white arrow). Air is present in the lumen of the esophagus (circled).

b - no air accumulations are present in other areas of the mediastinum.

Рис. 1. КТ органов грудной полости, аксиальная плоскость, нативное исследование.

а – минно-взрывное слепое осколочное торакоабдоминальное ранение. Определяется ушиб нижних долей легких, перикарда, разрыв верхней передней связки перикарда с проникновением воздуха, формирующим верхнюю горизонтальную границу с кровью (черная стрелка), гематома по правому краю связки (белая стрелка). Воздух в просвете пищевода (обозначен кругом).

б – отсутствие скопления воздуха в других отделах средостения.

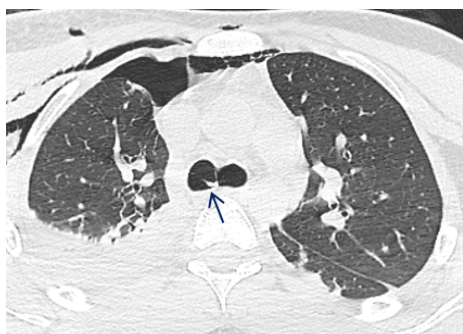


Fig. 2 а (Рис. 2 а)



Fig. 2 б (Рис. 2 б)

Fig. 2. CT scan of the chest, axial plane, native examination.

a - level of tracheal bifurcation.

b - upper chest.

Second day after penetrating pulmonary injury to the right lung. Right-sided pneumothorax, bilateral pulmonary contusion, tracheal contusion, mucosal detachment in the left main bronchus (arrow), air penetration into the superior pericardial ligament. Air is present in the esophageal lumen (dashed arrow). No air is present in other parts of the mediastinum.

Рис. 2. КТ органов грудной полости, аксиальная плоскость, нативное исследование.

а – уровень бифуркации трахеи.

б – верхние отделы.

Вторые сутки после минно-взрывного проникающего ранения правого легкого. Правосторонний пневмоторакс, двусторонний ушиб легких, трахеи, отслойка слизистой в левом главном бронхе (стрелка), проникновение воздуха в верхнюю связку перикарда. Воздух в просвете пищевода (пунктирная стрелка). Отсутствие воздуха в других отделах средостения.

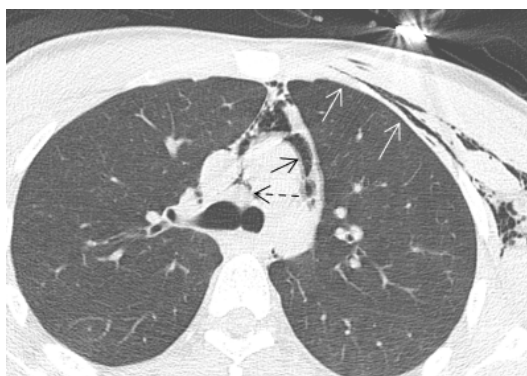


Fig. 3 а (Рис. 3 а)



Fig. 3 б (Рис. 3 б)

Fig. 3. CT scan of the chest, axial plane, native examination.

a - mine-explosive penetrating shrapnel wound of the left lung, blind shrapnel wound of the heart, pulmonary and pericardial contusion, rupture of the inferior anterior pericardial ligament. CT scan performed on the fourth day.

b - air is determined in the anterior pericardial ligaments, which spreads to the fibrous layers of the pericardium, the volume of the inferior anterior ligament is enlarged, the ligament is deformed, there is a large volume of air in the ligament.

Legend: air accumulations in the pericardium (black arrows); pneumothorax (white arrows); air in the pericardial folds (dashed arrows).

Рис. 3. КТ органов грудной полости, аксиальная плоскость, нативное исследование.

а – минно-взрывное сквозное осколочное ранение левого легкого, слепое осколочное ранение сердца, ушиб легких и перикарда, разрыв нижней передней связки перикарда. КТ выполнена на четвертые сутки.

б – в передних связках перикарда определяется воздух, который распространяется на фиброзные листки перикарда, объем нижней передней связки увеличен, связка деформирована, большой объем воздуха в связке. Обозначения: скопления воздуха в перикарде – черные стрелки; пневмоторакс – белые стрелки; воздух в заворотах перикарда – пунктирные стрелки.

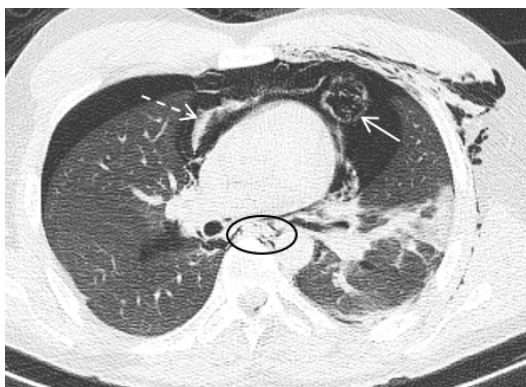


Fig. 4 (Рис. 4)

Рис. 4. КТ органов грудной полости, аксиальная плоскость, нативное исследование.

Penetrating mine-explosive wound to the left side of the chest. Contusion of the lower lobes of the lungs, bilateral pneumothorax, cardiac contusion, and rupture of the anterior pericardial ligament. CT scan shows a rupture of the inferior anterior pericardial ligament. The ligament is deformed and filled with air, with large amounts of air penetrating the fibrous layer of the pericardium (arrow), and blood collections are visible (dashed arrow). Minimal air collections are visible in the posterior visceral ligaments of the mediastinum (indicated by the oval).

Fig. 4. CT scan of the chest, axial plane, native examination.

Минно-взрывное проникающее ранение левой половины грудной полости. Ушиб нижних долей легких, двусторонний пневмоторакс, ушиб сердца, разрыв передней связки перикарда. Определяется разрыв нижней передней связки перикарда. Связка деформирована, заполнена воздухом, воздух в большом количестве проникает в фиброзный листок перикарда (стрелка), видны скопления крови (пунктирная стрелка). Минимальные скопления воздуха видны в задних висцеральных связках средостения (обозначено овалом).

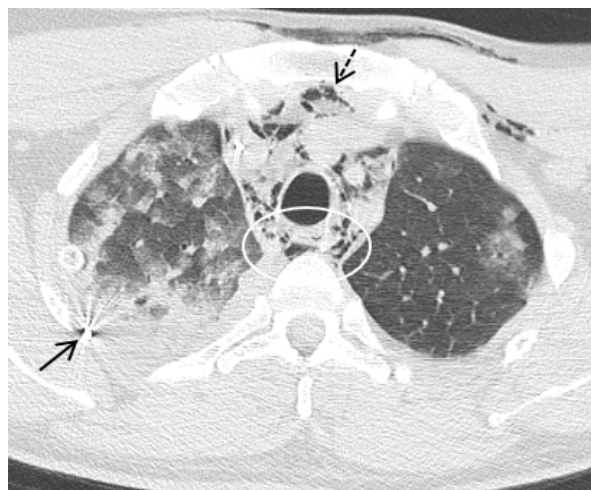


Fig. 5 a (Рис. 5 а)



Fig. 5 b (Рис. 5 б)

Fig. 5. CT scan of the chest, axial plane, native examination.

a - the upper chest.

b - the lower chest.

Mine-explosive injury. Penetrating shrapnel wound to the right lung, pulmonary contusion, and pericardial contusion. Air accumulates in the deformed pericardial septum (dashed arrow), in the visceral ligaments of the posterior mediastinum (circled), and in other parts of the mediastinum, and also spreads through the fibrous layer of the pericardium (white arrows). The shrapnel (black arrow) and contusions of the right and left lungs are clearly visible.

Рис. 5. КТ органов грудной полости, аксиальная плоскость, нативное исследование.

а – верхние отделы.

б – нижние отделы.

Минно-взрывное ранение, проникающее осколочное ранение правого легкого, ушиб легких, перикарда. Воздух скапливается в деформированной передней связке перикарда (пунктирная стрелка), в висцеральных связках заднего отдела средостения (обведены овалами) и в других отделах средостения, а также распространяется по фиброзному листку перикарда (белые стрелки). Хорошо виден осколок (черная стрелка), ушибы правого и левого легкого.

its direct entry from the pleural cavity due to a ligament rupture. Therefore, air in the pericardial ligament and pericardial ligaments, in the absence of air in other areas of the mediastinum, is a sign of a pericardial ligament rupture and indirectly indicates a pericardial contusion.

Conclusions.

1. The sign of “Isolated air accumulation in the anterior pericardial ligaments” on CT scans performed no later than 5 days after mine-explosive injury, with a high probability indicates their rupture and should be considered a marker of pericardial contusion.
2. Low prevalence of the symptom – 46.3%; in its absence, pericardial contusion does not exclude.

3. Air accumulations in the pericardial ligaments and in other parts of the mediastinum did not confirm the diagnostic value of a ligament rupture, since they could equally be a consequence of tissue diffusion or direct air entry through the wound channel.

Source of funding and conflict of interest.

The authors of this article confirm that they have no financial support for the study and no conflicts of interest to report.

Compliance with ethical standards.

The authors confirm that the rights of people who participated in the study were respected, including obtaining informed consent where necessary.

References:

1. Beresneva E.A., Selina I.E., Kvardakova O.V. Possibilities of the X-ray method when using it in victims with severe combined chest and abdominal trauma. *REJR*. 2013; 3 (4): 20-31 (in Russian).
2. Ivchenko D.R. Surgical treatment of combined penetrating gunshot wounds of the chest during counter-terrorism operations. *Doct.diss. Moscow, 2020. 214 p. (in Russian).*
3. Cakmak G, Cansun F, Saracoglu A, T Saracoglu K. Airway management in penetrating thoracic trauma. *Anaesthesiol Intensive Ther.* 2022;54(3):253-261. doi: 10.5114/ait.2022.118332. PMID: 36000693.
4. Fuhrmann C, Weissenborn M, Salman S. Mediastinal fluid as a predictor for esophageal perforation as the cause pneumomediastinum. *Emerg Radiol.* 2021;28(2):233-238. doi: 10.1007/s10140-020-01841-x. PMID: 32813157.
5. Tulupov A.N., Manukovsky V.A., Demko A.E. et al. Emergency surgery of the chest and abdomen: a manual for doctors. Moscow, GEOTAR-Media, 2024. 752 p. ISBN 978-5-9704-7848-6, DOI: 10.33029/9704-7848-6-SUR-2024-1-752 (in Russian).
6. Abakumov M.M. Multiple and combined wounds of the neck, chest, abdomen. Moscow, BINNOM-PRESS, 2013. 688 p. (in Russian).
7. Gumanenko E.K. Military field surgery: textbook. 2nd ed., rev. and additional M., GEOTAR-Media, 2008. 768 p. (in Russian).
8. Lurin, I., Vorovskiy, O., Makarov, et al. Management of thoracoabdominal gunshot injuries by using minimally invasive surgery at role 2 deployed field hospitals in Ukraine. *BMC Surg.* 2024; 183. <https://doi.org/10.1186/s12893-024-02475-3>.
9. Propper BW, Gifford SM, Calhoon JH, McNeil JD. Wartime thoracic injury: perspectives in modern warfare. *Ann Thorac Surg.* 2010;89(4):1032-5. doi: 10.1016/j.athoracsur.2010.01.014.
10. Мануковский В.А., Тулупов А.Н. и др. Огнестрельные ранения груди, живота, таза и позвоночника: руководство для врачей. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2025. 288 с. ISBN 978-5-9704-9262-8. DOI: 10.33029/9704-9262-8-CPS-2025-1-288 (in Russian).
11. Grewal J, Gillaspie EA. Pneumomediastinum. *Thorac Surg Clin.* 2024;34(4):309-319. doi:10.1016/j.thorsurg.2024.06.001. PMID: 39332856.
12. Chinthareddy RR, Ashok K, Srikrishna SV, Lingaraju VC. Reverse Macklin effect. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg.* 2022;38(5):553-555. doi: 10.1007/s12055-022-01338-x. Epub 2022 Mar 17. PMID: 36050976.
13. Serindere M., Ersen M., Balyemez U. Spontaneous pneumomediastinum and macklin effect: Three rare case reports with computed tomography findings. *Niger J Clin Pract.* 2023;26(4):528-530. doi: 10.4103/njcp.njcp_901_22. PMID: 37203121.
14. Khadzhibaev A. M., Shukurov B. I., Altyyev B. K., Kuchkarov O. O. Surgery of thoracoabdominal wounds: 15-year experience of one clinic. *Bulletin of Emergency Medicine* 2019;4:9-16 (in Russian).
15. Kotiv B.N., Samokhvalov I.M., Markevich V.Yu., et al. Stab-and-cut thoracoabdominal wounds: modern surgical tactics. *Bulletin of Surgery named after I.I. Grekov.* 2019; 178 (1): 34-38 (in Russian).
16. Amarantov D. G., Zarivchatsky M. F., Kholodar A. A. et al. Modern approaches to surgical treatment of thoracoabdominal wounds. *Bulletin of Surgery named after I. I. Grekov.* 2018; 177 (5): 100-104 (in Russian).
17. Bagheri R., Tavassoli A., Sadrizadeh A., et al. The role of thoracoscopy for the diagnosis of hidden diaphragmatic. Injuries in penetrating thoracoabdominal trauma. *«Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery.* 2009; 9 (2): 195-198.
18. Abakumov M.M., Shamba Kh.L., Danielyan Sh.N. Spontaneous mediastinal emphysema. *Surgery. Journal named after N. I. Pirogova.* 2010; 2: 47-50 (in Russian).
19. Ozer O, Sari I, Davutoglu V, Yildirim C. Pericardial tamponade consequent to a dynamite explosion: blast overpressure injury without penetrating trauma. *Tex Heart Inst J.* 2009;36(3):259-60. PMID: 19568402.
20. Akhiev M.I., Kitaev V.M., Abnizov A.A. CT capabilities in diagnostics of shrapnel wounds of the. *REJR.* 2025; 15 (4): 85-99. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-4-85-99.

Список литературы:

1. Береснева Э.А., Селина И.Е., Квардакова О.В. Возможности рентгенологического метода при использовании его у пострадавших с тяжелой сочетанной травмой груди и живота. *REJR*. 2013; 3 (4): 20-31.
2. Ивченко, Д.Р. Хирургическое лечение сочетанных огнестрельных проникающих ранений груди при проведении контртеррористических операций. *Докт.дисс. Москва, 2020. 214 с.*
3. Cakmak G, Cansun F, Saracoglu A, T Saracoglu K. Airway management in penetrating thoracic trauma. *Anaesthesiol Intensive Ther.* 2022;54(3):253-261. doi: 10.5114/ait.2022.118332. PMID: 36000693.
4. Fuhrmann C, Weissenborn M, Salman S. Mediastinal fluid as a predictor for esophageal perforation as the cause pneumomediastinum. *Emerg Radiol.* 2021;28(2):233-238. doi: 10.1007/s10140-020-01841-x. PMID: 32813157.
5. Тулупов А.Н., Мануковский В.А., Демко А.Е. и др. Неполная хирургия груди и живота: руководство для врачей. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2024. 752 с. ISBN 978-5-9704-7848-6, DOI: 10.33029/9704-7848-6-SUR-2024-1-752.
6. Абакумов, М.М. Множественные и сочетанные ранения шеи, груди, живота. Москва, БИННОМ-ПРЕСС, 2013. 688 с.
7. Гуманенко Е.К. Военно-полевая хирургия: учебник. 2-е изд., изм. и доп. М., ГЭОТАР-Медиа, 2008. 768 с.
8. Lurin, I., Vorovskiy, O., Makarov, et al. Management of thoracoabdominal gunshot injuries by using minimally invasive surgery at role 2 deployed field hospitals in Ukraine. *BMC Surg.* 2024; 183. <https://doi.org/10.1186/s12893-024-02475-3>.
9. Propper BW, Gifford SM, Calhoon JH, McNeil JD. Wartime thoracic injury: perspectives in modern warfare. *Ann Thorac Surg.* 2010;89(4):1032-5. doi: 10.1016/j.athoracsur.2010.01.014.

10.1016/j.athoracsur.2010.01.014.

10. Мануковский В.А., Тулупов А.Н. и др. Огнестрельные ранения груди, живота, таза и позвоночника: руководство для врачей. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, ГЭОТАР-Медиа, 2025. 288 с. ISBN 978-5-9704-9262-8. DOI: 10.33029/9704-9262-8-CPS-2025-1-288.

11. Grewal J, Gillaspie EA. Pneumomediastinum. *Thorac Surg Clin.* 2024;34(4):309-319. doi:10.1016/j.thorsurg.2024.06.001. PMID: 39332856.

12. Chinthareddy RR, Ashok K, Srikrishna SV, Lingaraju VC. Reverse Macklin effect. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg.* 2022;38(5):553-555. doi: 10.1007/s12055-022-01338-x. Epub 2022 Mar 17. PMID: 36050976.

13. Serindere M., Ersen M., Balyemez U. Spontaneous pneumomediastinum and macklin effect: Three rare case reports with computed tomography findings. *Niger J Clin Pract.* 2023;26(4):528-530. doi: 10.4103/njcp.njcp_901_22. PMID: 37203121.

14. Хаджибаев А.М., Шукуров Б.И., Алтыев Б.К., Кучкаров О.О. Хирургия торакоабдоминальных ранений: 15-летний опыт одной клиники. *Вестник экстренной медицины.* 2019; 4: 9-16.

15. Котиев Б.Н., Самохвалов И.М., Маркевич В.Ю. и др.

Колото-резаные торакоабдоминальные ранения: современная хирургическая тактика. *Вестник хирургии им. И. И. Грекова.* 2019; 178 (1): 34-38.

16. Амарантов Д.Г., Заривчацкий М.Ф., Холодарь А.А. и др. Современные подходы к оперативному лечению торакоабдоминальных ранений. *Вестник хирургии им. И. И. Грекова.* 2018; 177 (5): 100-104.

17. Bagheri R., Tavassoli A., Sadrizadeh A., et al. The role of thoracoscopy for the diagnosis of hidden diaphragmatic. *Injuries in penetrating thoracoabdominal trauma. «nteractive CardioVascular and Thoracic Surgery.* 2009; 9 (2): 195-198.

18. Абакумов М.М., Шамба Х.А., Даниелян Ш.Н. Спонтанная эмфизема средостения. *Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова.* 2010; 2: 47-50.

19. Ozer O, Sari I, Davutoglu V, Yildirim C. Pericardial tamponade consequent to a dynamite explosion: blast overpressure injury without penetrating trauma. *Tex Heart Inst J.* 2009;36(3):259-60. PMID: 19568402.

20. Ахиев М.И., Китаев В.М., Абнизов А.А. Возможности КТ в диагностике осколочных ранений сердца. *REJR.* 2025; 15 (4): С.85-99. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-4-85-99.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ЭТАПАХ ДИАГНОСТИКИ И МАЛОИНВАЗИВНОГО ЛЕЧЕНИЯ ВНУТРИПРОТOKОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Марущак Е.А.^{1,2}, Зубарева Е.А.², Фисенко Е.П.¹, Мельченко Д.С.¹, Пресняков Е.В.¹

1 – ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. академика Б.В. Петровского, НКЦ №2». г. Москва, Россия.

2 – ФГБАУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова» МЗ РФ. г. Москва, Россия.

Цель исследования. Изучение возможностей и анализ результатов ультразвукового исследования на этапах диагностики и малоинвазивного лечения внутрипротоковых образований молочной железы.

Материалы и методы. За период с 2017 по 2025 гг. в НКЦ №2 РНЦ им. акад. Б.В. Петровского (ранее – Центральная клиническая больница Российской академии наук) было выполнено 695 ультразвуковых исследований (УЗИ) пациенткам с патологией молочных желёз (МЖ), в дальнейшем потребовавшей оперативного лечения. При этом 60 оперативных вмешательств было выполнено пациенткам, у которых по данным УЗИ было диагностировано внутрипротоковое образование (ВПО). Результаты УЗИ были сопоставлены с окончательным гистологическим материалом удаленной опухоли. Также были проанализированы 15 случаев верифицированных по данным морфологического исследования внутрипротоковых папиллом (ВПП) в сопоставлении с результатами УЗИ, не заподозрившего данную патологию.

В дальнейшем были проанализированы отдаленные результаты оперативного лечения с помощью вакуумной аспирационной биопсии (ВАБ) в объеме полной эксцизии с разметкой и навигацией под контролем УЗИ в режиме реального времени путем выполнения УЗИ в динамике гистологически подтвержденных ВПП у 30 женщины.

Результаты. Из 60 пациенток, у которых заподозрено ВПО при УЗИ, только у 31 женщины (51,6%) диагноз ВПП подтвержден результатами морфологической верификации. У остальных 29 пациенток при гистологическом исследовании были верифицированы: гамартома – 1, различные варианты фиброаденом – 9, непролиферативная форма фиброзно-кистозной мастопатии – 14, склерозирующий аденоз – 1, филоидная опухоль – 1, внутрипротоковая карцинома in situ – 2, инвазивный дольковый рак – 1.

При анализе 15 случаев ВПП, обнаруженных по данным гистологического исследования и не заподозренных при УЗИ, врачами ультразвуковой диагностики было высказано предположение о злокачественном новообразовании – у 6 пациенток (и у 2 из них одновременно с наличием ВПП верифицирована интрадуктальная карцинома in situ), еще у 6 пациенток была заподозрена фиброаденома и у 3 пациенток – очаг мастопатии.

При анализе отдаленных результатов малоинвазивного оперативного лечения путем ВАБ-резекции пациенток с морфологически подтвержденной ВПП в сроки более 6 месяцев рецидив либо остаточная ткань новообразования выявлены только у 3 из 30 (10%) явившихся на контрольное УЗИ женщин.

Обсуждение. При сопоставлении данных УЗИ с результатами морфологического исследования было выявлено, что в отношении ВПП метод обладает низкой чувствительностью, но высокой специфичностью, что вызвано, с одной стороны, многообразием ультразвуковой картины ВПО, имеющих схожие с рядом иных заболеваний молочных желез признаки, а с другой – диагностическими сложностями, обусловленными малым размером образования и его затрудненной визуализацией. В связи с этим важную роль играет знание вариантов УЗ-картины ВПО и наличие диагностического оборудования с хорошей разрешающей способностью и дополнительными режимами. УЗИ, помимо диагностической функции, обеспечивает визуализацию и навигацию для малоинвазивного удаления ВПО путем ВАБ, что с учетом особенностей локализации новообразования в протоках является оптимальным методом лечения данной патологии с хорошими отдаленными результатами.

Заключение. Основная роль УЗИ в первичной диагностике ВПО заключается в выявле-

нии новообразования, подозрительного на него. В дальнейшем при определении врачом-онкологом показаний для оперативного лечения УЗИ является оптимальным инструментом для предоперационной разметки и интраоперационной навигации при ВАБ-резекции, позволяющим достичь хороших отдаленных результатов.

Ключевые слова: ультразвуковая диагностика, молочная железа, внутримаммарное образование, внутримаммарная папиллома, вакуумная аспирационная биопсия, ВАБ, BI-RADS.

Контактный автор: Марущак Е.А., e-mail: e.marushchak@mail.ru.

Для цитирования: Марущак Е.А., Зубарева Е.А., Фисенко Е.П., Мельченко Д.С., Пресняков Е.В. Ультразвуковое исследование на этапах диагностики и малоинвазивного лечения внутримаммарных образований молочной железы. REJR 2026; 16(1):52-64. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-52-64.

Статья получена: 31.03.26

Статья принята: 06.05.26

ULTRASONIC EXAMINATION AT THE STAGES OF DIAGNOSIS AND MINIMALLY INVASIVE TREATMENT OF INTRADUCTAL BREAST LESIONS

Marushchak E.A.^{1,2}, Zubareva E.A.², Fisenko E.P.¹, Melchenko D.S.¹, Presnyakov E.V.¹

1 – B.V. Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery Scientific and Clinical Center No. 2.

2 – N.I. Pirogov Russian National Research Medical University. Moscow, Russia.

Purpose. To study the possibilities and analysis of the ultrasound examination results at the stages of diagnosis and minimally invasive treatment of intraductal breast lesions.

Materials and Methods. From 2017 to 2025 at B.V. Petrovsky Russian Research Surgery Center, SCC No. 2, (formerly the Central Clinical Hospital of the Russian Academy of Sciences) there were performed 695 ultrasound examinations (US) in patients with breast pathology, which later required surgical treatment. At the same time, 60 surgical interventions were performed in patients, who, according to US, were diagnosed with intraductal lesion (IDL). The US results were compared with the final histological material of the resected tumor. 15 cases of intraductal papillomas (IDP), verified by morphological examination, were also analyzed in comparison with the results of US, that did not detect this pathology. Subsequently, the long-term results of surgical treatment using vacuum aspiration biopsy (VAB) with complete excision, marking, and navigation under real-time US control were analyzed by performing US in dynamics of histologically confirmed IDP in 30 women.

Results. Of the 60 patients with suspected IDL on US, only 31 women (51.6%) had IDP diagnosis confirmed by morphological verification. In remaining 29 patients, histological examination verified: hamartoma – 1, variants of fibroadenomas – 9, nonproliferative fibrocystic mastopathy – 14, sclerosing adenosis – 1, phylloid tumor – 1, intraductal carcinoma in situ – 2, invasive lobular cancer – 1. In an analysis of 15 cases of IDP detected by histological examination and not suspected by US, ultrasound specialists suggested that 6 patients had malignant neoplasms (and 2 of them had intraductal carcinoma in situ at the same time), while 6 other patients were suspected of having fibroadenoma, and 3 had a focus of mastopathy. When analyzing the long-term results of minimally invasive surgical treatment by VAB-resection in patients with morphologically confirmed IDP in more than 6 months, relapse or residual tumor tissue was detected only in 3 out of 30 (10%) women who attended a follow-up US.

Discussion. When comparing the US data with the results of morphological study, it was found that the method has low sensitivity, but high specificity in relation to the IDT, which is caused by the diversity of the ultrasound picture of the IDL, which has signs similar to a number of other diseases of the breast, as well as diagnostic difficulties due to the small size of the masses and its difficult visualization. In this regard, knowledge of the variants of the ultrasound picture of the IDL and the availability of diagnostic equipment with good resolution and additional modes play an important role. In addition to its diagnostic function, US provides visualization and navigation for minimally invasive removal of IDL by VAB, which, given the specific location of the neoplasm in the ducts, is

the optimal treatment method for this pathology with good long-term results.

Conclusion. The main role of US in the primary diagnosis of IDL is to detect a suspicious neoplasm. Later, when an oncologist determines the indications for surgical treatment, US is the optimal tool for preoperative marking and intraoperative navigation during VAB resection, which allows good long-term results.

Keywords: ultrasound diagnostics, breast, intraductal lesion, intraductal papilloma, vacuum aspiration biopsy, VAB, BI-RADS.

Corresponding author: Marushchak E.A., e-mail: e.marushchak@mail.ru

For citation: Marushchak E.A., Zubareva E.A., Fisenko E.P., Melchenko D.S., Presnyakov E.V. Ultrasonic examination at the stages of diagnosis and minimally invasive treatment of intraductal breast lesions. REJR 2026; 16(1):52-64. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-52-64.

Received: 31.03.26

Accepted: 06.05.26

Из внутрипротоковых образований (ВПО) внутрипротоковая папиллома (ВПП) относится к доброкачественной дисплазии молочной железы (ДДМЖ) – гетерогенной группе заболеваний, характеризующихся широким спектром пролиферативных и регрессивных изменений ее тканей. Согласно национальным клиническим рекомендациям (НКТ), рекомендована резекция молочной железы (МЖ) пациенткам с ВПП с целью ее полного удаления и последующего патологоанатомического исследования биопсийного (операционного) материала. Ультразвуковое исследование (УЗИ), будучи высокоинформативным и неинвазивным, является одним из рекомендованных и широкодоступных методов инструментальной диагностики новообразований молочных желез [1].

ВПП являются распространенными папиллярными поражениями МЖ и могут быть как одиночными (чаще локализованы центрально – субареоларно в крупном локальном протоке), так и множественными (с преимущественным расположением в периферических терминальных протоково-дольковых единицах). В некоторых случаях при ВПП может наблюдаться атипичная эпителиальная пролиферация, которая классифицируется как ВПП с атипичной протоковой гиперплазией (АДН) или с протоковой карциномой in situ (DCIS). ВПП без атипичной пролиферации обозначается как NOS. У женщин с ВПП повышен риск развития рака молочной железы (РМЖ) [2, 3].

Частое сочетание ВПП с тяжелыми формами дисплазии и атипичической гиперплазии приводит к необходимости хирургического лечения, объем которого во многом зависит от качественной инструментальной диагностики заболевания [4]. Вместе с тем

ВПП относится к числу наиболее часто неправильно интерпретируемых при инструментальной диагностике поражений молочной железы. Кроме того, диагностика ВПП при пункционной или трепан-биопсии может быть сложной: даже если в биопсийном образце обнаружены фрагменты доброкачественного поражения, нельзя полностью исключить наличие клеточной атипии в другой части образования. Эта диагностическая неопределенность привела к классификации ВПП как поражений с неопределенным злокачественным потенциалом [5, 6].

УЗИ является одним из рекомендованных НКТ широкодоступных методов инструментальной диагностики новообразований молочной железы [1]. Диагностическая ценность УЗИ в выявлении ВПО уступает дуктографии и особенно магнитно-резонансной томографии с контрастированием (МРТ) [7]. Варьирующие по разным данным, но чаще невысокие, чувствительность и специфичность метода обусловлены широкой вариабельностью УЗ-картины ВПО, в том числе ВПП, благодаря которой они могут имитировать собой другие заболевания МЖ и приводить как к гипо-, так и к гипердиагностике [6, 8].

Врачи УЗД идентифицируют, сегментируют и анализируют УЗ-признаки новообразований, такие как расположение, форма, пространственная ориентация, край, экзогенность, кальцификация, тип акустической тени, васкуляризация. Эти признаки лежат в основе унифицированной УЗ-оценки узловых образований МЖ Breast Imaging Reporting & Data System (BI-RADS) [9]. Кистозные образования с пристеночным тканевым компонентом, как и внутрипротоковые солидные образования, обычно определяют в категорию BI-RADS IVa или IVb [10, 11]. Однако до сих

пор нет четкого клинического и радиологического прогноза их злокачественности. Необходимость биопсии, а также хирургического лечения для всех ВПО до сих пор обсуждается [12, 13].

Основными признаками-предикторами злокачественности ВПО при стандартном серо-шкальном УЗИ в В-режиме являются: размер, тенденция к более полному заполнению протока и распространение за его пределы, поражение ветвей протока, неправильная форма, сложный кистозно-солидный эхо-паттерн, наличие акустической тени, микрокальцификация, множественные очаги поражения, широкое основание солидных компонентов. Предиктором злокачественности также является усиление васкуляризации образования. Соответственно, эти УЗ-признаки повышают категорию BI-RADS [12 – 15].

Диагностическую ценность УЗИ позволяют повысить такие дополнительные режимы, как эластография и определение микро-васкуляризации, причем последний, в свою очередь, имеет преимущества перед широко используемыми цветовым доплеровским картированием (ЦДК) и энергетическим картированием (ЭК) кровотока [16, 17].

Наиболее оптимальным способом малоинвазивного хирургического лечения ВПП является вакуумная аспирационная биопсия (ВАБ) в объеме полной резекции новообразования, которая выступает альтернативой классической операции в объеме секторальной резекции МЖ [18]. В Европейских рекомендациях по диагностике, лечению и наблюдению за поражениями МЖ с неопределенным злокачественным потенциалом отмечено, что в настоящее время продолжается снижение частоты классического хирургического вмешательства при поражениях МЖ с неопределенным потенциалом злокачественности ВЗ благодаря использованию ВАБ-эксцизии [19]. Chang J.M. с соавт. отмечает, что не было выявлено перехода в злокачественное новообразование, если доброкачественное папиллярное поражение было диагностировано и подвергнуто иссечению с помощью ВАБ [20]. Тенденция к развитию фиброзно-кистозной болезни у молодых женщин после традиционной резекции МЖ по поводу ВПП также свидетельствует о преимуществах малоинвазивных протокоосберегающих операций [21].

Хорошие отдаленные результаты хирургического лечения ВПП с помощью ВАБ, показывающие низкий процент рецидива, напрямую зависят от методологии ее выполнения, ключевым моментом которой являются

ся предоперационная разметка и интраоперационная навигация, обеспечивающие в режиме реального времени визуализацию полного удаления пораженного протока МЖ. Кроме того, именно УЗИ является наиболее удобным способом интраоперационной навигации в режиме реального времени как для врача, так и для пациентки [22 – 26].

Таким образом, сложность УЗ-диагностики ВПО, обусловленная вариативностью её картины, неопределенный потенциал злокачественности ВПП и поиск способа их оперативного лечения, обеспечивающего высокую эффективность и вместе с тем хороший косметический эффект, обуславливают актуальность дальнейшего совершенствования УЗИ как в плане первичной диагностики, так и в плане способа интраоперационной навигации.

Цель исследования.

Изучение возможностей и анализ результатов ультразвукового исследования на этапах диагностики и малоинвазивного лечения внутрипротоковых образований молочной железы.

Материалы и методы.

С 2017 по 2025 гг. в НКЦН^{№2} РНХЦ им. акад. Б.В. Петровского (ранее – Центральная клиническая больница Российской академии наук (ЦКБ РАН)) было выполнено 695 ультразвуковых исследований (УЗИ) пациенткам с патологией молочных желёз (МЖ), в дальнейшем потребовавшей оперативного лечения. При этом 60 оперативных вмешательств было выполнено пациенткам, у которых по данным УЗИ было диагностировано внутрипротоковое образование (ВПО). Результаты УЗИ были сопоставлены с окончательным гистологическим материалом удаленной опухоли.

Также были проанализированы 15 случаев верифицированной по данным морфологического исследования ВПП в сопоставлении с результатами УЗИ, не заподозрившего эту патологию.

В дальнейшем были изучены отдаленные результаты оперативного лечения гистологически подтвержденных ВПП путем вакуумной аспирационной биопсии (ВАБ) в объеме полной эксцизии с разметкой и навигацией под контролем УЗИ в режиме реального времени путем выполнения УЗИ (30 пациенток, явившихся на УЗИ).

Возраст пациенток составил от 18 до 81 года (медиана 65 лет). Размер образований при этом варьировал от небольших (от 3 мм) и максимально до 54 мм по длинной оси (медиана 15 мм).

Всем пациенткам выполняли мульти-

параметрическое УЗИ молочных желёз, включавшее осмотр в В-режиме с использованием цветового доплеровского картирования (ЦДК), компрессионной эластографии и режима определения микроваскуляризации.

УЗИ выполняли на следующих УЗ-сканерах: Voluson E8 Expert (США) линейным датчиком ML6-15 (6-15 мГц), Samsung RS85 (Южная Корея) линейным датчиком L3-12A (3-12 мГц) и Canon Aplio I900 (Япония) линейным датчиком i18LX5 (5-18 мГц).

Выявленные при УЗИ новообразования классифицировали по системе BI-RADS.

средственно перед операцией и под контролем УЗ-навигации в режиме реального времени по описанной ранее методологии в условиях операционной дневного стационара под местной анестезией одноразовыми стерильными роботизированными зондами-иглами 7 или 10 G. на маммотоме 2 поколения EnCorENSPIRE (США) [23].

Гистологическое исследование полученного материала проводилось по стандартной методике с окраской гематоксилином и эозином под увеличением от x50 до x500 (масштаб указан на рисунках). Типичную ВПП при гистологическом исследовании

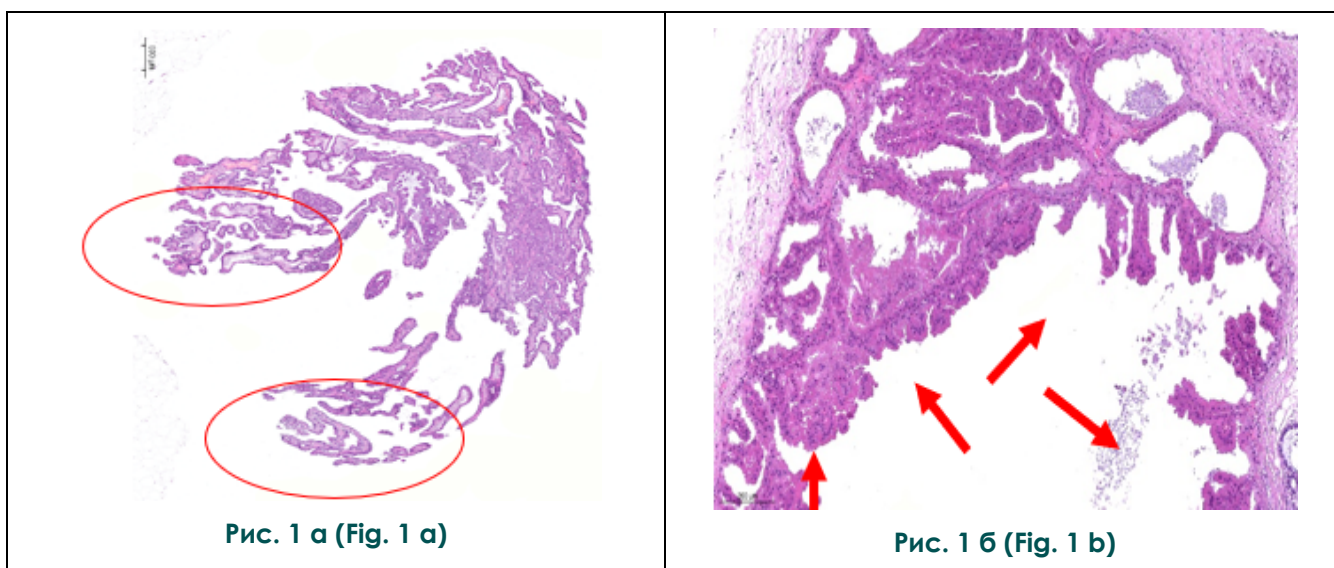


Рис. 1. Гистологическая картина типичной внутрипротоковой папилломы (ВПП).

а – Ветвящиеся папиллярные структуры – ткань ВПП (красный овал).

б – Фрагмент ВПП с явлениями апокринизации (красные стрелки).

Fig. 1. Histological patterns of typical intraductal papilloma (IDP).

a – branching papillary structures – IDP tissue (red oval).

b – fragment of the IDP with apocrine phenomena (red arrows).

Пациенткам с заподозренными по данным УЗИ ВПП, согласно национальным клиническим рекомендациям, были выставлены показания к оперативному лечению, перед которым проводилась морфологическая верификация путем ТАБ (тонкоигольной аспирационной биопсии) или трепан-биопсии, не подтвердившая злокачественный характер новообразования.

Оперативное лечение выполнялось путем вакуумной аспирационной биопсии (ВАБ) в объеме полной резекции новообразования с последующим исследованием гистологического материала.

ВАБ-резекция выполнялась с обязательной предоперационной разметкой непо-

верифицировали при наличии ветвящихся папиллярных структур, образованных фиброваскулярной стромой, выстланной протоковым эпителием с явлениями миоэпителиальной пролиферации и апокринизации без признаков атипии (рис. 1).

В отдаленном послеоперационном периоде всем пациенткам выполнялись контрольные УЗИ в разные сроки от вмешательства. Были проанализированы результаты оперативного лечения гистологически подтвержденных ВПП у 30 явившихся на УЗИ пациенток из 54, у которых по данным морфологического исследования удаленные новообразования были представлены ВПП. При различной кратности выполнения исследо-

ваний сроки хотя бы одного УЗИ в этой группе пациенток составили не менее 6 месяцев после операции.

Статистический анализ данных выполняли с использованием программного обеспечения Excel 2019 (Microsoft, США) и JMP Pro 17 (SAS, США). Количественные показатели описывали в виде медианы, минимального и максимального значения. Качественные признаки представлены в виде долей и частот выявления признака (%).

Результаты и обсуждение.

Распределение группы из 60 пациенток с подозрением по данным УЗИ на ВПП по классификации BI-RADS было следующим: II – 1 случай, III – 53, IVa – 6. По результатам морфологической верификации ВПП была подтверждена у 31 пациенток из 60 (51,6%). У остальных 29 (48,4%) пациенток при гистологическом исследовании были верифицированы: гамартома – 1, различные варианты фиброаденом – 9, непролиферативная форма фиброзно-кистозной мастопатии – 14, склерозирующий аденоз – 1, филоидная опухоль – 1, внутрипротоковая карцинома *in situ* – 2, инвазивный дольковый рак – 1.

Нами были проанализированы также 15 случаев морфологической верификации ВПО по данным гистологического исследования как ВПП, у которых при УЗИ не было выставлено подозрение на эту патологию. При УЗИ распределение выявленных новообразований у этих пациенток по классификации BI-RADS выглядело следующим образом: III – у 8, IVa – у 4, IVb – у 2. В заключении УЗИ было выставлено предположение о вероятности наличия злокачественного новообразования у 6 пациенток (и у 2 из них одновременно с наличием ВПП верифицирована интрадуктальная карцинома *in situ*), у 6 пациенток была заподозрена фиброаденома, и еще у 3 – *non mass lesion* по классификации последней версии BI-RADS 2025 г. (неопухолевые изменения, нарушения архитектоники МЖ, очаговая форма мастопатии) [27].

Не было подозрений при УЗИ на ВПП у 620 пациенток, оперированных по поводу других новообразований МЖ с последующей морфологической верификацией, при которой солидная ткань в протоках также не была обнаружена. Таким образом, чувствительность УЗИ в диагностике ВПП МЖ по материалам настоящего исследования была низкой и составила 67%, специфичность высокая – 95,5%, точность достигала 94%. Положительная прогностическая ценность 52%. Отрицательная прогностическая ценность 97%.

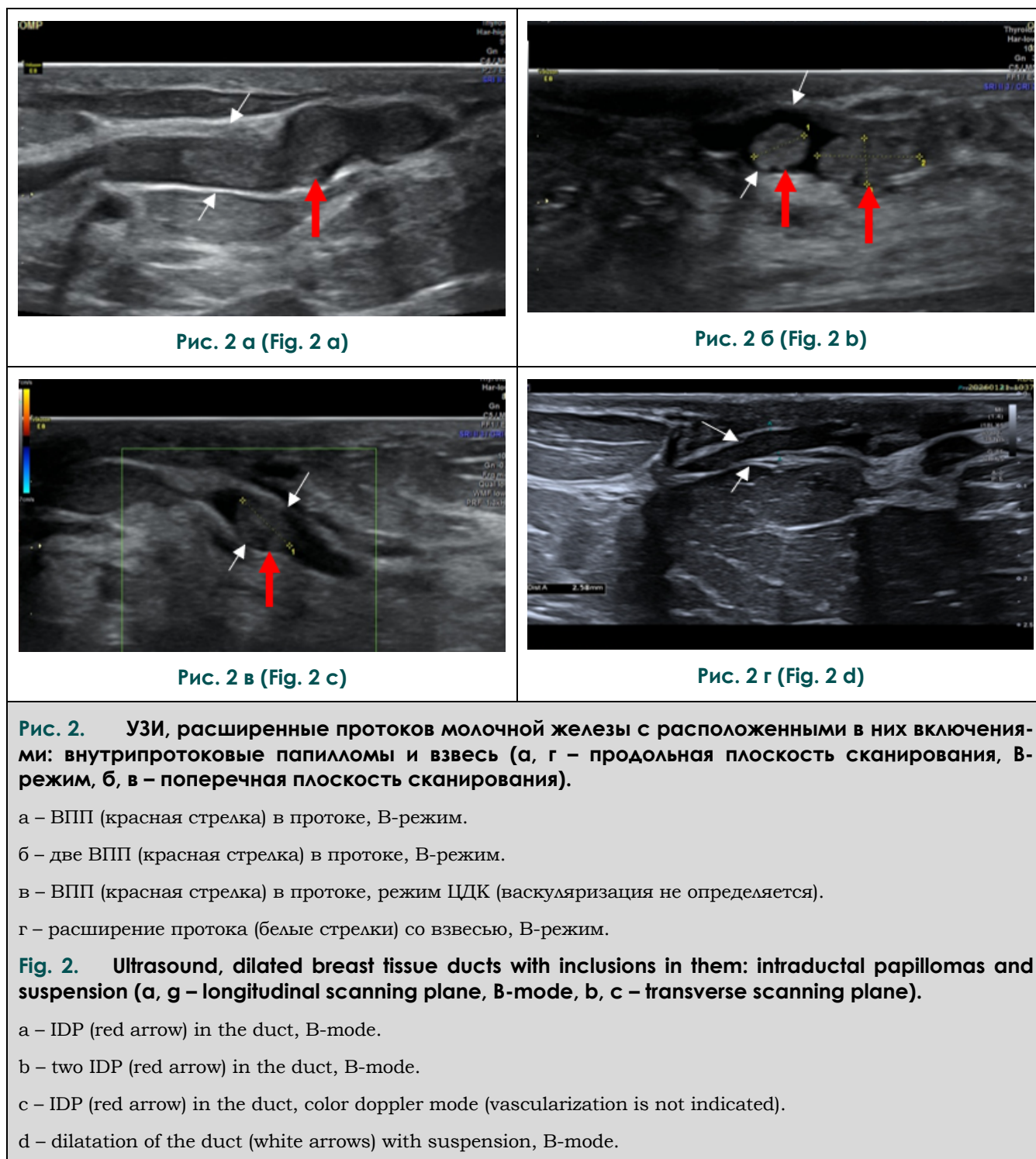
Схожие данные представлены Осанчук

Е.А. с соавт.: по результатам морфологической верификации образований, подозрительных на ВПП, ткань папилломы была подтверждена только в 46% случаев [4,8]. По данным Yilmaz R. С соавт., чувствительность УЗИ в диагностике ВПП была выше и составила 75%, а специфичность ниже – 66,7% [7]. Ханафиев Г.Х. с соавт., напротив, приводит показатели совпадения морфологической верификации ВПП и данных инструментальной диагностики в 91,4% случаев [24].

Такие различия в показателях чувствительности и специфичности УЗИ связаны с особенностями ультразвуковой картины ВПО, не являющейся абсолютно патогномичной для данной патологии. Можно выделить несколько факторов, приводящих к ошибочной интерпретации ультразвуковой картины. К ним относятся: малые размеры образования, затрудненные условия визуализации, расположение образования внутри ветвящегося протока, а также вариабельность ультразвуковых признаков в отношении картины непосредственно самого ВПО. Большое значение также имеют осмотр в надлежащий день менструального цикла и соблюдение методологии полипозиционного осмотра, а в ряде случаев – выполнение УЗИ в динамике. Высокая специфичность УЗИ, полученная в настоящем исследовании, по нашему мнению, обусловлена, в том числе, высоким диагностическим классом оборудования с широким спектром дополнительных режимов.

По нашим данным, наиболее типичным для ВПО УЗ-признаком следует считать расширение протока с наличием внутри эхогенного включения, что обнаружено у всех пациенток, у которых высказано предположение о наличии ВПП. Связь с протоком устанавливали в В-режиме путем полипозиционного сканирования в различных плоскостях (рис. 2 а, б). Локальная дуктоэктазия без наличия ВПО лоцировалась в виде равномерно расширенного анэхогенного, аваскулярного с четкими ровными контурами протока (рис. 2 г). Множественные ВПП по УЗ-картине напоминали цепочку, четки или гроздь винограда (рис. 2 б).

Более убедительным для наличия солидного ВПО следует считать наличие в нем кровотока. Кровоток в ВПО исследовали с помощью режимов ЦДК и микроциркуляции (SMI). В связи с малыми размерами ВПО васкуляризация в них в режиме ЦДК определяется крайне редко (рис. 2 в). Только в 30 % случаев нам удалось зафиксировать единичные сосуды в пристеночном солидном компоненте в режиме картирования микровас-



куляризации, позволяющем определить низкоскоростные потоки (рис. 3).

Немаловажную роль помимо разрешающих характеристик УЗ-сканера, играет возможность использования таких дополнительных режимов, как определение микрокальцинатов в режиме MicroPure и жесткости ткани ВПО в режиме эластографии. Каждый из дополнительных УЗ-режимов увеличивает диагностическую ценность УЗИ. В наших исследованиях в составе ткани ВПО

включения микрокальцинатов определяли только в 5 % случаев (рис. 4 а). В режиме компрессионной эластографии все выявленные ВПП были окрашены в теплые тона (мягкие образования) (рис. 4 б).

По данным Li T. с соавт., применение эластографии сдвиговой волны (SWE) позволило добиться чувствительности 91,2% и специфичности 84,7% УЗИ в диагностике ВПП [16]. Тек С. с соавт. приводят данные ROC-анализа о преимуществах метода де-

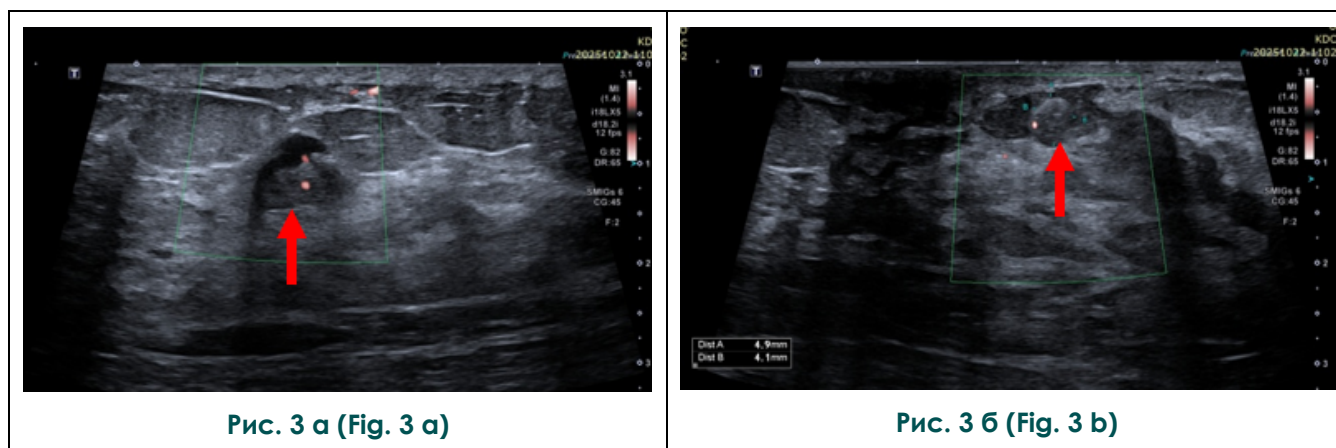


Рис. 3. УЗИ, режим SMI (а – поперечная плоскость сканирования, В-режим, б – продольная плоскость сканирования).

а, б – В ткани внутрипротоковых папиллом (красные стрелки) определяются единичные сосуды.

Fig. 3. US, SMI mode, (a – transverse scanning plane, B-mode, b – longitudinal scanning plane).

a, b – single vessels are identified in the tissue of intraductal papillomas (red arrows).

текции микроваскуляризации (площадь под кривой 0,842) перед энергетическим картированием (площадь под кривой 0,522) и цветовым доплеровским картированием (площадь под кривой 0,518) в дифференциальной диагностике ВПП и дуктоэктазии с плотным секретом, поскольку васкуляризация ВПП характеризуется наличием сосудов очень мелкого калибра с низкими скоростями кровотока, картировать которые в стандартном режиме ЦДК удастся редко [17]. Приведенные в настоящем исследовании примеры использования дополнительных режимов УЗИ подтверждают выводы коллег об их ценности в диагностике ВПП.

Безусловно, представленные выше ультразвуковые режимы повышают качество диагностики ВПО. Однако в 15 наблюдениях выявленные образования, верифицированные по данным морфологического исследования как ВПП, были описаны при УЗИ как фиброаденомы (рис. 4 б, 5 а), «сложные» кисты (рис. 5 б), очаги нарушения архитектоники либо новообразования с признаками злокачественности. Еще у 29 пациенток с подозрением при УЗИ на ВПО по результатам гистологического исследования данная патология не была подтверждена.

Визуальная грань между осложненной ВПП и злокачественным новообразованием очень тонкая, поскольку явления воспаления, кровоизлияния, некроза приводят к утолщению стенок протока, нечеткости его контуров. Особую ценность представляют ультразвуковые критерии потенциальной злокачественности, определяемые в стандартном

серошкальном В-режиме. По данным Kim W.H. с соавт., злокачественные ВПО имели тенденцию более полно заполнять проток или выходить за его пределы, и они чаще поражали ветви протока, чем доброкачественные [14]. Логично, что Oh J. с соавт. в группе злокачественных новообразований отмечали более высокие показатели BI-RADS, выставленные на основании пониженной эхогенности, неправильной формы, сложного кистозно-солидного строения, периферического расположения, наличия тени за образованием при УЗИ. Центральное расположение, полностью внутрипротоковая локализация, гипер/изоэхогенная плотность были характерны для доброкачественных образований [15].

В наших наблюдениях 1 из выявленных образований в В-режиме было представлено в виде опухоли с множественными сгруппированными микрокальцинатами, дающими яркое свечение в режиме MicroPure (рис. 6 а) и с крупным радиальным сосудом в режиме ЦДК (рис. 6 б). Образование было классифицировано как BI-RADS IVB и не было расценено как ВПО. Выявленная патология требовала проведения морфологической верификации, по результатам которой диагностировали ВПП, а после выполнения ВАБ-резекции – ВПП, ассоциированную с внутрипротоковой карциномой *in situ*. Таким образом, определяющим моментом в лечебно-диагностической тактике является стратификация риска выявленной патологии по BI-RADS, а не попытки более точного предположения генеза новообразования.

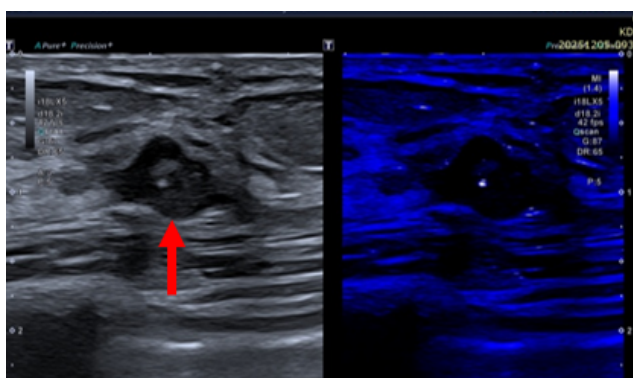


Рис. 4 а (Fig. 4 a)

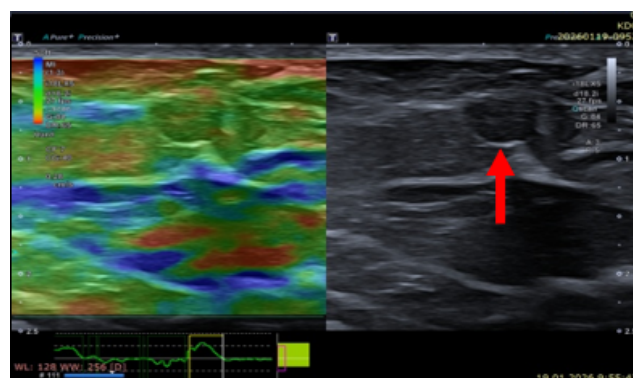


Рис. 4 б (Fig. 4 b)

Рис. 4. УЗИ, внутрипротоковая папиллома в режиме MicroPure и эластографии (а – В-режим + режим MicroPure, б – эластограмма ВПП + В-режим).

а – Ткань ВПП (красная стрелка) с гиперэхогенным включением – микрокальцинат (белая точка).

б – Ткань ВПП (красная стрелка) были окрашены в теплые тона.

Fig. 4. US, intraductal papillomas, MicroPure mode and elastogram mode (a – B-mode + MicroPure mode, b – elastogram of the IDP + B-mode).

a – IDP (red arrow) with hyperechoic inclusion – microcalcinate (white dot).

b – The IDP tissue (red arrow) was colored in warm tones.

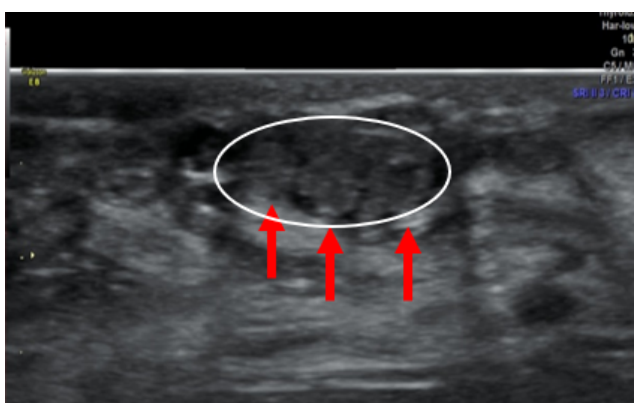


Рис. 5 а (Fig. 5 a)

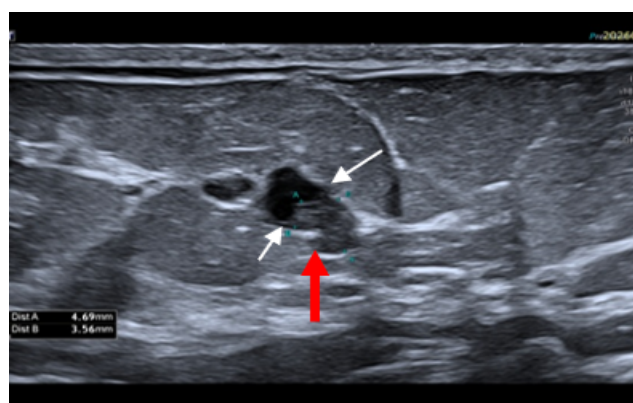


Рис. 5 б (Fig. 5 b)

Рис. 5. УЗИ, В-режим, внутрипротоковое образование (ВПО), имитирующее иную патологию молочной железы.

а – Три ВПП (красные стрелки) в протоке (белый овал).

б – ВПО (красная стрелка), имеющее вид кистозно-солидного образования. Белые стрелки – расширенные протоки.

Fig. 5. US, B-mode, intraductal lesion (IDL) mimicking another breast pathology.

a – three IDP (red arrows) in the duct (white oval).

b – IDL (red arrow), looks like a cystic-solid mass. White arrows – expanded ducts.

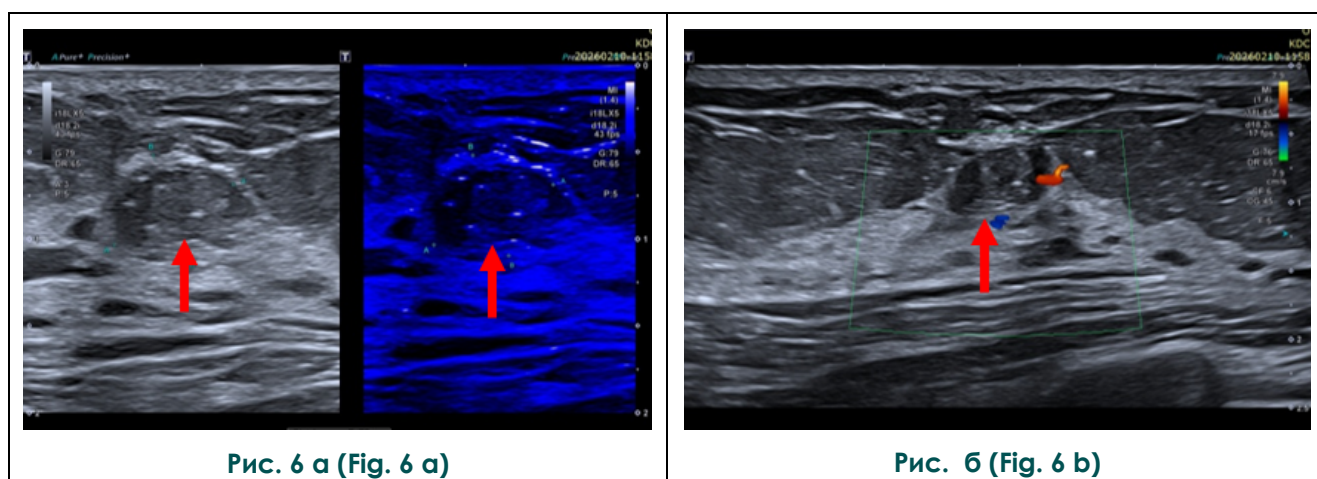


Рис. 6. УЗИ, новообразование молочной железы с множественными микрокальцинатами и крупным радиальным питающим сосудом, BI-RADS 4B (а – В-режим + режим MicroPure, б – режим ЦДК).

а – ВПП (красная стрелка) с микрокальцинатами, имитирующее солидное новообразование.

б – ВПП (красная стрелка) с питающим сосудом.

Fig. 6. US. Breast neoplasm with multiple microcalcifications and a large radial feeding vessel, BI-RADS 4B (а – B-mode + MicroPure mode, б – CDI mode).

а – IDP (red arrow) with microcalcifications, simulating a solid neoplasm.

б – IDP (red arrow) with a feeding vessel.

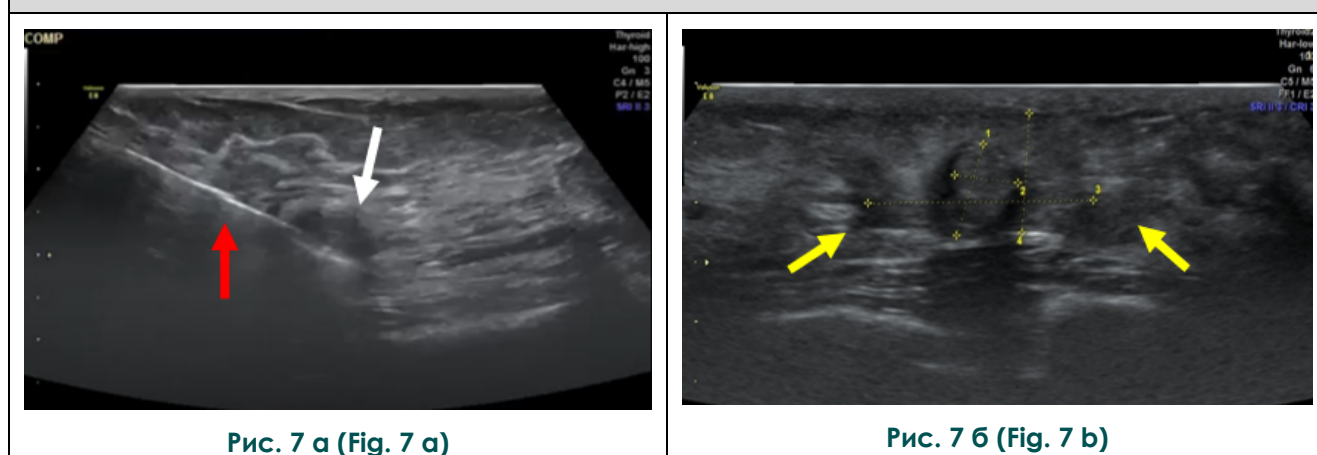


Рис. 7. УЗИ, В-режим. УЗ-навигация в процессе выполнения ВАБ-резекции и УЗ-картина рецидива ВПП после операции.

а – Момент присасывания вакуумом ткани ВПП (белая стрелка) к режущей апертуре роботизированной иглы (красная стрелка), от которой распространяется широкая тень.

б – УЗ-картина рецидива ВПП (желтые метки, цифры 1,2) в зоне фиброзных изменений железистой ткани (желтые метки, цифры 3,4) в области ранее выполненной ВАБ-резекции (желтые стрелки).

Fig. 7. US, B-mode. Ultrasound navigation during VAB resection and ultrasound image of recurrent IDP after surgery.

а – the moment of soakage of the IDP tissue (white arrow) by a vacuum to the cutting aperture of the robotic needle (red arrow), from which a wide shadow spreads.

б – ultrasound patterns of recurrent IDP (yellow labels, numbers 1,2) in the area of fibrous changes within the glandular tissue (yellow labels, numbers 3,4) in the area of the earlier performed VAB resection (yellow arrows).

Отечественные НКР диктуют хирургическую тактику в отношении ВПП в сторону оперативного лечения [1]. Зарубежная тактика имеет свои отличия: если ВПП с атипией в обязательном порядке направляется на хирургическое удаление, в отношении ВПП без атипии, по данным обзора литературы, представленного Calvillo K. с соавт., нет единого мнения, поскольку частота риска карциномы в этом случае широко варьирует от 0 до 33% [13]. Так, риск недооценки DCIS при ADH в материале биопсии составляет 20-30% при последующей операции [26]. Классическая открытая операция по удалению ВПО представлена секторальной резекцией, сопряженной со сложностью интраоперационного визуального контроля границ резекции протока, его несущего. В связи с этим ВАБ, выполняемая при постоянном визуальном контроле УЗИ, стала надежной и рекомендуемой альтернативой открытой хирургии [18, 19, 25].

На этапе малоинвазивного лечения УЗИ является неотъемлемой частью ВАБ [23], позволяя выполнить адекватную разметку протока, несущего ВПО, и достоверно удалить все его изгибы и пораженные ветви в пределах здоровых тканей на всем протяжении в режиме реального времени под визуальным контролем, тем самым добиться хороших отдаленных результатов (как косметических, так и в плане снижения вероятности рецидивов).

Нами были изучены отдаленные результаты оперативного лечения пациенток с морфологически подтвержденной ВПП путем ВАБ-резекции под контролем УЗИ в режиме реального времени. Из 46 таких пациенток на УЗИ в отдаленном послеоперационном периоде явились 30 женщин. УЗИ было выполнено с разной кратностью, но хотя бы одно из них – в сроки не менее 6 месяцев после операции. Рецидив либо остаточная ткань ВПП были выявлены у 3 пациенток (10%), по поводу чего у 2 были выполнены повторные операции. На рис. 7В представлена УЗ-картина рецидива ВПП в зоне ранее выполненной ВАБ-резекции. На фоне структурной неоднородности в зоне фиброзных изменений железистой ткани (область операции) определяется ограниченное изоэхогенное образование. Для операций при ВПП такой процент рецидива является достаточно низким показателем. Bonaventure T. с соавт. приводят данные о рецидиве морфологически подтвержденной ВПП у 2 из 13 пациенток (15%) после ВАБ-резекции [18]. Крупное ретроспективное исследование Lee S.H. с со-

авт. характеризует частоту рецидива ВПП после ВАБ-резекции в 8,9% (36 из 403 пациенток с морфологически подтвержденными ВПП) [26]. По данным Школьник А.Д. с соавт., предоперационная маркировка позволила повысить эффективность операций, связанных с иссечением тканей молочной железы, за счёт более точного определения зоны поражения, увеличив процент выявления ВПП с 6,2% без маркировки до 20% с её применением [22]. Приведенные данные свидетельствуют о ключевой роли УЗ-навигации в обеспечении хороших результатов малоинвазивной хирургии ВПП путем ВАБ-резекции, что позволяет в настоящее время расценивать ее как наиболее предпочтительную.

Заключение.

Внутрипротоковое образование (ВПО), обладая различными клиническими проявлениями, является диагностически сложной на всех этапах патологии: от инструментальных методов до морфологического исследования.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют, что на данном этапе развития основная роль УЗИ в первичной диагностике ВПО заключается в выявлении новообразования, подозрительного на него, а не в дифференциальной диагностике его конкретного генеза. УЗИ является скрининговым методом, позволяющим выявлять и классифицировать новообразования МЖ по системе BI-RADS для определения необходимости выполнения морфологической верификации. Именно в отношении ВПО возможности УЗИ ограничены такими факторами, как вариабельность ультразвуковой картины, малые размеры, зависимость от разрешающей способности оборудования, особенности условий визуализации по дням менструального цикла.

Вместе с тем УЗИ является оптимальным инструментом для предоперационной разметки и интраоперационной навигации в малоинвазивном лечении ВПО. Адекватная предоперационная разметка и контролируемое иссечение протока, содержащего новообразование, на всем протяжении, позволяют добиться низкой частоты рецидива и остаточной ткани.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Клинические рекомендации «Доброкачественная дисплазия молочной железы» от 2024 г. Утверждены Минздравом РФ. Доступно по: http://disuria.ru/_ld/9/996_kr20N60mz.pdf
2. Muttarak M, Lerttumnongtum P, Chaiwun B, Peh WC. Spectrum of papillary lesions of the breast: clinical, imaging, and pathologic correlation. *AJR Am J Roentgenol*. 2008;191(3):700-7. DOI: 10.2214/AJR.07.3483.
3. Troxell ML, Boulos F, Denkert C, Horii R et al. Intraductal papilloma. In: WHO classification of tumours editorial board. *Breast Tumours*, Lyon (France), International Agency for Research on Cancer (WHO classification of tumours series, 5th edn, vol 2), 2019: 52-56.
4. Оксанчук Е.А., Меских Е.В., Шерстнева Т.В., Клешина В.О., Эрштейн М.А. Возможности лучевого метода в диагностике внутрипротоковой папилломы. Вестник Российского научного центра рентгенорадиологии Минздрава России. 2019; 9 (4), 108-128. EDN JUVLVZ.
5. Kulka J, Madaras L, Floris G, Lax SF. Papillary lesions of the breast. *Virchows Arch*. 2022;480(1):65-84. DOI: 10.1007/s00428-021-03182-7.
6. Shah M, Batool M. Occult Ductal Carcinoma In Situ Presenting as Benign Papilloma: A Case of Diagnostic Evasion in Bloody Nipple Discharge. *Cureus*. 2025; 17(8): e90959. DOI:10.7759/cureus.90959.
7. Yilmaz R, Bender Ö, Çelik Yabul F, Dursun M, Tunacı M, Acun G. Diagnosis of Nipple Discharge: Value of Magnetic Resonance Imaging and Ultrasonography in Comparison with Ductoscopy. *Balkan Med J*. 2017;34(2):119-126. DOI: 10.4274/balkanmedj.2016.0184.
8. Оксанчук Е.А., Меских Е.В. Внутрипротоковая папиллома: диагностика и лечение. Вопросы онкологии. 2022; 68 (3): 95-96.
9. Mendelson E.B, Bohm-Velez M., Berg W.A., et al. ACR BI-RADS. Ultrasound, In: ACR BI-RADS. Atlas, Breast Imaging Reporting and Data System. Reston, VA, American College of Radiology; 2013.
10. Фисенко Е.П., Постнова Н.А., Ветшева Н.Н., Батухтина Е.В. Применение классификации BI-RADS при ультразвуковой мультипараметрической оценке образований молочной железы. Учебно-методическое пособие. М., Фирма СТРОМ, 2023. 112 с.
11. Система описания и обработки данных лучевых исследований молочной железы. Атлас: маммография, ультразвуковое исследование, магнитно-резонансная томография. Под ред. Профессора В.Е. Сеницына. М., ИД «Гэотар-Медиа», 2025. 416 с.
12. Gao L, Lai X, Zhang J, Jiang Y, Li J. Sonographic prediction of intraductal papillary carcinoma with partially cystic breast lesions. *BMC Med Imaging*. 2023;23(1):3. DOI: 10.1186/s12880-022-00934-y.
13. Calvillo K, Portnow L. Intraductal papillomas of the breast. *Annals of Breast Surgery*. 2021;5-24. DOI: 10.21037/abs-20-113.
14. Kim WH, Chang JM, Moon WK, Cho N, Yi A, Koo HR, Kim SJ. Intraductal mass on breast ultrasound: final outcomes and predictors of malignancy. *AJR Am J Roentgenol*. 2013;200:932-937. DOI: 10.2214/AJR.12.9093.
15. Oh J, Park JY. Clinicopathological and Imaging Features of Breast Papillary Lesions and Their Association with Pathologic Nipple Discharge. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(5):878. DOI: 10.3390/diagnostics13050878.
16. Li TT, Kang CS, Li HZ, Xue JP, Yang QM, Lyu J. Value of shear wave elastography image classification in the diagnosis of breast masses. *Zhonghua Zhong Liu Za Zhi*. 2019;41(7):540-545.
17. Tek C, Öztekin PS, Celepli P, Uçar F, Koşar PN. Using the Superb Microvascular Imaging Method in the Distinction of Intraductal Papilloma and Duct Ectasia With Secretion. *J Ultrasound Med*. 2021;40(2):269-277. DOI: 10.1002/jum.15396.
18. Bonaventure T, Cormier B, Lebas P, Bonneau C, Michenet Benign papilloma: is US-guided vacuum-assisted breast biopsy an alternative to surgical biopsy? *J Radiol*. 2007;88(9 Pt 1):1165-8. DOI: 10.1016/s0221-0363(07)89928-8.
19. Rubio IT, Wyld L, Marotti L, Athanasiou A, Regitnig P, Cattanuto G, Schoones JW, Zambon M, Camps J, Santini D, Dietz J, Sardanelli F, Varga Z, Smidt M, Sharma N, Shaaban AM, Gilbert F. European guidelines for the diagnosis, treatment and follow-up of breast lesions with uncertain malignant potential (B3 lesions) developed jointly by EUSOMA, EUSOBI, ESP (BWG) and ESSO. *Eur J Surg Oncol*. 2024;50(1):107292. DOI: 10.1016/j.ejso.2023.107292.
20. Chang JM, Han W, Moon WK, Cho N, Noh DY, Park IA, Jung EJ. Papillary lesions initially diagnosed at ultrasound-guided vacuum-assisted breast biopsy: rate of malignancy based on subsequent surgical excision. *Ann Surg Oncol*. 2011;18:2506-2514.
21. Гончаров А.В., Апанасевич В.И. Локальные изменения молочной железы после хирургического лечения внутрипротокового папилломатоза. Тихоокеанский медицинский журнал. 2017;1:64-65.
22. Школьник Л.Д., Фомин В.С., Федосейкин В.В. Анализ результатов предоперационной маркировки в диагностике и лечении внутрипротоковой патологии молочной железы. *Research'n Practical Medicine Journal*. 2018; 5 (Спецвыпуск 1): 100.
23. Марущак Е.А., Леванов А.В., Зубарева Е.А., Горский В.А., Глушков П.С. Особенности предоперационной разметки и навигации при выполнении вакуумной аспирационной биопсии новообразований молочных желез под контролем ультразвукового исследования. *REJR*. 2024; 14(2):43-56 DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-2-43-56/
24. Ханафиев Г.Х., Берзин С.А., Мальцева У.Ю., Мазур А.Е. Внутрипротоковые папилломы молочных желез. Вопросы патогенеза, лечения и профилактики внутрипротокового рака. *Опухоли женской репродуктивной системы*. 2011; 4: 42-45.
25. Christoph JR, Elizabeth AM, O'Flynn et al. First International Consensus Conference on lesions of uncertain malignant potential in the breast (B3 lesions) *Breast Cancer Res Treat*. 2016: 1-11. DOI 10.1007/s10549-016-3935-4.
26. Lee SH, Kim EK, Kim MJ et al. Ultrasound-guided vacuum-assisted excision of benign papilloma diagnosed on core biopsy: recurrence rate and factors, associated with recurrence. *Acta Radiol*. 2021; 62 (1):3-10.
27. American College of Radiology BI-RADS® v2025 Manual <https://www.acr.org/Clinical-Resources/Clinical-Tools-and-Reference/Reporting-and-Data-Systems/BI-RADS>.

References:

1. Clinical guidelines "Benign Breast Dysplasia" dated 2024. Approved by the Ministry of Health of the Russian Federation. Available at: http://disuria.ru/_ld/9/996_kr20N60mz.pdf (in Russian).
2. Muttarak M, Lerttumnongtum P, Chaiwun B, Peh WC. Spectrum of papillary lesions of the breast: clinical, imaging, and pathologic correlation. *AJR Am J Roentgenol*. 2008;191(3):700-7. DOI: 10.2214/AJR.07.3483.
3. Troxell ML, Boulos F, Denkert C, Horii R et al. Intraductal papilloma. In: WHO classification of tumours editorial board. *Breast Tumours*, Lyon (France), International Agency for Research on Cancer (WHO classification of tumours series, 5th edn, vol 2), 2019: 52-56.
4. Oksanchuk EA, Meskikh EV, Sherstneva TV, Kleshneva VO, Erstein MA. Possibilities of the radiation method in the diagnosis of Intraductal papilloma. *Bulletin of the Russian Scientific Center of Roentgenoradiology of the Ministry of Health of the Russian Federation*. 2019; 9 (4): 108-128 (in Russian).
5. Kulka J, Madaras L, Floris G, Lax SF. Papillary lesions of the breast. *Virchows Arch*. 2022;480(1):65-84. DOI: 10.1007/s00428-021-03182-7.
6. Shah M, Batool M. Occult Ductal Carcinoma In Situ Presenting as Benign Papilloma: A Case of Diagnostic Evasion in Bloody Nipple Discharge. *Cureus*. 2025; 17(8): e90959. DOI:10.7759/cureus.90959.
7. Yilmaz R, Bender Ö, Çelik Yabul F, Dursun M, Tunacı M, Acun G. Diagnosis of Nipple Discharge: Value of Magnetic Resonance Imaging and Ultrasonography in Comparison with Ductoscopy. *Balkan Med J*. 2017;34(2):119-126. DOI: 10.4274/balkanmedj.2016.0184.
8. Oksanchuk EA, Meskikh EV. Intraductal Papilloma: diagnostics and treatment. *Oncology Issues*. 2022; 68 (3): 95-96 (in Russian).
9. Mendelson EB, Bohm-Velez M, Berg WA., et al. ACR BI-RADS Ultrasound, In: ACR BI-RADS Atlas, Breast Imaging Reporting and Data System. Reston, VA, American College of Radiology; 2013.
10. Fisenko EP, Postnova NA, Vetsheva NN, Batukhtina EV. Application of the BI-RADS classification in the ultrasound multiparametric assessment of breast lesions. Educational and methodological guide. Moscow, STROM Firma, 2023. 112 p. (in Russian).
11. System for describing and processing data from breast radiological examinations. Atlas: Mammography, Ultrasonography, Magnetic Resonance Imaging. Edited by Professor V.E. Sinitsyn. Moscow: Geotar-Media, 2025. 416 p. (in Russian).
12. Gao L, Lai X, Zhang J, Jiang Y, Li J. Sonographic prediction of intraductal papillary carcinoma with partially cystic breast lesions. *BMC Med Imaging*. 2023;23(1):3. DOI: 10.1186/s12880-022-00934-y.
13. Calvillo K, Portnow L. Intraductal papillomas of the breast. *Annals of Breast Surgery*. 2021;5-24. DOI: 10.21037/abs-20-113.
14. Kim WH, Chang JM, Moon WK, Cho N, Yi A, Koo HR, Kim SJ. Intraductal mass on breast ultrasound: final outcomes and predictors of malignancy. *AJR Am J Roentgenol*. 2013;200:932-937. DOI: 10.2214/AJR.12.9093.
15. Oh J, Park JY. Clinicopathological and Imaging Features of Breast Papillary Lesions and Their Association with Pathologic Nipple Discharge. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(5):878. DOI: 10.3390/diagnostics13050878.
16. Li TT, Kang CS, Li HZ, Xue JP, Yang QM, Lyu J. Value of shear wave elastography image classification in the diagnosis of breast masses. *Zhonghua Zhong Liu Za Zhi*. 2019;41(7):540-545.
17. Tek C, Öztekin PS, Celepli P, Uçar F, Koşar PN. Using the Superb Microvascular Imaging Method in the Distinction of Intraductal Papilloma and Duct Ectasia With Secretion. *J Ultrasound Med*. 2021;40(2):269-277. DOI: 10.1002/jum.15396.
18. Bonaventure T, Cormier B, Lebas P, Bonneau C, Michenet Benign papilloma: is US-guided vacuum-assisted breast biopsy an alternative to surgical biopsy? *J Radiol*. 2007;88(9 Pt 1):1165-8. DOI: 10.1016/s0221-0363(07)89928-8.
19. Rubio IT, Wyld L, Marotti L, Athanasiou A, Regitnig P, Cattanuto G, Schoones JW, Zambon M, Camps J, Santini D, Dietz J, Sardarelli F, Varga Z, Smidt M, Sharma N, Shaaban AM, Gilbert F. European guidelines for the diagnosis, treatment and follow-up of breast lesions with uncertain malignant potential (B3 lesions) developed jointly by EUSOMA, EUSOBI, ESP (BWG) and ESSO. *Eur J Surg Oncol*. 2024;50(1):107292. DOI: 10.1016/j.ejso.2023.107292.
20. Chang JM, Han W, Moon WK, Cho N, Noh DY, Park IA, Jung EJ. Papillary lesions initially diagnosed at ultrasound-guided vacuum-assisted breast biopsy: rate of malignancy based on subsequent surgical excision. *Ann Surg Oncol*. 2011;18:2506-2514.
21. Goncharov AV, Apanasevich VI. Local changes in the mammary gland after surgical treatment of intraductal papillomatosis. *Pacific Medical Journal*. 2017; 1: 64-65 (in Russian).
22. Shkolnik LD, Fomin VS, Fedoseykin VV. Analysis of the results of preoperative marking in the diagnosis and treatment of intraductal pathology of the mammary gland. *Research'n Practical Medicine Journal*. 2018; 5 (Special Issue 1): 100 (in Russian).
23. Marushchak EA, Levanov AV, Zubareva EA, Gorsky VA, Glushkov PS. Features of preoperative marking and navigation during vacuum aspiration biopsy of breast neoplasms under ultrasound control. *REJR*. 2024; 14(2):43-56 DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-2-43-56 (in Russian).
24. Khanafiev GK, Berzin SA., Maltseva UY, Mazur AE. Intraductal papillomas of the mammary glands. Issues of pathogenesis, treatment, and prevention of Intraductal cancer. *Tumors of the Female Reproductive System*. 2011; 4: 42-45 (in Russian).
25. Christoph JR, Elizabeth AM, O'Flynn et al. First International Consensus Conference on lesions of uncertain malignant potential in the breast (B3 lesions) *Breast Cancer Res Treat*. 2016: 1-11. DOI 10.1007/s10549-016-3935-4.
26. Lee SH, Kim EK, Kim MJ et al. Ultrasound-guided vacuum-assisted excision of benign papilloma diagnosed on core biopsy: recurrence rate and factors, associated with recurrence. *Acta Radiol*. 2021; 62 (1):3-10.
27. American College of Radiology BI-RADS® v2025 Manual <https://www.acr.org/Clinical-Resources/Clinical-Tools-and-Reference/Reporting-and-Data-Systems/BI-RADS>.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАТКИ И ЭНДОМЕТРИЯ У ФЕРТИЛЬНЫХ РОЖАВШИХ ЖЕНЩИН АКТИВНОГО РЕПРОДУКТИВНОГО ВОЗРАСТА

Минашкина Е.В.^{1,2}, Ожогина Е.В.², Озерская И.А.³

1 – ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И. М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет), г. Москва, Россия.

2 – ООО «МедИнСервис», центр репродукции и генетики «Нова клиник», г. Москва, Россия.

3 – ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», г. Москва, Россия.

Оценить морфометрические и гемодинамические ультразвуковые параметры матки и эндометрия у фертильных рожавших женщин активного репродуктивного возраста (25-37 лет) в средней секреторной фазе менструального цикла.

Материалы и методы. Ретроспективное когортное описательное исследование включало 127 здоровых женщин 25-37 лет (паритет: 1-4), обследованных на 20-22 день цикла. Выполняли 2D/3D-трансвагинальное сканирование с 3D-доплерометрией. Объем эндометрия рассчитывали автоматически с помощью прикладной программы VOCAL. Анализировали объем матки, толщину и объем эндометрия, площадь эндометрия в коронарном сечении при 3D-реконструкции, васкуляризационные индексы (VI, FI, VFI) и пульсационный индекс (PI) маточных артерий, усредненную по времени скорость кровотока маточных артерий (Vmean). Статистический анализ включал описательную статистику, коэффициенты корреляции Спирмена и р-значения.

Результаты. Установлены нормативные значения ультразвуковых параметров матки и эндометрия у фертильных рожавших женщин в средней секреторной фазе менструального цикла. Средний объем матки составил $57,2 \pm 17,0$ см³, толщина эндометрия – $9,3 \pm 1,4$ мм, медианный объем эндометрия – $7,3$ см³. Васкуляризационные индексы эндометрия (VI, FI, VFI) имели медианные значения 10,7 %, 13,1 и 2,9 соответственно. Средняя скорость кровотока в маточных артериях (Vmean) составила $7,99 \pm 1,97$ см/с, а пульсационный индекс (PI) – $2,02 \pm 0,29$. Корреляционный анализ выявил тесную связь между объемом эндометрия и площадью полости матки ($\rho = 0,76$), а также согласованность васкуляризации в миометрии и эндометрии ($\rho = 0,65$). Повышение паритета сопровождалось увеличением объемных и сосудистых характеристик эндометрия, при стабильности PI, что может отражать морфофункциональную адаптацию после реализованной репродуктивной функции.

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют, что органометрические и гемодинамические параметры матки и эндометрия у фертильных рожавших женщин активного репродуктивного возраста в средней секреторной фазе отличаются высокой физиологической зрелостью и выраженной перфузией. В сравнении с популяционными данными, значения объема матки и эндометрия, а также васкуляризационные индексы оказались несколько выше, что может отражать морфофункциональную адаптацию, сформировавшуюся в результате реализованной репродуктивной функции. Установленные корреляции между морфометрическими и сосудистыми показателями подтверждают анатомо-функциональную интеграцию этих структур. Умеренное нарастание васкуляризации эндометрия с увеличением паритета подчёркивает потенциальное усиление рецептивного потенциала слизистой оболочки у женщин с множественными беременностями в анамнезе.

Заключение. Полученные референсные диапазоны восполняют пробел данных об ультразвуковых показателях у здоровых рожавших женщин и формируют надёжную клиническую базу для оценки рецептивности эндометрия, мониторинга состояния матки при подготовке к ЭКО. Данные могут быть использованы как референсные показатели в практической гинекологии и репродуктивной медицине.

Ключевые слова: эндометрий, матка, 3D-ультразвук, репродуктивное здоровье, васкуляризационные индексы.

Контактный автор: Минашкина Е.В., e-mail: as1199@list.ru

Для цитирования: Минашкина Е.В., Ожогина Е.В., Озерская И.А. Ультразвуковые параметры матки и эндометрия у фертильных рожавших женщин активного репродуктивного возраста. REJR 2026; 16(1):65-79. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-65-79.

Статья получена: 11.07.25

Статья принята: 03.09.25

ULTRASOUND PARAMETERS OF THE UTERUS AND ENDOMETRIUM IN FERTILE PAROUS WOMEN OF ACTIVE REPRODUCTIVE AGE

Minashkina E.V.^{1,2}, Ozhogina E.V.², Ozerskaya I.A.³

1 - Sechenov University.

2 - Nova Clinic Reproduction and Genetics Center.

3 - Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia. Moscow, Russia.

To assess morphometric and hemodynamic ultrasound parameters of the uterus and endometrium in fertile parous women of active reproductive age (25-37 years) during the mid-secretory phase of the menstrual cycle.

Materials and methods. This retrospective cohort descriptive study included 127 healthy women aged 25-37 years (parity: 1-4), examined on days 20-22 of the menstrual cycle. All participants underwent 2D/3D transvaginal ultrasound with 3D power Doppler imaging. Endometrial volume was automatically calculated using the VOCAL software. The following parameters were analyzed: uterine volume, endometrial thickness and volume, endometrial area in the coronal plane (via 3D reconstruction), vascularization indices (VI, FI, VFI), pulsatility index (PI) of the uterine arteries, and time-averaged mean velocity (Vmean) of blood flow in the uterine arteries. Statistical analysis included descriptive statistics, Spearman's correlation coefficients, and p-values.

Results. Normative ultrasound parameters were established for fertile parous women in the mid-secretory phase of the menstrual cycle. The mean uterine volume was $57.2 \pm 17.0 \text{ cm}^3$, endometrial thickness was $9.3 \pm 1.4 \text{ mm}$, and the median endometrial volume was 7.3 cm^3 . The median vascularization indices of the endometrium (VI, FI, VFI) were 10.7%, 13.1, and 2.9, respectively. The mean blood flow velocity (Vmean) in the uterine arteries was $7.99 \pm 1.97 \text{ cm/s}$, and the pulsatility index (PI) was 2.02 ± 0.29 . Correlation analysis revealed a strong association between endometrial volume and uterine cavity area ($\rho = 0.76$), as well as synchronized vascularization of the myometrium and endometrium ($\rho = 0.65$). An increase in parity was associated with higher volumetric and vascular parameters of the endometrium, while PI remained stable, suggesting morphofunctional vascular adaptation after completed pregnancies.

Discussion. The obtained results demonstrate that the morphometric and hemodynamic characteristics of the uterus and endometrium in fertile parous women during the mid-secretory phase are indicative of high physiological maturity and pronounced perfusion. Compared to population data, uterine and endometrial volumes and vascular indices were slightly elevated, likely reflecting morphofunctional adaptation following completed reproductive cycles. The identified correlations between morphometric and vascular parameters support the anatomical and functional integration of these structures. A moderate increase in endometrial vascularization with higher parity highlights a potentially enhanced receptivity of the endometrium in women with multiple pregnancies.

Conclusion. The derived reference ranges address the gap in data on ultrasound parameters in healthy parous women and offer a reliable clinical basis for evaluating endometrial receptivity and uterine status during in vitro fertilization preparation. These findings can serve as reference indicators in practical gynecology and reproductive medicine.

Keywords: endometrium, uterus, 3D ultrasound, reproductive health, vascularization indices.

Corresponding author: Minashkina E.V., e-mail: as1199@list.ru

For citation Minashkina E.V., Ozhogina E.V., Ozerskaya I.A. Ultrasound parameters of the uterus and endometrium in fertile parous women of active reproductive age. REJR 2026; 16(1):65-79. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-65-79.

Received: 11.07.25

Accepted: 03.09.25

Ультразвуковая визуализация органов малого таза занимает центральное место в современной гинекологической диагностике. Благодаря своей неинвазивности, доступности и высокой информативности, ультразвуковое исследование позволяет комплексно оценивать состояние матки, эндометрия и сосудистых структур, что особенно важно в контексте репродуктивного здоровья женщин. Развитие ультразвуковых технологий, в том числе 3D-реконструкции, цветного и энергетического доплеровского картирования, существенно расширило диагностические возможности в оценке органометрических и гемодинамических характеристик репродуктивных органов.

Современная клиническая практика требует наличия стратифицированных референсных значений, отражающих анатомо-функциональную норму с учётом фазы менструального цикла, возраста и паритета. Большое внимание изучению гемодинамики в различных возрастных периодах и фазах менструального цикла уделила Озерская И.А. [1]. Однако большая часть существующих исследований включает гетерогенные выборки, не стратифицированные по ключевым физиологическим характеристикам: репродуктивный анамнез, фаза цикла, наличие патологии. Это ограничивает клиническую применимость полученных данных и снижает их ценность при интерпретации конкретных ультразвуковых показателей.

Особенно мало работ, охватывающих исключительно фертильных рожавших женщин активного репродуктивного возраста. Между тем именно эта группа представляет собой клинический эталон – со сформированным гинекологическим анамнезом, устойчивыми гормональными циклами и полноценной реализацией репродуктивной функции.

В одном из крупнейших ультразвуковых исследований нормальных параметров у китайских женщин приведены значения объёма и линейных размеров матки, однако не учитывался паритет [2]. В работе Агуа и соавт. (2021) также описаны размеры матки у женщин репродуктивного возраста, но отсутствует стратификация по фазе цикла и оценка васкуляризации [3].

Объём матки, площадь полости, толщина и объём эндометрия, как и показатели васкуляризации: vascularization index (VI), flow index (FI), vascularization-flow index (VFI), могут значительно варьировать в зависимо-

сти от фазы цикла. Особенно актуальна средняя секреторная фаза (20-22 день), при которой эндометрий достигает функционального максимума, утолщается, демонстрирует активную перфузию и становится наиболее рецептивным к имплантации.

Гемодинамические параметры, определяемые методом объёмной доплерометрии, дают возможность количественного анализа микрососудистой сети эндометрия и субэндометриальной зоны. Эти показатели активно используются при оценке рецептивности и прогнозировании наступления беременности в протоколах ВРТ [4, 5].

Одновременно важную информацию предоставляет доплерометрия маточных артерий (МА), в частности пульсационный индекс (PI). Более высокие значения PI отражают повышенное сосудистое сопротивление, ассоциированное с ухудшением перфузии эндометрия и снижением вероятности имплантации [6]. Одним из критериев оценки готовности женщины к имплантации эмбриона является усреднённая по времени скорость кровотока маточных артерий (Vmean). В работе Озерской И.А. и соавт. (2024) показано, что Vmean является более чувствительным критерием, чем PI маточных артерий, что также косвенно подтверждают в своём исследовании Chien и соавт. (2002) [7, 8].

Работа Bahrami F. и соавт. (2023) подчёркивает значимость комплексной оценки PI, VI и VFI при обследовании женщин с бесплодием [9]. В метаанализах Wu и соавт. (2023) и Wang и соавт. (2018) была показана высокая прогностическая значимость перфузионных индексов (VI, FI, VFI) для оценки рецептивности эндометрия при ЭКО [10, 11]. При этом указывается на значительную гетерогенность популяционного состава и методов измерений, что затрудняет формирование универсальных референсных значений.

Таким образом, проведение стандартизированного исследования, включающего исключительно здоровых рожавших женщин в средней секреторной фазе менструального цикла с применением современных методик 2D/3D УЗИ и доплерометрии, позволяет восполнить существующий пробел и сформировать надёжную информационную платформу для клинической репродуктивной практики, создавая ультразвуковой «портрет» репродуктивно здоровой женщины.

Материалы и методы.

Дизайн исследования и характеристики выборки.

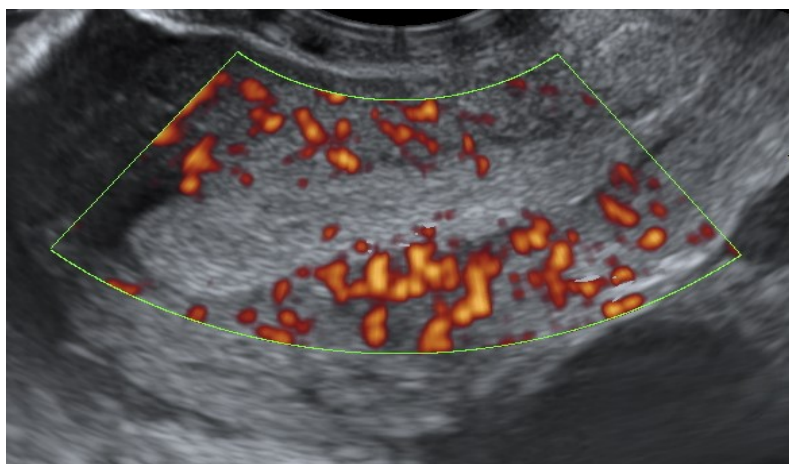


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. 2D-ТВУЗИ, сагиттальное сечение матки, дополненное энергетическим доплеровским картированием.

Средняя секреторная фаза менструального цикла. Характеризуется повышенной, однородной эхогенностью эндометрия. Срединная линия визуализируется нечётко, фрагментарно. Васкуляризация эндометрия и субэндометриальной зоны равномерная, но спиральные сосуды не доходят до срединной линии (здесь и далее оригинальные иллюстрации авторов, 2026 г.).

Fig. 1. 2D TVUS, sagittal section of the uterus, complemented by power Doppler imaging.

Mid-secretory phase of the menstrual cycle. Characterized by increased, homogeneous echogenicity of the endometrium. The midline appears indistinct and fragmented. Vascularization of the endometrium and sub-endometrial zone is uniform, but spiral arteries do not reach the midline (here and throughout, all figures are original illustrations by authors, 2026).

Проведено ретроспективное, когортное описательное исследование, направленное на определение органометрических и гемодинамических ультразвуковых параметров матки и эндометрия у фертильных рожавших женщин, наблюдавшихся в Центре репродукции и генетики «Нова Клиник» в период с 2021 по 2025 год. В исследование были включены 127 женщин в возрасте 25-37 лет с регулярным менструальным циклом (26-32 дня) и подтверждённой средней секреторной фазой (20-22 день по менструальному календарю и ультразвуковой картине эндометрия). Все участницы имели минимум одну беременность с доношенными родами в анамнезе и не принимали гормональные препараты в течение трёх месяцев до исследования.

Критерии включения: возраст 25-37 лет; роды в анамнезе (≥ 1); регулярный менструальный цикл; средняя секреторная фаза (20-22 день); отсутствие жалоб и гинекологической патологии (рис. 1).

Критерии исключения: использование гормональных препаратов в течение 3 месяцев; наличие внутриматочной спирали; нарушения цикла, эндокринные расстройства, миома, эндометриоз; анамнез операций

на матке и яичниках.

Исследование проводилось в соответствии с принципами Хельсинкской декларации. Все участницы дали письменное информированное согласие. Протокол одобрен локальным этическим комитетом.

Методика ультразвукового исследования.

Все исследования проводились в утренние часы при пустом мочевом пузыре. Выполнялось трансвагинальное 2D- и 3D-ультразвуковое исследование органов малого таза с использованием ультразвуковой системы GE Women's Health Care Voluson E8 (США) с трансвагинальным датчиком частотой 7,5-9,0 МГц. Протокол включал В-режим, цветное доплеровское картирование и импульсно-волновую доплерометрию (PW), а также объемное 3D-сканирование.

Оценивались органометрические параметры (толщина, объем и площадь эндометрия в коронарном сечении, объем матки) и сосудистые показатели (васкуляризационные индексы матки и эндометрия, доплерометрия маточных артерий).

Измеряемые параметры.

Исследование кровотока в матке начи-

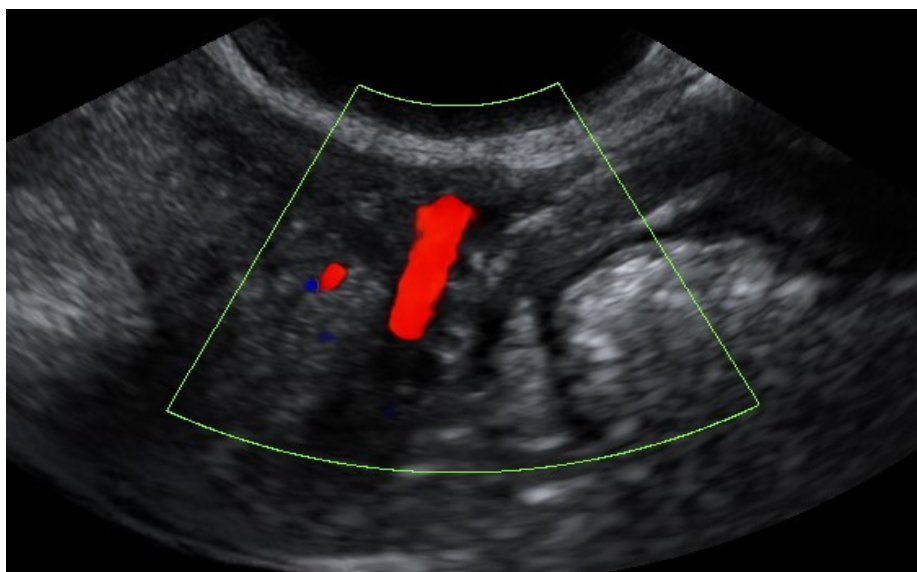


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. УЗИ.

Визуализация маточной артерии на уровне перешейка матки, по боковой поверхности. Монохромный поток свидетельствует о правильной настройке скоростной шкалы.

Fig. 2. Ultrasound.

Visualization of the uterine artery at the level of the uterine isthmus, along the lateral border. The monochromatic Doppler signal indicates correct velocity scale settings.

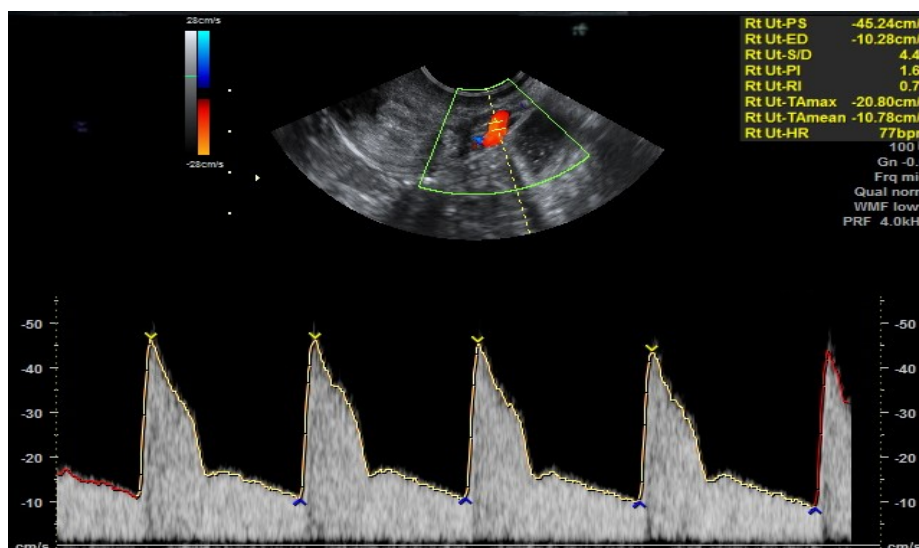


Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. УЗИ.

Допплерометрия маточной артерии с учётом угла инсонации, соблюдением развертки до 5 циклов на экране монитора и автоматической трассировкой кривой спектра кровотока.

Fig. 3. Ultrasound.

Doppler assessment of the uterine artery with insonation angle control, sweep display of up to 5 cardiac cycles, and automatic spectral curve tracing.

нали с маточных артерий на уровне перешейка (рис. 2). Допплерометрия проводилась с углом инсонации от 0 до 30°, с разверткой до 5 сердечных циклов на экране. Автоматическая трассировка спектра позволяла получить значения средней по времени скорости кровотока (TAMn, см/с) и пульсационного индекса (PI). Показатели усреднялись по обеим маточным артериям (рис. 3).

При 3D-доплерометрии использовался угол захвата 120°, шаг поворота изображения при оконтуривании – 9°, частота повторения импульсов – 0,6 kHz. Были проведены измерения объема матки, объема эндометрия и площади эндометрия в коронарном сечении с последующим расчетом скорректированного объема эндометрия (отношение объема слизистой оболочки к объему тела матки, в %). С помощью прикладной программы VOCAL рассчитывались васкуляризационные индексы: VI (васкуляризационный индекс), FI (поточный индекс), VFI (васкуляризационно-поточный индекс) как для матки, так и для эндометрия (рис. 4-6).

Статистический анализ.

Анализ данных проводился с использованием Microsoft Excel 2019 и SPSS Statistics v.26.0. Использовалась описательная статистика (среднее, стандартное отклонение, медиана, 25-75%). Нормальность распределения проверялась критерием Шапиро-Уилка. Для оценки корреляций применялся коэффициент Спирмена (ρ). Статистическая значимость различий оценивалась по критерию Стьюдента; значения $p < 0,05$ считались статистически значимыми. Результаты визуализировались в виде диаграмм рассеяния и корреляционной тепловой карты.

Результаты.

Общая характеристика выборки.

Участницы исследования имели средний возраст $31,0 \pm 3,4$ лет и нормальный индекс массы тела ($23,1 \pm 2,7$ кг/м²). В подавляющем большинстве случаев в анамнезе женщин было две беременности, причём медианные значения аборт, выкидышей и внематочных беременностей составляли 0. Таким образом, исследуемая выборка характеризуется благополучным репродуктивным анамнезом. Наиболее частыми были 1-2 доношенные беременности, причём случаи кесарева сечения или осложнённого течения беременности встречались эпизодически. Это дополнительно подтверждает, что выборка представляет собой клинически стабильную популяцию рожавших женщин без выраженных акушерских осложнений (табл. №1).

Органометрические показатели.

Показатели объема матки, толщины и

объёма эндометрия, площади полости, а также скорректированного объема эндометрия представлены в таблице №2. Все значения отражают фазу функционального максимума слизистой оболочки и характеризуются умеренной вариабельностью в пределах физиологической нормы. У большинства женщин регистрировались отчётливо выраженные морфологические признаки зрелого секреторного эндометрия в сочетании с увеличенными объёмными характеристиками матки.

Гемодинамические параметры.

Результаты доплерометрии демонстрируют активную васкуляризацию матки и эндометрия в исследуемую фазу цикла. В таблице №3 приведены средние значения индексов VI, FI и VFI как для миометрия, так и для эндометрия, а также показатели пульсационного индекса (PI) и средней скорости кровотока (V_{mean}) в маточных артериях. Обнаруженные значения соответствуют физиологической норме и подтверждают высокую степень перфузии слизистой оболочки, характерную для средней секреторной фазы.

Влияние паритета.

Интересным оказался многофакторный анализ, проведённый с учётом количества предыдущих родов. По мере увеличения паритета наблюдалось закономерное повышение возраста и индекса массы тела женщин. Кроме того, с нарастанием числа родов увеличивались такие параметры, как объём матки, объём и площадь эндометрия, а также скорректированный объём слизистой оболочки. При этом показатели васкуляризации эндометрия (VI и FI) также демонстрировали тенденцию к росту. Показатель PI, напротив, оставался стабильным, не демонстрируя выраженной динамики. Полученные данные могут свидетельствовать о морфофункциональной адаптации сосудистой сети эндометрия и матки на фоне повторных беременностей и родов (табл. №4).

Корреляционный анализ.

Корреляционный анализ выявил ряд статистически значимых взаимосвязей между ультразвуковыми параметрами. Наиболее выраженная положительная связь установлена между объёмом эндометрия и площадью полости матки ($\rho = 0,76$; $p < 0,001$), что ожидаемо и физиологически обосновано. Кроме того, чёткие положительные корреляции наблюдались между VI и VFI матки ($\rho = 0,73$), а также между VI и FI эндометрия ($\rho = 0,64$) и FI и VFI эндометрия ($\rho = 0,61$). Также необходимо отметить значимую корреляцию между VI матки и VI эндометрия ($\rho = 0,65$), что может указывать на согласованное развитие

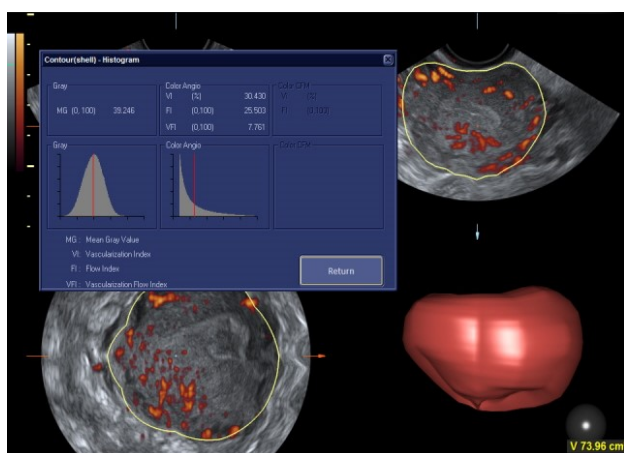


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. УЗИ.

С помощью прикладной программы VOCAL рассчитаны васкуляризационные индексы: VI, FI и VFI матки и её объём. Стрелкой показаны высокие значения васкуляризационных индексов матки.

Fig. 4. Ultrasound.

Using the VOCAL software, vascularization indices (VI, FI, and VFI) of the uterus and uterine volume were calculated. The arrow indicates elevated vascularization values of the uterine wall.



Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. УЗИ.

С помощью прикладной программы VOCAL рассчитаны васкуляризационные индексы: VI, FI и VFI эндометрия и его объём.

Fig. 5. Ultrasound.

Using the VOCAL software, vascularization indices (VI, FI, and VFI) and the volume of the endometrium were calculated.



Рис. 6 (Fig. 6)

Рис. 6. УЗИ.

3D-поверхностная реконструкция полости матки в коронарном сечении. Проведено оконтуривание полости матки по наружному краю с автоматическим расчётом площади.

Fig. 6. Ultrasound.

3D surface reconstruction of the uterine cavity in the coronal plane. The cavity was contoured along the outer margin with automatic area calculation.

Таблица №1. Репродуктивный анамнез.

	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	25–75%	Диапазон
Возраст (лет)	31,02	3,42	31,0	28,0-34,0	25,0-37,0
Индекс массы тела (ИМТ) кг/м ²	23,14	2,69	23,2	20,9-24,9	17,3-34,5
Беременностей	2,38	1,27	2,0	1,0-3,0	1,0-7,0
Аборт	0,15	0,54	0,0	0,0-0,0	0,0-4,0
Выкидышей	0,06	0,23	0,0	0,0-0,0	0,0-1,0
Эктопических беременностей	0,03	0,18	0,0	0,0-0,0	0,0-1,0
Родов	2,14	1,01	2,0	1,0-3,0	1,0-4,0
Кесаревых сечений	0,21	0,41	0,0	0,0-0,0	0,0-1,0

Таблица №2. Органометрические показатели матки и эндометрия.

	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	25–75%	Диапазон
Объём матки, см ³	57,24	17,02	52	45,3-67,6	29,5-101,0
Толщина эндометрия, мм	9,33	1,42	9	8,2-10,2	7,0-13,0
Объём эндометрия, см ³	7,39	2,4	7,3	5,8-9,0	3,5-13,0
Площадь полости, см ²	7,96	2,06	7,69	6,55-9,32	4,5-12,7
Скорректированный объём эндометрия, %	13,52	4,95	12,54	10,3-15,45	6,5-32,35

Таблица №3. Гемодинамические показатели матки и эндометрия.

	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	25–75%	Диапазон
VI матки, %	24,18	8,56	22,6	18,6-25,9	8,0-52,4
FI матки	25,06	3,36	25,2	23,2-26,8	17,6-39,6
VFI матки	9,07	3,47	8,7	7,7-10,3	1,9-20,0
VI эндометрия, %	12,01	4,28	10,7	9,5-12,55	1,04-24,0
FI эндометрия	14,62	3,75	13,1	11,45-17,1	10,2-25,9
VFI эндометрия	3,28	1,32	2,9	2,55-3,6	1,9-10,5
Средний Vmean MA, см/с	7,99	1,97	8,15	6,52-9,32	3,13-13,5
Средний PI MA	2,02	0,29	1,95	1,85-2,2	1,15-2,9

Таблица №4. Многофакторный анализ по паритету*.

Количество родов	1	2	3	4
Возраст (лет)	28,0 26,0-31,0 25-37	32,0 28,25-33,0 26-37	32,0 31,0-34,0 26-37	34,0 32,5-35,5 29-37
Индекс массы тела (ИМТ), кг/м²	22,7 20,7-24,6 19,0-34,5	23,1 21,0-24,7 17,3-27,8	22,8 20,7-24,7 18,6-28,7	24,3 23,0-27,25 20,0-30,0
Объем матки, см³	48,0 42,5-52,0 33,3-90,0	60,6 48,8-69,5 34,0-101,0	56,8 44,2-76,5 29,5-99,2	63,1 51,55-69,0 42,5-87,0
Объем эндометрия, см³	4,5 3,9-6,1 3,5-7,8	8,4 7,6-10,25 5,3-13,0	8,0 6,8-9,2 5,9-12,5	8,1 6,35-9,6 5,58-13,0
Площадь полости матки, см²	6,7 6,1-7,69 4,5-10,7	8,5 7,4-10,38 4,9-11,95	7,9 6,7-10,5 4,8-12,7	7,7 6,72-9,69 4,5-12,2
Скорректированный объем эндометрия, %	10,05 8,12-13,0 6,5-15,61	14,39 10,96-18,47 6,78-29,41	13,79 11,34-19,51 7,96-32,35	13,65 11,81-15,16 8,43-19,35
VI матки, %	21,0 18,2-25,3 10,6-29,0	25,0 20,02-31,45 10,6-49,9	22,0 19,3-25,3 8,0-52,4	22,6 18,55-29,2 16,0-52,4
FI матки	25,0 22,5-26,8 17,6-29,7	25,2 23,48-26,95 17,6-39,6	25,2 23,4-26,4 19,1-32,2	24,8 21,85-27,55 17,6-32,2
VFI матки	8,6 7,9-10,3 2,9-17,0	9,0 7,72-10,6 2,9-20,0	8,7 5,9-9,4 1,9-20,0	8,3 7,15-11,3 4,2-17,8
VI эндометрия, %	9,7 9,0-10,7 7,4-18,4	11,8 9,77-17,68 1,04-24,0	10,7 9,5-12,5 7,4-22,7	12,5 9,05-19,75 7,9-21,1
FI эндометрия	12,8 11,5-15,2 10,3-19,6	15,25 12,1-18,55 10,3-23,8	12,9 10,8-17,0 10,3-23,8	15,5 12,55-20,3 10,2-25,9
VFI эндометрия	2,8 2,7-3,0 1,9-4,8	3,0 2,52-4,28 1,9-9,0	2,8 2,5-3,5 1,9-7,4	3,2 2,55-3,9 1,9-10,5
Средний Vmean MA, см/с	7,35 6,1-8,65 4,6-10,9	8,02 6,99-9,98 3,75-13,5	8,6 6,54-9,5 5,4-13,1	8,45 6,68-9,48 3,13-11,3
Средний PI MA	1,95 1,85-2,2 1,55-2,6	2,05 1,85-2,2 1,15-2,7	1,95 1,8-2,3 1,28-2,7	2,05 1,78-2,25 1,28-2,9

*численные значения представлены: первая строка – медиана; вторая строка – 25-75 процентиль; третья строка – минимальное и максимальное значение.

сосудистого русла этих структур в исследуемую фазу цикла.

Наряду с этим, были выявлены умеренные взаимосвязи: между толщиной и объёмом эндометрия ($\rho=0,44$), а также между объёмом эндометрия и его васкуляризацией по индексу VI ($\rho=0,36$). Обратная корреляция между объёмом матки и пульсационным индексом ($\rho=-0,23$) может отражать снижение сосудистого сопротивления у женщин с более крупными размерами матки (табл. №5).

торной фазе менструального цикла объём матки, площадь и объём эндометрия находятся в пределах физиологической нормы, но превышают среднестатистические значения, представленные в ряде популяционных исследований. Это может быть связано с реализованной репродуктивной функцией и отсутствием патологий, влияющих на размеры органа.

Так, в крупном исследовании, проведённом Chen и соавт. (2023), объём матки в

Таблица №5. Статистически значимые корреляции между параметрами.

Параметры	Коэффициент корреляции (ρ)	P	Интерпретация
Объём эндометрия – Площадь полости	0,76	<0,001	Пропорциональная зависимость объёма эндометрия от площади полости
VI матки – VFI матки	0,73	<0,001	Согласованность между плотностью сосудистого русла и совокупным кровотоком матки
VI матки – VI эндометрия	0,65	<0,001	Параллельная активность гемодинамики в миометрии и эндометрии
VI эндометрия – FI эндометрия	0,64	<0,001	Сопряжённость сосудистой насыщенности и интенсивности кровотока в эндометрии
FI эндометрия – VFI эндометрия	0,44	<0,001	Взаимосвязь между количественным и потоковым индексами кровоснабжения эндометрия
Толщина эндометрия – Объём эндометрия	0,44	<0,001	Морфологическая зависимость между толщиной и объёмом эндометрия
Объём эндометрия – VI эндометрия	0,36	<0,001	Влияние сосудистой плотности на объёмное развитие эндометрия
PI маточных артерий – Объём матки	-0,23	0,01	Умеренное снижение периферического сопротивления при увеличении объёма матки

Графическая иллюстрация ключевых корреляций представлена на рисунках 7-10, где последовательно показаны: связь между объёмом эндометрия и площадью полости матки, взаимосвязь VI и VFI матки, VI матки и эндометрия, а также FI и VFI эндометрия (рис. 7-10). Сводная тепловая карта всех коэффициентов корреляции представлена на рисунке 11.

Обсуждение.

Сравнение органометрических параметров.

Результаты исследования показали, что у фертильных рожавших женщин активного репродуктивного возраста в средней секре-

возрастной группе 25-35 лет составлял в среднем $47,4 \text{ см}^3$, в то время как в нашем исследовании этот показатель достигал более высоких значений [2]. Следует отметить, что выборка Chen и соавт. не была стратифицирована по паритету, что может объяснять различие. Также в исследовании Агуа и соавт. (2021) указаны усреднённые размеры тела матки без учёта фазы цикла, что ограничивает возможность прямого сопоставления [3].

Отличительной особенностью нашего исследования стало включение 3D- реконструкции площади полости и объёма эндометрия – параметров, редко используемых в

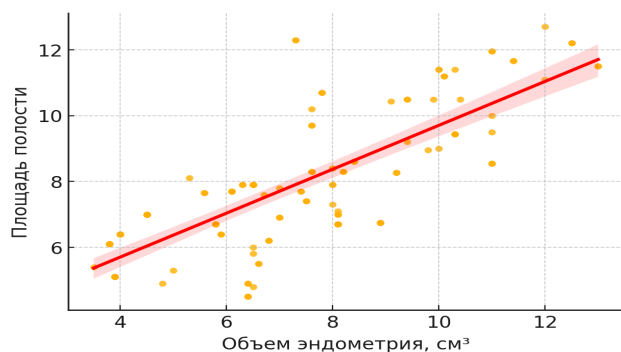


Рис. 7 (Fig. 7)

Рис. 7. Диаграмма.

Диаграмма рассеяния, иллюстрирующая прямую зависимость между объёмом эндометрия и площадью полости матки ($\rho = 0,76$; $p < 0,001$). График демонстрирует геометрически обусловленную линейную тенденцию увеличения объёма слизистой оболочки с ростом ёмкости полости матки.

Fig. 4. Diagram.

Scatter plot showing a strong direct correlation between endometrial volume and uterine cavity area ($\rho = 0.76$; $p < 0.001$). The graph illustrates a geometrically determined linear increase in endometrial volume with larger cavity capacity.

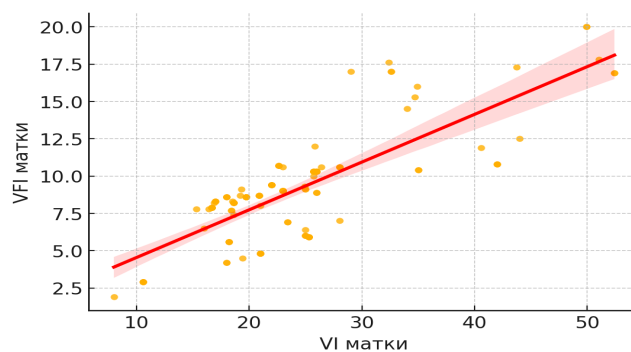


Рис. 8 (Fig. 8)

Рис. 8. Диаграмма.

Диаграмма рассеяния, демонстрирующая сильную положительную корреляцию между васкуляризационным индексом (VI) и васкуляризационно-потокным индексом (VFI) матки ($\rho = 0,73$; $p < 0,001$). Наблюдается линейная взаимосвязь между плотностью сосудистой сети и интенсивностью перфузии органа.

Fig. 8. Diagram.

Scatter plot demonstrating a strong positive correlation between the uterine vascularization index (VI) and vascularization-flow index (VFI) ($\rho = 0.73$; $p < 0.001$). A linear relationship is observed between vessel density and organ perfusion intensity.

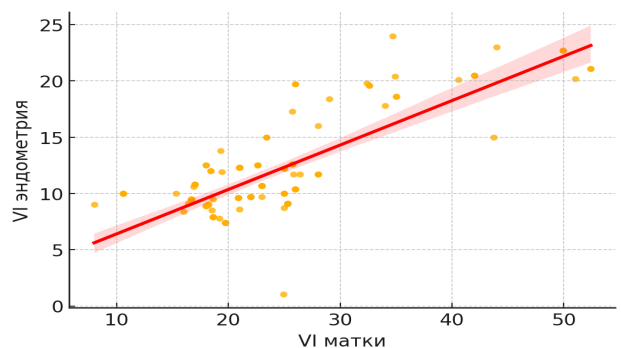


Рис. 9 (Fig. 9)

Рис. 9. Диаграмма.

Диаграмма рассеяния, отражающая сопряжённость между VI матки и VI эндометрия ($\rho = 0,65$; $p < 0,001$). Иллюстрируется синхронность макро- и микрососудистой васкуляризации, обусловленная общими механизмами ангиогенеза.

Fig. 9. Diagram.

Scatter plot showing the association between VI of the uterus and VI of the endometrium ($\rho = 0.65$; $p < 0.001$). This illustrates synchronized macro- and microvascular development, likely governed by common angiogenic mechanisms.

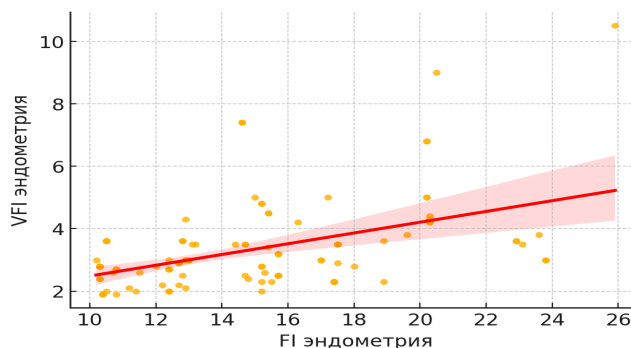


Рис. 10 (Fig. 10)

Рис. 10. Диаграмма.

Диаграмма рассеяния, демонстрирующая положительную зависимость между потоковым индексом (FI) и васкуляризационно-потокным индексом (VFI) эндометрия ($\rho = 0,44$; $p < 0,001$). Связь отражает сопряжённость интенсивности кровотока и совокупной сосудистой насыщенности слизистой оболочки.

Fig. 10. Diagram.

Scatter plot showing a positive correlation between flow index (FI) and vascularization-flow index (VFI) of the endometrium ($\rho = 0.44$; $p < 0.001$). This reflects the interdependence of perfusion intensity and total vascular supply of the endometrial tissue.

рутинной практике, но обладающих высокой чувствительностью к физиологическим изменениям [12-14]. Найденные нами значения объема и площади эндометрия, в том числе скорректированный объем (отношение объема эндометрия к объему матки), характеризуют его функциональную зрелость и соответствуют нормальной рецептивной фазе цикла. Показатели толщины эндометрия также укладываются в диапазон, предложенный в литературе как оптимальный для имплантации (8-12 мм) [15,16].

Сосудистая перфузия и васкуляризационные индексы

Васкуляризационные параметры матки находились в пределах физиологической

нормы: среднее значение индекса васкуляризации (VI) составило $24,2 \pm 8,6\%$, потокового индекса (FI) – $25,1 \pm 3,4$, васкуляризационно-потокового индекса (VFI) – $9,1 \pm 3,5$. Эти показатели отражают выраженную гемодинамическую активность миометрия в средней секреторной фазе менструального цикла. Полученные значения сопоставимы с данными, представленными в ряде исследований, использующих 3D-доплерометрию у здоровых женщин репродуктивного возраста. В частности, близкие уровни VI, FI и VFI матки описаны в работах Stępniaк и Czuczwar (2017), Garg и соавт. (2018) и Ng и соавт. (2005), что подтверждает воспроизводимость и нормативность представленных

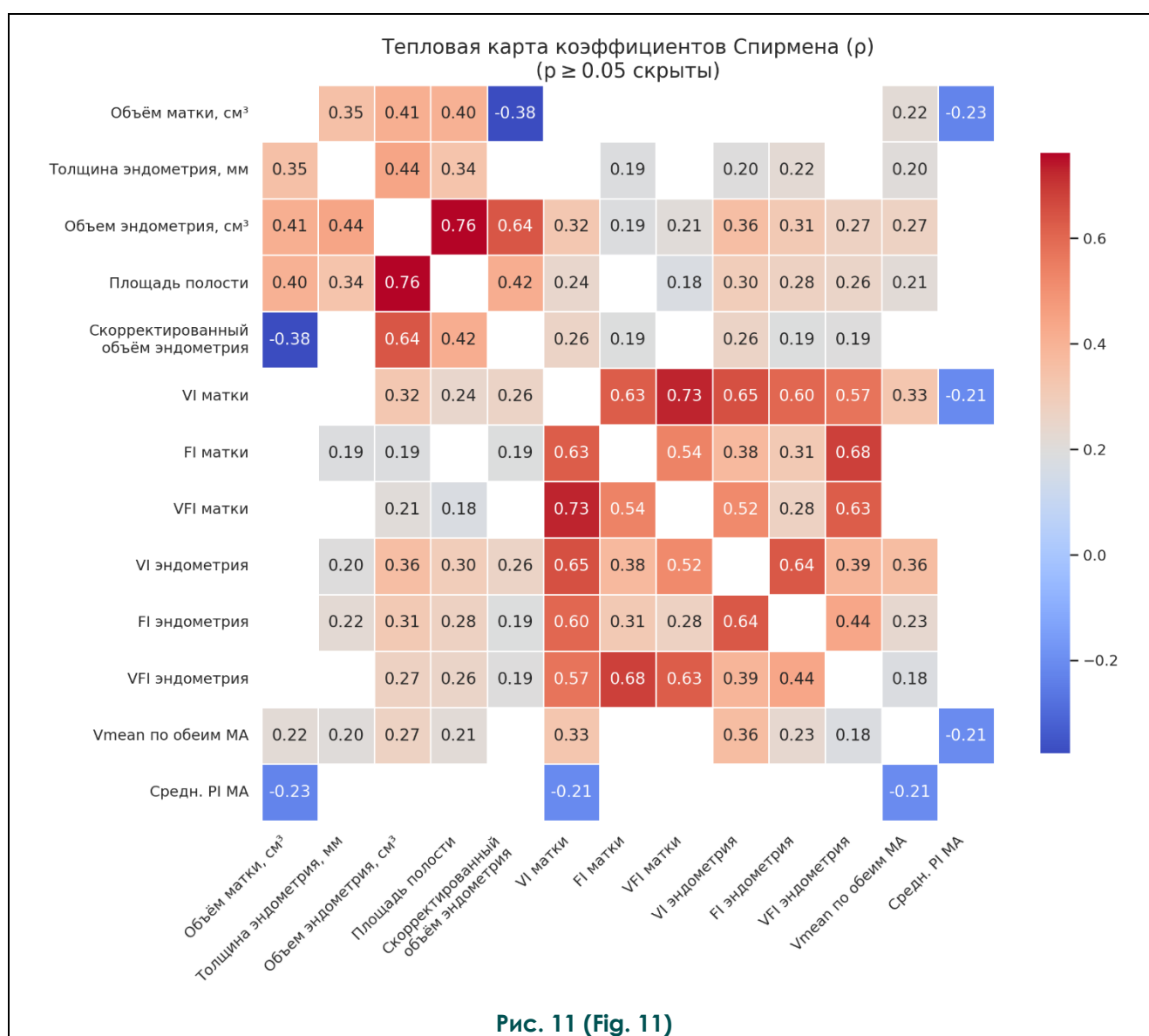


Рис. 11 (Fig. 11)

Рис. 11. Тепловая карта коэффициентов корреляции Спирмена (ρ) между основными ультразвуковыми параметрами.

Fig. 11. Heatmap of Spearman's correlation coefficients (ρ) between major ultrasound parameters.

результатов. Аналогичные параметры были получены для эндометрия: VI составил $12,0 \pm 4,3\%$, FI – $14,6 \pm 3,8$, VFI – $3,3 \pm 1,3$ [17–19]. Эти значения сопоставимы с результатами исследований Jokubkiene и соавт. (2006), Mayer и соавт. (2019) и Khan и соавт. (2024) [5, 20, 21]. Полученные показатели васкуляризации эндометрия могут рассматриваться как референсные для женщин данного возраста и фазы цикла.

Допплерометрия маточных артерий.

Показатели пульсационного индекса (PI) в маточных артериях оказались в пределах, ассоциированных с благоприятной имплантацией [9]. Полученные нами значения Vmean укладываются в указанные в литературе референсные интервалы [1].

Паритет и его влияние.

Установлено, что увеличение количества родов сопровождалось ростом объема матки и эндометрия, увеличением площади слизистой оболочки и её скорректированного объема, а также повышением васкуляризационных индексов эндометрия. Эти изменения, по-видимому, отражают физиологическую адаптацию сосудистого русла и морфометрии матки после повторных беременностей.

Такие данные согласуются с концепцией, согласно которой повторные гестации приводят к увеличению перфузионной ёмкости матки и более выраженному развитию сосудистой сети, особенно в эндометриальном слое. Отсутствие изменения PI при нарастании паритета подтверждает его устойчивость как системного показателя сопротивления кровотоку.

Корреляционные взаимосвязи.

Корреляционный анализ показал, что параметры объема и площади полости матки тесно взаимосвязаны с васкуляризацией как матки, так и эндометрия. Это подчёркивает анатомо-функциональную интеграцию морфометрических и гемодинамических характеристик. Выявленная обратная связь между объемом матки и PI дополнительно подтверждает, что увеличение размеров органа сопровождается снижением сосудистого сопротивления, что может быть прогностически благоприятным признаком в контексте оценки рецептивности.

Важно отметить, что VI эндометрия положительно коррелировал с его объемом, что подтверждает морфофункциональную согласованность развития слизистой оболочки в фазу имплантационной готовности. Связь

между васкуляризацией и объёмными характеристиками эндометрия подчеркивает значимость оценки 3D-перфузионных параметров в качестве индикаторов рецептивности.

Интересным представляется выявленное совпадение пиков корреляции между VFI и VI как в матке, так и в эндометрии. Это указывает на тесную взаимозависимость между сосудистым наполнением и интенсивностью кровотока и может служить дополнительным индикатором функциональной зрелости слизистой оболочки в подготовке к имплантации.

Клиническое значение.

Полученные результаты позволяют уточнить референсные значения ультразвуковых параметров у фертильных рожавших женщин в средней секреторной фазе. Они могут быть использованы в качестве ориентира при скрининге рецептивности эндометрия и при планировании переноса эмбриона.

Заключение.

Проведённое исследование позволило охарактеризовать органометрические и гемодинамические параметры матки и эндометрия у фертильных рожавших женщин активного репродуктивного возраста в средней секреторной фазе менструального цикла. Установлены нормативные значения толщины и объема эндометрия, площади полости матки, скорректированного объема, а также васкуляризационных и доплерометрических индексов. Показано, что указанные параметры характеризуются высокой физиологической зрелостью эндометрия и выраженной перфузией, ассоциированной с оптимальной рецептивностью. Влияние паритета отражается в нарастании объема и васкуляризации эндометрия, что может быть интерпретировано как адаптивный механизм, усиливающий функциональную состоятельность слизистой оболочки.

Полученные результаты могут использоваться в качестве клинических ориентиров при планировании программ ВРТ, а также в качестве базы для формирования стратифицированных референсных диапазонов в ультразвуковой репродуктологии.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Озерская, И.А. Эхография в гинекологии. И.А. Озерская. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, Видар-М, 2020. 701 с.
2. Chen F., Y. Gong, Y. Xie et al. Assessment of key parameters of normal uterus in women of reproductive age. F. Chen, Scientific Reports. 2023; 13 (1): 17794. DOI: 10.1038/s41598-023-44489-6.
3. Arya A., S. Tomar, R.K. Diwan et al. Uterine Parameters of Clinical Importance in North Indian Females of Reproductive Age – An Ultrasonographic Evaluation. National Journal of Clinical Anatomy. 2021; 10 (4): 232. DOI: 10.4103/NJCA.NJCA_93_20.
4. Ng E.H.Y., C.C.W. Chan, O.S. Tang et al. The role of endometrial and subendometrial vascularity measured by three-dimensional power Doppler ultrasound in the prediction of pregnancy during frozen-thawed embryo transfer cycles. Human Reproduction. 2006; 21(6): 1612-1617. DOI: 10.1093/humrep/dei502.
5. Mayer R.B., T. Ebner, C. Weiss et al. The Role of Endometrial Volume and Endometrial and Subendometrial Vascularization Parameters in a Frozen Embryo Transfer Cycle. Reproductive Sciences. 2019; 26 (7): 1013-1018. DOI: 10.1177/1933719118804421.
6. Guedes-Martins L., R. Gaio, J. Saraiva et al. Reference Ranges for Uterine Artery Pulsatility Index during the Menstrual Cycle: A Cross-Sectional Study. PLOS ONE. Reference Ranges for Uterine Artery Pulsatility Index during the Menstrual Cycle. 2015; 10 (3): P. e0119103. DOI: 10.1371/journal.pone.0119103.
7. Озерская И.А., Минашкина Е.В., Ожогина Е.В., Гус А.И. Ультразвуковое исследование матки и эндометрия как критерий оценки рецептивности эндометрия. Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2024; 1: 49-52. DOI: 10.48612/cgma/xz2g-8kgk-axt1.
8. Chien L.-W., H.-K. Au, P.-L. Chen et al. Assessment of uterine receptivity by the endometrial-subendometrial blood flow distribution pattern in women undergoing in vitro fertilization-embryo transfer. Fertility and Sterility. 2002; 78 (2): 245-251. DOI: 10.1016/S0015-0282(02)03223-5.
9. Bahrami F., M. Eftekhari, L. Zandbaghi. Uterine artery Doppler and endometrial blood flow in frozen embryo transfer: a cohort study. International Journal of Reproductive Biomedicine. Uterine artery Doppler and endometrial blood flow in frozen embryo transfer. 2023; 21 (3): 205-212. DOI: 10.18502/ijrm.v21i3.13196.
10. Wu J., J. Sheng, X. Wu, Q. Wu Ultrasound-assessed endometrial receptivity measures for the prediction of in vitro fertilization-embryo transfer clinical pregnancy outcomes: A meta-analysis and systematic review. Experimental and Therapeutic Medicine. Ultrasound-assessed endometrial receptivity measures for the prediction of in vitro fertilization-embryo transfer clinical pregnancy outcomes. 2023; 26 (3): 453. DOI: 10.3892/etm.2023.12152.
11. Wang J., F. Xia, Y. Zhou et al. Association Between Endometrial. Subendometrial Vasculature and Embryo Transfer Outcome: A Meta-analysis and Subgroup Analysis. Journal of Ultrasound in Medicine. Association Between Endometrial/Subendometrial Vasculature and Embryo Transfer Outcome. 2018; 37 (1): 149-163. DOI: 10.1002/jum.14319.
12. Alcázar J.L. Three-dimensional ultrasound assessment of endometrial receptivity: a review. Reproductive Biology and Endocrinology. Three-dimensional ultrasound assessment of endometrial receptivity. 2006; 4 (1): 56. DOI: 10.1186/1477-7827-4-56.
13. Abed K. F., Jasim H. A. Specific criteria in the radiological differential diagnosis of ovarian masses in MRI and ultrasound. REJR. 2023; 13(3):110-130. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-110-130.
14. Минашкина Е.В., Ожогина Е.В., Озерская И.А. Ультразвуковые методы диагностики рецептивности эндометрия. REJR. 2025; 15(1):193-205. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-193-205.
15. Zhang C., C. Chen, J. Wang et al. An endometrial receptivity scoring system basing on the endometrial thickness, volume, echo, peristalsis, and blood flow evaluated by ultrasonography. Frontiers in Endocrinology. 2022; 13: C. 907874. DOI: 10.3389/fendo.2022.907874.
16. Casper R.F. Frozen embryo transfer: evidence-based markers for successful endometrial preparation. Fertility and Sterility. Frozen embryo transfer. 2020; 113 (2): 248-251. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2019.12.008.
17. Stępnia A., P. Czuczwar. 3D Power Doppler vascular indices as a novel technique in assessing the outcome of minimally invasive techniques in uterine fibroids treatment. Menopause Review/Przegląd Menopauzalny. 2017 16 (4): 118-121. DOI: 10.5114/pm.2017.72755.
18. Garg N., H.K. Khaira, M. Kaur, S. Sinha A. Comparative Study on Quantitative Assessment of Blood Flow and Vascularization in Polycystic Ovary Syndrome Patients and Normal Women Using Three-Dimensional Power Doppler Ultrasonography. The Journal of Obstetrics and Gynecology of India. 2018; 68 (2): 136-141. DOI: 10.1007/s13224-017-1082-4.
19. Ng E.H.Y., C.C.W. Chan, O.S. Tang et al. The role of endometrial and subendometrial blood flows measured by three-dimensional power Doppler ultrasound in the prediction of pregnancy during IVF treatment. Human Reproduction. 2006; 21 (1): 164-170. DOI: 10.1093/humrep/dei277.
20. Jokubkiene L., P. Sladkevicius, L. Rovas, L. Valentin Assessment of changes in endometrial and subendometrial volume and vascularity during the normal menstrual cycle using three-dimensional power Doppler ultrasound. Ultrasound in Obstetrics & Gynecology. 2006; 27 (6): 672-679. DOI: 10.1002/uog.2742.
21. Khan A., Aisha al-Motawa, Najeeb Halabi et al. An investigation of endometrial vascularity in normally menstruating women using 3D ultrasound. International Journal of Gynecology & Obstetrics. 2024; 165 (3): 1172-1181. DOI: 10.1002/ijgo.15326.

References:

1. Ozerskaya, I.A. Echography in gynecology. I.A. Ozerskaya. 3rd ed., revised. Moscow, Vidar-M, 2020. 701 p. (in Russian).
2. Chen F., Y. Gong, Y. Xie et al. Assessment of key parameters of normal uterus in women of reproductive age. F. Chen, Scientific Reports. 2023; 13 (1): 17794. DOI: 10.1038/s41598-023-44489-6.
3. Arya A., S. Tomar, R.K. Diwan et al. Uterine Parameters of Clinical Importance in North Indian Females of Reproductive Age – An Ultrasonographic Evaluation. National Journal of Clinical Anatomy. 2021; 10 (4): 232. DOI: 10.4103/NJCA.NJCA_93_20.
4. Ng E.H.Y., C.C.W. Chan, O.S. Tang et al. The role of endometrial and subendometrial vascularity measured by three-dimensional power Doppler ultrasound in the prediction of pregnancy during frozen-thawed embryo transfer cycles. Human Reproduction. 2006; 21(6): 1612-1617. DOI: 10.1093/humrep/dei502.
5. Mayer R.B., T. Ebner, C. Weiss et al. The Role of Endometrial Volume and Endometrial and Subendometrial Vascularization Parameters in a Frozen Embryo Transfer Cycle. Reproductive Sciences. 2019; 26 (7): 1013-1018. DOI: 10.1177/1933719118804421.
6. Guedes-Martins L., R. Gaio, J. Saraiva et al. Reference Ranges for Uterine Artery Pulsatility Index during the Menstrual Cycle: A Cross-Sectional Study. PLOS ONE. Reference Ranges for Uterine Artery Pulsatility Index during the Menstrual Cycle. 2015; 10 (3): P. e0119103. DOI: 10.1371/journal.pone.0119103.
7. Ozerskaya, I. A., Minashkina, E. V., Ozhogina, E. V., Gus, A. I. Ultrasound examination of the uterus and endometrium as a criterion for assessing endometrial receptivity. Kremlin medicine. Clinical Bulletin. 2024; 1: 49-52. DOI: 10.48612/cgma/xz2g-8kgk-axt1 (in Russian).
8. Chien L.-W., H.-K. Au, P.-L. Chen et al. Assessment of uterine receptivity by the endometrial-subendometrial blood flow distribution pattern in women undergoing in vitro fertilization-embryo transfer. Fertility and Sterility. 2002; 78 (2): 245-251. DOI: 10.1016/S0015-0282(02)03223-5.
9. Bahrami F., M. Eftekhari, L. Zandbaghi. Uterine artery Doppler and endometrial blood flow in frozen embryo transfer: a cohort study. International Journal of Reproductive Biomedicine. Uterine artery Doppler and endometrial blood flow in frozen embryo transfer. 2023; 21 (3): 205-212. DOI: 10.18502/ijrm.v21i3.13196.
10. Wu J., J. Sheng, X. Wu, Q. Wu Ultrasound-assessed endometrial receptivity measures for the prediction of in vitro fertilization-embryo transfer clinical pregnancy outcomes: A meta-analysis and systematic review. Experimental and Therapeutic Medicine. Ultrasound-assessed endometrial receptivity measures for the prediction of in vitro fertilization-embryo transfer clinical pregnancy outcomes. 2023; 26 (3): 453. DOI: 10.3892/etm.2023.12152.
11. Wang J., F. Xia, Y. Zhou et al. Association Between Endometrial. Subendometrial Vasculature and Embryo Transfer Outcome: A Meta-analysis and Subgroup Analysis. Journal of Ultrasound in Medicine. Association Between Endometrial/Subendometrial Vasculature and Embryo Transfer Outcome. 2018; 37 (1): 149-163. DOI: 10.1002/jum.14319.
12. Alcázar J.L. Three-dimensional ultrasound assessment of endometrial receptivity: a review. Reproductive Biology and Endocrinology. Three-dimensional ultrasound assessment of endometrial receptivity. 2006; 4 (1): 56. DOI: 10.1186/1477-7827-4-56.
13. Abed K.F., Jasim H.A. Specific criteria in the radiological differential diagnosis of ovarian masses in MRI and ultrasound. REJR. 2023; 13(3):110-130. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-3-110-130.
14. Minashkina E.V., Ozhogina E.V., Ozerskaya I.A. Ultrasound methods for diagnosing endometrial receptivity. REJR. 2025; 15(1):193-205. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-193-205 (in Russian).
15. Zhang C., C. Chen, J. Wang et al. An endometrial receptivity scoring system basing on the endometrial thickness, volume, echo, peristalsis, and blood flow evaluated by ultrasonography. Frontiers in Endocrinology. 2022; 13: pp. 907874. DOI: 10.3389/fendo.2022.907874.
16. Casper R.F. Frozen embryo transfer: evidence-based markers for successful endometrial preparation. Fertility and Sterility. Frozen embryo transfer. 2020; 113 (2): 248-251. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2019.12.008.
17. Stępnia A., P. Czuczwar. 3D Power Doppler vascular indices as a novel technique in assessing the outcome of minimally invasive techniques in uterine fibroids treatment. Menopause Review/Przegląd Menopauzalny. 2017 16 (4): 118-121. DOI: 10.5114/pm.2017.72755.
18. Garg N., H.K. Khaira, M. Kaur, S. Sinha A. Comparative Study on Quantitative Assessment of Blood Flow and Vascularization in Polycystic Ovary Syndrome Patients and Normal Women Using Three-Dimensional Power Doppler Ultrasonography. The Journal of Obstetrics and Gynecology of India. 2018; 68 (2): 136-141. DOI: 10.1007/s13224-017-1082-4.
19. Ng E.H.Y., C.C.W. Chan, O.S. Tang et al. The role of endometrial and subendometrial blood flows measured by three-dimensional power Doppler ultrasound in the prediction of pregnancy during IVF treatment. Human Reproduction. 2006; 21 (1): 164-170. DOI: 10.1093/humrep/dei277.
20. Jokubkiene L., P. Sladkevicius, L. Rovas, L. Valentin Assessment of changes in endometrial and subendometrial volume and vascularity during the normal menstrual cycle using three-dimensional power Doppler ultrasound. Ultrasound in Obstetrics & Gynecology. 2006; 27 (6): 672-679. DOI: 10.1002/uog.2742.
21. Khan A., Aisha al-Motawa, Najeeb Halabi et al. An investigation of endometrial vascularity in normally menstruating women using 3D ultrasound. International Journal of Gynecology & Obstetrics. 2024; 165(3):1172-1181. DOI: 10.1002/ijgo.15326.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАННЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ РАКА ЭНДОМЕТРИЯ: КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭХОГРАФИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ В СОЧЕТАНИИ С ТИПОМ МАТОЧНОГО КРОВОТЕЧЕНИЯ И ГИНЕКОЛОГИЧЕСКИМ СТАТУСОМ

Гажонова В.Е.¹, Акопян Е.Г.², Антонова И.Б.³, Цаллагова З.С.³

1 – ФГБУ ДПО «Центральная государственная медицинская академия» УД Президента РФ. г. Москва, Россия.

2 – Клинико-диагностический Центр «МЕДСИ» на Белорусской, АО «Группа компаний МЕДСИ». г. Москва, Россия.

3 – ФГБУ РНЦРР МЗ РФ. г. Москва, Россия.

Цель исследования. Оптимизация ранней ультразвуковой диагностики рака эндометрия (РЭ) на первичном поликлиническом этапе за счет введения дополнительных ультразвуковых и клинических предикторов. Исследование было направлено на комплексную оценку структуры эндометрия в корреляции с менопаузальным статусом (пременопауза/постменопауза), типом аномального маточного кровотечения (АМК) в пременопаузе и наличием или отсутствием постменопаузального кровотечения (ПМК).

Материалы и методы. Проведено ретроспективное одноцентровое исследование 47 пациенток с верифицированным раком эндометрия (18 – в пременопаузе, 29 – в постменопаузе) и 119 пациенток с доброкачественной патологией эндометрия. Сформированы две основные группы (пациентки с АМК в пременопаузе и с ПМК в постменопаузе) и две контрольные группы (50 пациенток в пременопаузе и 50 в постменопаузе без патологии эндометрия). Всем пациенткам проводилось комплексное трансвагинальное УЗИ с оценкой толщины и структуры эндометрия, его контуров и васкуляризации. Данные ультразвукового исследования анализировались в сочетании с гинекологическим статусом, типом маточного кровотечения и анамнестическими факторами. Статистическая обработка данных выполнялась с использованием программного пакета MedCalc.

Результаты и обсуждение. Установлено, что в пременопаузе ключевым ультразвуковым предиктором рака эндометрия являются неровные и нечеткие контуры эндометрия, которые не встречались при доброкачественных процессах. Наиболее прогностически значимым типом аномального маточного кровотечения для рака эндометрия в этой группе оказалось нерегулярное маточное кровотечение (88,8% случаев), в то время как межменструальное кровотечение чаще ассоциировалось с полипами. Комбинация УЗ-признаков с нерегулярным типом аномального маточного кровотечения показала высокую диагностическую эффективность (чувствительность – 97,5%, специфичность – 98,3%). В постменопаузе у пациенток с постменопаузальным кровотечением медиана толщины эндометрия при раке эндометрия составила 13,06 мм, а наиболее значимыми УЗ-признаками были: неоднородная структура с кистозными включениями (61,1%) и неровные контуры (50,0%). У бессимптомных пациенток в постменопаузе пороговое значение толщины эндометрия для риска рака эндометрия оказалось ниже общепринятого (9,94 мм), а более надежным предиктором, чем абсолютная величина, была его неравномерная толщина (72,7% случаев). Васкуляризация коррелировала с толщиной эндометрия и не являлась независимым ранним предиктором.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует, что для повышения эффективности ранней диагностики рака эндометрия необходимо выходить за рамки оценки лишь толщины эндометрия. Ключевое значение имеет комплексный ультразвуковой подход, стратифицированный по гинекологическому статусу и типу маточного кровотечения. Сочетание конкретных эхографических признаков (неровные контуры, неоднородная структура) с клиническими данными (нерегулярный характер АМК в пременопаузе, наличие/отсутствие ПМК) позволяет значительно повысить точность диагностики на первичном этапе и способствовать более раннему выявлению заболевания.

Ключевые слова: рак эндометрия, ультразвуковое исследование, трансвагинальное УЗИ, аномальное маточное кровотечение, постменопаузальное маточное кровотечение, толщина эндометрия.

Контактный автор: Гажонова Вероника Евгеньевна, e-mail: Vx969@yandex.ru

Для цитирования: Гажонова В.Е., Акопян Е.Г., Антонова И.Б., Цаллагова З.С. Оптимизация ранней ультразвуковой диагностики рака эндометрия: комплексная оценка эхографических признаков в сочетании с типом маточного кровотечения и гинекологическим статусом. REJR 2026; 16(1):80-92. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-80-92.

Статья получена: 01.12.25

Статья принята: 14.01.26

OPTIMIZATION OF EARLY ULTRASOUND DIAGNOSIS OF ENDOMETRIAL CANCER: A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF SONOGRAPHIC FEATURES IN COMBINATION WITH UTERINE BLEEDING TYPE AND GYNECOLOGICAL STATUS

Gazhonova V.E.¹, Akopyan E.G.², Antonova I.B.³, Tsallagova Z.S.³

1 - Central State Medical Academy, Administrative Department of the President of the Russian Federation.

2 - Clinical and Diagnostic Center Medsi on Belorusskaya, Medsi Group of Companies.

3 - Russian Scientific Center of Roentgenology and Radiology. Moscow, Russia.

Purpose. To optimize the early ultrasound diagnosis of endometrial cancer (EC) at the primary outpatient stage by introducing additional ultrasound and clinical predictors. The research focused on a comprehensive assessment of the endometrial structure in correlation with menopausal status (premenopause/postmenopause), the type of abnormal uterine bleeding (AUB) in premenopause, and the presence or absence of postmenopausal bleeding (PMB).

Materials and methods. A retrospective single-center study was conducted involving 47 patients with verified EC (18 in premenopause, 29 in postmenopause) and 119 patients with benign endometrial pathology. Two main study groups (patients with AUB in premenopause and with PMB in postmenopause) and two control groups (50 patients in premenopause and 50 in postmenopause without endometrial pathology) were formed. All patients underwent comprehensive transvaginal ultrasound (TVUS) assessing endometrial thickness and structure, its contours, and vascularization. The ultrasound data were analyzed in conjunction with gynecological status, the type of uterine bleeding, and anamnestic factors. Statistical data processing was performed using the MedCalc software package.

Results. Premenopausally, a key ultrasound predictor of EC was found to be irregular and indistinct endometrial contours, which were not observed in benign processes. The most prognostically significant type of AUB for EC in this group was irregular uterine bleeding (88.88% of cases), while intermenstrual bleeding was more often associated with polyps. The combination of sonographic features with an irregular AUB type demonstrated high diagnostic efficacy (sensitivity 97.5%, specificity 98.3%). In postmenopause, for patients with PMB, the median endometrial thickness in EC was 13.06 mm, and the most significant sonographic signs were heterogeneous structure with cystic inclusions (61.1%) and irregular contours (50.0%). In asymptomatic postmenopausal patients, the threshold value of endometrial thickness for EC risk was lower than the commonly accepted standard (9.94 mm), and a more reliable predictor than the absolute value was its uneven thickness (72.7% of cases). Vascularization correlated with endometrial thickness and was not an independent early predictor.

Conclusion. This study demonstrates that to improve the effectiveness of early endometrial cancer diagnosis, it is necessary to go beyond the assessment of endometrial thickness alone. A comprehensive ultrasound approach, stratified by gynecological status and the type of uterine bleeding, is of key importance. Combining specific sonographic features (irregular contours, heterogeneous structure) with clinical data (irregular AUB pattern in premenopause, presence/absence of PMB) can significantly increase diagnostic accuracy at the primary care level and contribute to earlier detection of the disease.

Keywords: endometrial cancer, ultrasound examination, transvaginal sonography, abnormal uterine bleeding, postmenopausal bleeding, endometrial thickness.

Corresponding author: Gazhonova V.E., e-mail: e-mail: Vx969@yandex.ru

For citation: Gazhonova V.E., Akopyan E.G., Antonova I.B, Tsallagova Z.S. Optimization of early ultrasound diagnosis of endometrial cancer: a comprehensive assessment of sonographic features in combination with uterine bleeding type and gynecological status. REJR 2026; 16(1):80-92. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-80-92.

Received: 01.12.25

Accepted: 14.01.26

Рак эндометрия (РЭ) занимает шестое место по распространенности среди онкологических заболеваний у женщин и характеризуется парадоксальным ростом показателей летальности. По данным ВОЗ, в 2022 году в мире было зарегистрировано 420 368 новых случаев рака эндометрия и 97 723 летальных исхода, а к 2050 году прогнозируется рост этих показателей до 676 296 и 183 093 соответственно [1–3]. Несмотря на относительно высокие показатели выявления рака эндометрия на I–II стадиях в России (84.6% по итогам 2024 года), доля случаев, выявленных активно, остается низкой – всего 26.8%, что свидетельствует о серьезных проблемах диагностики на первичном этапе [4].

Хотя в 85% случаев рак эндометрия манифестирует клиническими проявлениями, они неспецифичны и могут сопровождать доброкачественные процессы эндометрия и миометрия. Трансвагинальное ультразвуковое исследование (ТВУЗИ) является основным методом первичной диагностики, однако традиционно используемый показатель толщины эндометрия (ТЭ) применяется без достаточной стратификации по типу аномального маточного кровотечения (АМК) и менопаузальному статусу [5–7]. Проведение скрининга РЭ не показано, а мониторингирование толщины эндометрия у асимптоматических пациенток без учета клинико-анамнестических данных может приводить к росту необоснованных вмешательств.

Цель исследования: оптимизация ранней ультразвуковой диагностики рака эндометрия путем введения дополнительных ультразвуковых и клинических предикторов на первичном поликлиническом этапе на основе комплексной оценки структуры эндометрия в корреляции с менструальным циклом (пременопауза/менопауза), типом аномального маточного кровотечения в пременопаузе и клиническими проявлениями в постменопаузе.

Материалы и методы.

Дизайн исследования и пациенты.

Проведено ретроспективное одноцентровое исследование на базе «Клинико-

диагностического центра МЕДСИ на Белорусской» (г. Москва) за период с января 2019 года по август 2025 года. В исследование включены 47 пациенток с верифицированным диагнозом: «Рак эндометрия» (РЭ) (18 – в пременопаузе, 29 – в постменопаузе) и 119 пациенток с доброкачественными образованиями эндометрия (59 в пременопаузе, 60 в постменопаузе). Сформированы две контрольные группы по 50 пациенток в пременопаузе и постменопаузе без патологии эндометрия.

Для детального анализа УЗ-признаков РЭ в постменопаузе дополнительное исследование проводилось путем перекрестного сравнения между двумя подгруппами пациенток при РЭ: с АМК (18 пациенток) и без АМК (11 пациенток). Для корректной клинической характеристики больных в исследуемых группах определялись факторы риска, анамнестические данные, а также спектр сопутствующей гинекологической и экстрагенитальной патологии.

Критерии включения: пациентки вне зависимости от возраста, расовой принадлежности, клинических проявлений; пациентки с гистологически верифицированным диагнозом РЭ.

Критерии исключения: беременность, лактация, наличие метастатической опухоли; маточные кровотечения, связанные с нарушениями системы свертывания, патологией эндоцервикса, овуляцией, приемом гормонов; отказ от прохождения рекомендованных диагностических этапов; отсутствие гистологически верифицированного диагноза; положительные тесты на RW и ВИЧ; алкогольная, наркотическая, лекарственная зависимость.

Всем пациенткам проводилось комплексное ультразвуковое исследование (трансабдоминальное и трансвагинальное) на сканерах Logiq S8 и Voluson E8 с использованием конвексного (2-5 МГц) и внутриматочного (5-9 МГц) датчиков. Оценивались толщина эндометрия, его структура, контуры, экзогенность и особенности васкуляризации. Дополнительно выполнялось УЗИ молочных желез и щитовидной железы по стан-

дартным протоколам.

Использовались унифицированные термины IETA для описания эхографических признаков [12, 13]. Аномальное маточное кровотечение классифицировалось согласно системе PALM-COEIN. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного пакета MedCalc Statistical Software version 19.2.6. Для сравнения групп

– неровные и нечеткие контуры эндометрия, которые визуализировались в 33.3% случаев РЭ и полностью отсутствовали в группе доброкачественных образований ($p \leq 0.05$);

- гиперэхогенная структура эндометрия не имела диагностической ценности, так как часто встречалась как при злокачественных, так и при доброкачественных процессах;

- диагностическая эффективность:

Таблица №1. Распределение больных с патологией эндометрия по возрасту.

Нозологии / возраст, n	40-45 лет, n=49 (%)	46-55 лет, n=65 (%)	Старше 56 лет, n=52 (%)
Полип эндометрия (n=45)	12 (24.4)	25 (38.4)	8 (15.3)
Гиперплазия эндометрия (n=39)	16 (32.7)	13 (20.0)	10 (19.2)
Подслизистая миома матки (n=35)	18 (36.7)	12 (18.4)	5 (9.6)
Рак эндометрия (n=47)	3 (6.1)	15 (23.0)	29 (55.7)

применялись критерий Манна-Уитни и точный критерий Фишера, различия считались достоверными при $p < 0,1$.

Результаты.

По результатам исследования средний возраст больных раком эндометрия в условиях амбулаторного поликлинического приема по данным статистики составил 58.0 лет (интервал 38-78 лет). При этом при разделении на 3 возрастные группы (40-45 лет; 46-55 лет; больше 56 лет), максимальное число диагностируемых случаев рака эндометрия отмечалось у пациенток старше 51 года с уступающими показателями в группе 40-45 лет (6.1%) и 46-55 лет (23.1%). Доброкачественные образования эндометрия (наиболее часто определялись в возрастной группе 40-45 лет и 46-50 лет), таблица №1.

Полученные данные были систематизированы в зависимости от менопаузального статуса пациенток и наличия клинической симптоматики.

Результаты у пациенток в пременопаузе с аномальным маточным кровотечением (АМК).

Клиническая картина: доминирующим типом АМК, ассоциированным с РЭ, было нерегулярное маточное кровотечение (88.9% случаев). Межменструальное кровотечение чаще встречалось при полипах эндометрия (85%).

Ультразвуковые параметры:

- медиана толщины эндометрия (ТЭ) при РЭ составила 10.5 мм, что не имело статистически значимых отличий от ТЭ при доброкачественных процессах;

- ключевой эхографический предиктор

комбинация УЗ-признаков с нерегулярным типом АМК показала исключительно высокие показатели: чувствительность – 97.5%, специфичность – 98.3%, ППВ, НПВ 95.5%, 97% соответственно. В диагностике полипов эндометрия при сочетании УЗ-признаков с межменструальным типом АМК: чувствительность составила 89.8%, специфичность 88.1%, ППВ и НПВ – 83.5% и 90.1% соответственно. Сводная таблица признаков приведена в таблице №2.

Результаты у пациенток в постменопаузе с постменопаузальным кровотечением (ПМК).

Ультразвуковые параметры:

- медиана ТЭ при РЭ составила 13.1 мм;

- ключевые эхографические предикторы: неоднородная структура эндометрия с анэхогенными (кистозными) включениями (61.1% случаев при РЭ). Неровные и нечеткие контуры (50% случаев при РЭ).

Стадийность: в этой группе преобладали более поздние стадии заболевания (Т2 в 66.6% случаев).

Сводные данные представлены в таблице № 3.

Результаты у асимптоматических пациенток в постменопаузе (без ПМК).

Ультразвуковые параметры:

- медиана ТЭ при РЭ оказалась ниже общепринятого порога и составила 9.9 мм, лишь у 27.2% пациенток ТЭ превышала 11 мм;

- наиболее надежный предиктор: неравномерная толщина эндометрия была выявлена в 72.7% случаев и оказалась более

Таблица №2. УЗ-признаки патологических изменений эндометрия у пациенток в пременопаузе с АМК при стратификации по нозологиям.					
УЗ-признаки эндометрия	РЭ, n=18 (%)	Подслизистая миома n=20 (%)	Полип эндометрия n=20 (%)	ГЭ, n=19 (%)	Контрольная группа, n=50 (%)
Толщина эндометрия, мм	10.5 (3.6-22.4)	6.5 (4-10)	7.3 (5-13.5)	9.4 (8-17)	5.6 (2-7.5)
Неоднородный без кист	11 (61.1)	10 (50.0)	5 (25.0)	7 (36.8)	0
Неоднородный с кистами	2 (11.1)	3 (15.0)	1 (5.0)	5 (26.3)	0
Однородный	5 (27.8)	7 (35.0)	14 (70.0)	7 (36.8)	50 (100)
Гиперэхогенный	17 (94.4)	17 (85.0)	19 (95.0)	17 (89.4)	50 (100)
Смешанной эхогенности	1 (5.5)	3 (15.0)	1 (5.0)	2 (10.5)	0
Объемное образование, неравномерное утолщение эндометрия	5 (27.8)	20 (100)	20 (100)	7 (36.8)	0
Четкие, неровные контуры	7 (38.9)	14 (70.0)	3 (15.0)	0	0
Четкие, ровные контуры	5 (27.8)	6 (30.0)	17 (85.0)	19 (100)	50 (100)
Нечеткие, неровные контуры	6 (33.3)	0	0	0	0
Гиперэхогенные включения в базальном слое	4 (22.2)	5 (25.0)	3 (15.0)	6 (31.6)	0
Васкуляризация (тип по IETA)	Тип 2 (при ТЭ ≥ 1 мм)	Тип 1	Тип 1	Тип 1	0
Тип АМК (межменструальный)	2 (11.1)	2 (10.0)	17 (85.0)	4 (21.1)	0
Тип АМК (нерегулярный)	16 (88.9)	7 (35.0)	4 (20.0)	5 (26.3)	0
Дисменоррея	2 (11.1)	12 (60.0)	6 (30.0)	7 (36.8)	0
Длительная менструация	5 (27.8)	11 (55.0)	8 (40.0)	18 (94.7)	0

Таблица №3. УЗ-признаки патологических изменений эндометрия у пациенток в постменопаузе с ПМК при стратификации по нозологиям.					
УЗ-признаки эндометрия	РЭ С АМК N=18 (%)	Подслизистая миома n=15 (%)	ГЭ N=20 (%)	Полип Э N=25 (%)	Контрольная группа n=50 (%)
ТЭ, мм	13.1 (3.5-56)	9.5 (6-14)	11	7.5	3.5
Однородный	1 (5.5)	9(60.0)	11(55.0)	11(44.0)	50 (100)
Неоднородный без анэхогенных включений	6 (33.3)	4(26.7)	6 (30.0)	9 (36.0)	0
Неоднородный с анэхогенными включениями	11 (61.1)	2 (13.3)	3 (15.0)	5 (20.0)	0
Гипоэхогенный	2 (11.1)	2 (13.3)	0	0	0
Гиперэхогенный	16 (88.9)	13 (86.7)	20 (100)	25 (100)	50 (100)
Неравномерно утолщенный	16 (88.9)	15 (100)	0	25 (100)	0
Контур четкие неровные	8 (44.4)	10 (66.7)	0	25 (100)	-
Контур четкие ровные	1 (5.3)	5 (27.8)	20 (100)	0	0
Контур нечеткие неровные	9 (50.0)	0	0	0	0
Тип васкуляризации	2,3 при ТЭ более 13 мм	1	1	1	0

значимым маркером, чем абсолютное значение ТЭ.

- стадийность: несмотря на отсутствие симптомов, у большинства пациенток (72.7%) РЭ был диагностирован на ранней стадии (T1).

Сводные данные представлены в таблице № 4.

Все вышеизложенное доказывает клинико-диагностическую значимость проведения на первичном диагностическом этапе у пациенток в пременопаузе комплексного ТВУЗИ в корреляции с типом АМК ($P \leq 0.05$).

Дополнительные факторы, выявленные у исследуемых групп пациенток.

Васкуляризация по данным ЦДК не являлась ранним независимым предиктором, так как коррелировала с величиной ТЭ и визуализировалась преимущественно при значительном утолщении эндометрия или объемных образованиях и определялся на поздних стадиях: в группе пациенток в пременопаузе с АМК при ТЭ более 13 мм; у пациенток в постменопаузе с ПМК при ТЭ более 11мм; в постменопаузе без ПМК при ТЭ более 15 мм. В 52.6% пациенток с РЭ на фоне ПМК при ТЭ более 11 мм регистрировался 2 и 3 тип васкуляризации; в 27.3% пациенток

с РЭ без ПМК при ТЭ более 15 мм регистрировался 2 тип васкуляризации; в 33.3% пациенток при РЭ и АМК при ТЭ 11 мм и более отмечался 2 тип васкуляризации. Однако, во всех случаях объемных образований васкуляризация регистрировалась независимо от клинических проявлений (с/без АМК) и возраста (пре/постменопауза) и соответствовала типу 2.

Ведущим фактором риска РЭ в когорте был ятрогенный фактор (82.9% пациенток с РЭ имели в анамнезе различные гинекологические операции). Высокая частота сопутствующей патологии щитовидной железы (56.8%) превышала частоту таких известных факторов риска, как диабет и бесплодие, таблица №5.

При анализе сопутствующей гинекологической патологии при РЭ и доброкачественных образованиях эндометрия отмечался сопоставимый спектр диагностированных доброкачественных заболеваний репродуктивной сферы (рис. 1).

При исследовании спектра сопутствующих состояний и заболеваний молочной железы пациентки с диагностированным РЭ и неизменной молочной железой BI-RADS 1 составили 19.1% (9 пациенток); с BI-RADS

Таблица №4. УЗ-признаки рака эндометрия у пациенток в постменопаузе при стратификации по клиническим проявлениям.

Морфосонографические признаки при РЭ	Без ПМК n=11 (%)	с ПМК n=18 (%)
ТЭ	9.9 (2.3-28)	13.1 (3.5-56)
Однородный	3 (27.3)	1 (5.5)
Неоднородный без кистозных включений	6 (54.5)	6 (33.3)
Неоднородный с кистозными включениями	2 (18.2)	11 (61.1)
Гипоэхогенный	0	2 (11.1)
Гиперэхогенный	11 (100)	16 (88.9)
Неравномерно утолщенный	8 (72.7)	16 (88.9)
Контур четкие неровные	7 (63.6)	8 (44.4)
Контур четкие ровные	3 (27.3)	15 (83.3)
Контур нечеткие неровные	1 (9.1)	9 (50.0)
Тип васкуляризации	Тип 2 При ТЭ более 15мм (27.3%), при объемных образованиях (100%)	Тип 2,3 При ТЭ более 11мм (52.6%), при объемных образованиях (100%)
Стадия Т	Стадия Т1 72.7% (8)	Стадия Т2 66.6% (12)

Таблица №5. Распределение пациенток в зависимости от факторов риска и сопутствующей экстрагенитальной патологии при РЭ, доброкачественных образованиях эндометрия и в контрольных группах.

Сопутствующие состояния при РЭ и доброкачественных образованиях эндометрия	РЭ N=47 (%)	Доброкачественные образования эндометрия n=119 (%)	Контрольная группа: N=100 (%)
Возраст (медиана)	58.0	53.5	48.5
ИМТ (медиана)	30	25.5	24.5
Семейный анамнез	15 (31.9)	18 (15.1)	12 (12.0)
Ятрогенный фактор	39 (82.9)	48 (40.3)	23 (23.0)
Заболевания щитовидной железы	21 (44.6)	43 (36.1)	24(24.0)
Рак щитовидной железы	1 (2,1)	0	0
Бесплодие	6 (12.7)	18 (15.1)	23 (23.0)
Приём ОК, ГТ	4 (8.6)	61 (51.2)	24 (48.0)
Аденома надпочечника	2 (4.2)	0	0
Гипертоническая болезнь	28 (59.5)	49 (41.1)	29 (29.0)
Варикозное расширение вен нижних конечностей	15 (31.9)	32 (26.8)	32 (32.0)
Диабет	6 (12.7)	18 (15.1)	12 (12.0)
Рак толстой кишки (прямая, сигмовидная)	2 (4.2)	0	0
Рак мочеочника	1 (2.1)	0	0
Карциноид легкого	1 (2.1)	0	0
Заболевания крови	1 (2.1)	31 (26.0)	0
Заболевания ЖКТ	10 (21.2)	49 (41.1)	52 (52.0)
Сердечно-сосудистые заболевания	21 (44.6)	46 (38.6)	39 (39.0)

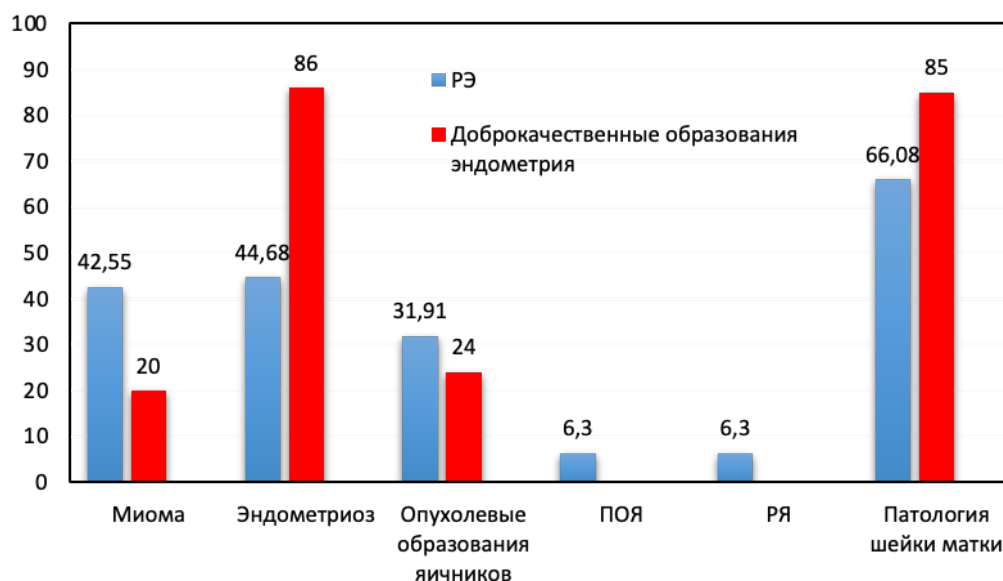


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Диаграмма.

Спектр состояний и заболеваний репродуктивной сферы у пациенток с диагностированным раком эндометрия и при доброкачественных образованиях эндометрия.

Fig. 1. Diagram.

Spectrum of conditions and diseases of the reproductive system in patients diagnosed with ER and benign endometrial lesions.

2 – 70.2% (33 пациентки), BI-RADS 3 – 8.5%. BIRADS 4 и 5 у 9 больных, при этом РМЖ верифицирован был у всех 9 и только в группе пациенток с диагнозом РЭ в менопаузе. В пременопаузе высокие категории плотности молочной железы (по ACR C и ACR D) определялись у 77.7% пациенток. При длительности менопаузы более 10 лет и при отсутствии менопаузальной гормонотерапии высокие категории плотности молочной железы были выявлены в 27.5% (у 8 пациенток).

Обсуждение.

Как известно, в дифференциальной диагностике РЭ и доброкачественных изменений эндометрия такие ультразвуковые признаки, как толщина эндометрия, структура, эхогенность, края образования, размеры, эндо-миометральная граница, а также особенности васкуляризации хорошо изучены и высоко информативны: специфичность достигает 95.6%, чувствительность до 97.7%, точность до 82.8% [5–7]. Однако, отсутствие дифференцированного подхода, основанного на менопаузальном и клиническом статусе пациентки, затрудняет активную выявляемость ранних стадий РЭ на поликлиническом этапе.

Полученные результаты демонстрируют необходимость дифференцированного подхода к ультразвуковой диагностике РЭ в зависимости от менопаузального статуса и клинических проявлений.

Наши данные демонстрируют, что в пременопаузе измерение ТЭ имеет ограниченную диагностическую ценность из-за широкого перекрытия показателей при злокачественных и доброкачественных процессах. Это согласуется с физиологическими колебаниями эндометрия в репродуктивном возрасте [9–12]. В этом контексте ключевым дифференциальным признаком становится визуализация неровных и нечетких контуров, что, вероятно, отражает инфильтративный характер роста злокачественного образования (рис. 2 – рис. 4). Кроме того, выявленная четкая ассоциация между нерегулярным типом АМК и РЭ, с одной стороны, и межменструальным кровотечением и полипами – с другой, предоставляет врачу мощный клинический инструмент для первичной стратификации риска. Комбинация этого типа кровотечения с определенными УЗ-признаками позволяет достичь чрезвычайно высокой диагностической точности, что

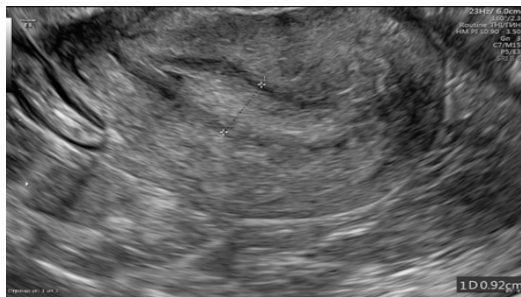


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Ультразвуковое исследование, В-режим, матка в продольной плоскости.

Пациентка К., 50 лет. Рак эндометрия в пременопаузе на фоне аномального маточного кровотечения. Толщина эндометрия 12 мм (пунктирная линия). Эндометрий гиперэхогенный, однородной структуры с нечеткими контурами, неравномерной субэндометриальной зоной.

Fig. 2. Ultrasound examination, B-mode, uterus in the longitudinal plane.

Endometrial thickness is 12 mm (dotted line). Patient K., 50 years old. Premenopausal endometrial cancer with abnormal uterine bleeding. The endometrium is hyperechoic, homogeneous in structure, with unclear contours and an uneven subendometrial zone.

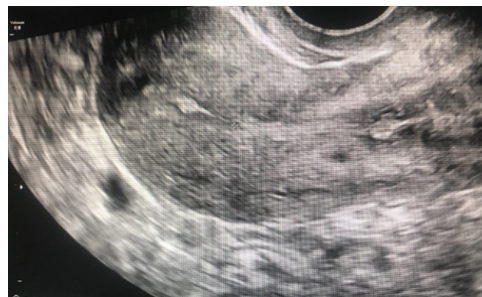


Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. Ультразвуковое исследование, В-режим, матка в продольной плоскости.

Пациентка П., 48 лет. Рак эндометрия в пременопаузе на фоне аномального маточного кровотечения. Эндометрий неравномерно утолщенный в нижней трети полости (пунктирная линия), эхогенная полиповидная структура в области дна (стрелка).

Fig. 3. Ultrasound examination, B-mode, uterus in the longitudinal plane.

Patient P., 48 years old. Premenopausal endometrial cancer with abnormal uterine bleeding. The unevenly thickened endometrium in lower third of the uterine cavity (dotted line), the echogenic polypoid structure is in the fundus of the uterine cavity (arrow).

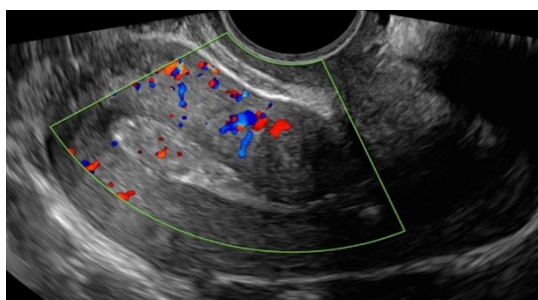


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. Ультразвуковое исследование, В-режим, эхограмма матки в продольной плоскости.

Пациентка М., 49 лет. Рак эндометрия в пременопаузе на фоне аномального маточного кровотечения без миометриальной инвазии. Эндометрий неоднородной структуры, с четкими, ровными контурами (стрелки). Васкуляризация эндометрия при ЦДК с единичными локусами цветковых сигналов (тип 2).

Fig. 4. Ultrasound examination, B-mode, echo-gram of the uterus in the longitudinal plane.

Patient M., 49 years old. Premenopausal endometrial cancer with abnormal uterine bleeding without myometrial invasion. The endometrium is heterogeneous in structure, with clear, smooth contours (arrows). Endometrial vascularization on color Doppler imaging with single color signal loci (type 2).



Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. Ультразвуковое исследование, В-режим, эхограмма матки в продольной плоскости.

Пациентка Т., 64 г. Рак эндометрия на фоне постменопаузального маточного кровотечения с инвазией в мио-метрий. Неравномерно утолщенный эндометрий. Нечеткая эндомиометральная граница за счет инвазии в мио-метрий (стрелки).

Fig. 5. Ultrasound examination, B-mode, echo-gram of the uterus in the longitudinal plane.

Patient T., 64 years old. Endometrial cancer associated with postmenopausal uterine bleeding with myometrial invasion. Unevenly thickened endometrium in the middle third of the cavity. Unclear endometrial border due to invasion into the myometrium (arrows).

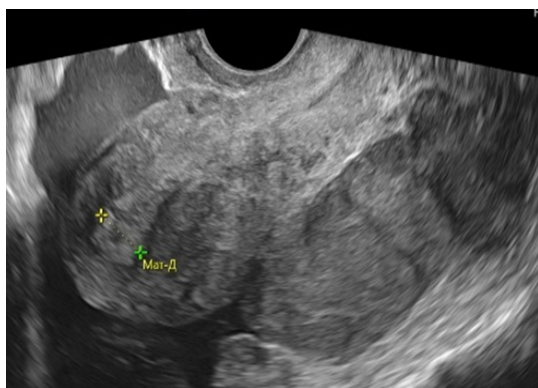


Рис. 6 (Fig. 6)

Рис. 6. Ультразвуковое исследование, В-режим, эхограмма матки в продольной плоскости.

Пациентка М., 62 года. Рак эндометрия в постменопаузе без постменопаузального маточного кровотечения с инвазией в миометрий, канцероматозом брюшины, асцитом. Эндометрий утолщен 10мм, неоднородной структуры, с нечеткими контурами на уровне нижней трети тела матки, где патоморфологически была установлена инвазия в миометрий (длинная стрелка). Эндометриальная граница в дне и средней трети прослеживается четко (короткая стрелка).

Fig. 6. Ultrasound examination, B-mode, echogram of the uterus in the longitudinal plane.

Patient M., 62 years old. Endometrial cancer in a postmenopausal patient without postmenopausal uterine bleeding with invasion within myometrium, with canceromatosis of peritoneum, ascites. The endometrium is 10 mm thick, heterogeneous in structure, with unclear contours at the level of the lower third of the uterine body, where pathomorphological examination revealed myometrium invasion. The endometrial border in the fundus and middle third is clearly visible.



Рис. 7 (Fig. 7)

Рис. 7. Ультразвуковое исследование, В-режим, эхограмма матки в продольной плоскости.

Пациентка И., 67 лет. Рак эндометрия в постменопаузе без постменопаузального маточного кровотечения с миометриальной инвазией. На опухолевое поражение указывают признаки утолщения эндометрия, неравномерность толщины, нечеткость контуров по задней стенке ближе к дну и отсутствие субэндометриального гипохойчного ободка (стрелка).

Fig. 7. Ultrasound examination, B-mode, echogram of the uterus in the longitudinal plane.

Patient I., 67 years old. Postmenopausal endometrial cancer without postmenopausal uterine bleeding with myometrial invasion. Tumor lesion is indicated by signs of endometrial thickening, uneven thickness, unclear contours along the posterior wall closer to the fundus, and the absence of a subendometrial hypoechoic rim (arrow).

крайне важно для своевременного направления на инвазивную диагностику.

У пациенток с ПМК наши результаты согласуются с классическими представлениями: значительное утолщение эндометрия (13.1 мм) в сочетании с неоднородной, кистозной структурой и неровными контурами (рис. 5) является высокоспецифичным комплексом признаков РЭ [13–15].

Неоднородная структура эндометрия с наличием анэхогенных (кистозных) включений была отмечена, как наиболее прогностически значимый УЗ-признак (61,11%), наряду с признаком неровных и нечетких контуров (50%) (рис. 5), что отмечалось и в работах [13–15]. Если локусы васкуляризации (тип

2/3) при диффузном поражении были выявлены только при ТЭ свыше 13 мм, то при детекции объемных образований, имитирующих полипы, васкуляризация регистрировалась независимо от размеров образования.

Однако наиболее значимые выводы касаются асимптомных пациенток. Наше исследование ставит под сомнение универсальность порога ТЭ в 4-5 мм для исключения патологии и тем более порога в 11 мм для ее предположения [16–19]. Тот факт, что медиана ТЭ при РЭ без ПМК составила менее 10 мм, а главным предиктором была неравномерность толщины, указывает на то, что именно нарушение симметрии и структуры эндометрия, а не его абсолютный размер,

должно стать решающим для врача УЗ-диагностики (рис. 6, 7) в предположении рака эндометрия.

Это объясняет ложно-негативные случаи РЭ, когда отмечалась неизменная ТЭ. Так, у одной из пациенток еще в 2019 г. при ТЭ 4.7 мм в постменопаузе была отмечена неоднородность структуры с рекомендацией дообследования, но лишь спустя 3 года (при ТЭ 9 мм с зафиксированным кровотоком) была выполнена аспирационная биопсия и верифицирован диагноз РЭ. В 1 случае РЭ был диагностирован только при гистологической верификации после радикальной операции по поводу РЯ, при этом РЭ не был выявлен ни при УЗИ, ни при 3D-УЗИ, ни при проведении МРТ с контрастированием, что подтверждает теорию о микроинвазивном РЭ. По нашим данным, у бессимптомных больных РЭ в постменопаузе неоднородная структура эндометрия без анэхогенных включений определялась в 54.5% случаев. При РЭ без ПМК в отличие от РЭ с ПМК четкие (ровные/неровные) контуры образования диагностировались чаще (90.9% и 49.7% соответственно); васкуляризация отмечалась при большей толщине эндометрия (13 мм и 11мм соответственно). Несмотря на отсутствие клинических проявлений, у большинства пациенток в постменопаузе без ПМК РЭ был диагностирован чаще на ранних стадиях (в 72.7% стадия Т1) в отличие от РЭ на фоне

АМК (в 66.6% стадия Т2).

Основным ограничением исследования является его ретроспективный характер и объем выборки, особенно в подгруппе бессимптомных пациенток. Тем не менее, полученные данные имеют важное практическое значение. Они показывают, что алгоритм диагностики должен быть гибким. В пременопаузе акцент смещается на анализ контуров и типа кровотечения; в постменопаузе с ПМК – на комплексную оценку структуры и толщины; а у бессимптомных пациенток на малейшие признаки структурной неоднородности, требующие повышенной онконастороженности и, возможно, более углубленного обследования с учетом факторов риска.

Заключение.

Таким образом, переход от изолированной оценки толщины эндометрия к комплексному анализу, интегрирующему эхографические паттерны, менопаузальный статус и характер клинических проявлений, позволяет существенно повысить эффективность ранней диагностики рака эндометрия на первичном амбулаторном этапе.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, Jemal A. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin*. 2024;74(3):229-263. doi: 10.3322/caac.21834. Epub 2024 Apr 4. PMID: 38572751.
2. Global cancer cases will jump 77% by 2050, WHO report estimates (2024). Available at: <https://edition.cnn.com/2024/02/02/health/who-cancer-estimates/index.html>.
3. Liu L, Habeshian TS, Zhang J, Peeri NC, Du M, De Vivo I, Setiawan VW. Differential trends in rising endometrial cancer incidence by age, race, and ethnicity. *JNCI Cancer Spectr*. 2023;7(1):pkad001. DOI: 10.1093/jncics/pkad001. PMID: 36625534.
4. Злокачественные новообразования в России в 2024 году (заболеваемость), под ред. А.Д. Каприна. Москва, МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2025. 178 с. ISBN 978-5-85502-311-4
5. Epstein E, Fischerova D, Valentin L, Testa AC, Franchi D, Sladkevicius P, Frühauf F, Lindqvist PG, Mascilini F, Fruscio R, Haak LA, Opolskiene G, Pascual MA, Alcazar JL, Chiappa V, Guerriero S, Carlson JW, Van Holsbeke C, Leone FPG, De Moor B, Bourne T, van Calster B, Installe A, Timmerman D, Verbakel JY, Van den Bosch T. Ultrasound characteristics of endometrial cancer as defined by International Endometrial Tumor Analysis (IETA) consensus nomenclature: prospective multicenter study. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2018 Jun;51(6):818-828. doi: 10.1002/uog.18909. Erratum in: *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2018;52(5):684. DOI: 10.1002/uog.20133.
6. Verbakel JY, Mascilini F, Wynants L, Fischerova D, Testa AC, Franchi D, Frühauf F, Cibula D, Lindqvist PG, Fruscio R, Haak LA, Opolskiene G, Alcazar JL, Mais V, Carlson JW, Sladkevicius P, Timmerman D, Valentin L, Bosch TVD, Epstein E. Validation of ultrasound strategies to assess tumor extension and to predict high-risk endometrial cancer in women from the prospective IETA (International Endometrial Tumor Analysis)-4 cohort. *Ultrasound Obstet Gynecol*. 2020;55(1):115-124. DOI: 10.1002/uog.20374.
7. Stachowicz N, Smoleń A, Cieberta M, Łoziński T, Poziemski P, Borowski D, Czekierdowski A. Risk Assessment of Endometrial Hyperplasia or Endometrial Cancer with Simplified Ultrasound-Based Scoring Systems. *Diagnostics (Basel)*. 2021;11(3):442. DOI: 10.3390/diagnostics11030442.
8. Singh S, Best C, Dunn S, Leyland N, Wolfman WL; CLINI-

CAL PRACTICE – GYNAECOLOGY COMMITTEE. Abnormal uterine bleeding in pre-menopausal women. *J Obstet Gynaecol Can.* 2013;35(5):473-475. DOI: 10.1016/S1701-2163(15)30939-7.

9. Wynants L, Verbakel JYJ, Valentin L, De Cock B, Pascual MA, Leone FPG, Sladkevicius P, Heremans R, Alcazar JL, Votino A, Fruscio R, Epstein E, Bourne T, Van Calster B, Timmerman D, Van den Bosch T. The Risk of Endometrial Malignancy and Other Endometrial Pathology in Women with Abnormal Uterine Bleeding: An Ultrasound-Based Model Development Study by the IETA Group. *Gynecol Obstet Invest.* 2022;87(1):54-61. DOI: 10.1159/000522524.

10. Clarke MA, Long BJ, Sherman ME, Lemens MA, Podratz KC, Hopkins MR, Ahlberg LJ, Mc Guire LJ, Laughlin-Tommaso SK, Bakkum-Gamez JN, Wentzensen N. Risk assessment of endometrial cancer and endometrial intraepithelial neoplasia in women with abnormal bleeding and implications for clinical management algorithms. *Am J Obstet Gynecol.* 2020;223(4):549.e1-549.e13. DOI: 10.1016/j.ajog.2020.03.032.

11. Nguyen PN, Nguyen VT. Combination of B-Mode Ultrasound and Doppler Ultrasound in Approaching to Uterine Intracavitary Pathologies Among Women Above 40 Years with Abnormal Uterine Bleeding: A Multicenter-Based Study from Vietnam. *J Midlife Health.* 2022;13(2):145-151. doi: 10.4103/jmh.jmh_93_22. Epub 2022 Sep 16. Retraction in: *J Midlife Health.* 2022 Jul-Sep;13(3):266. DOI: 10.4103/0976-7800.367765.

12. Xu Y, Xie D. Prediction of Factors Associated with Abnormal Uterine Bleeding by Transvaginal Ultrasound Combined with Bleeding Pattern. *Comput Math Methods Med.* 2022;2022:5653250. doi: 10.1155/2022/5653250. PMID: 35799665; PMCID: PMC9256305.

13. Long B, Clarke MA, Morillo ADM, Wentzensen N, Bakkum-Gamez JN. Ultrasound detection of endometrial cancer in women with postmenopausal bleeding: Systematic review

and meta-analysis. *Gynecol Oncol.* 2020;157(3):624-633. DOI: 10.1016/j.ygyno.2020.01.032.

14. Sladkevicius P, Installé A, Van Den Bosch T, Timmerman D, Benacerraf B, Jokubkiene L, Di Legge A, Votino A, Zannoni L, De Moor B, De Cock B, Van Calster B, Valentin L. International Endometrial Tumor Analysis (IETA) terminology in women with postmenopausal bleeding and sonographic endometrial thickness ≥ 4.5 mm: agreement and reliability study. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2018;51(2):259-268. DOI: 10.1002/uog.18813.

15. ACOG Committee Opinion No. 734: The Role of Transvaginal Ultrasonography in Evaluating the Endometrium of Women With Postmenopausal Bleeding. *Obstet Gynecol.* 2018;131(5):e124-e129. DOI: 10.1097/AOG.0000000000002631.

16. Li Z, Li L. Risk of malignancies among asymptomatic postmenopausal women with thickened endometrium: A cohort study. *Medicine (Baltimore).* 2019;98(6):e14464. DOI: 10.1097/MD.00000000000014464.

17. Alcázar JL, Bonilla L, Marucco J, Padilla AI, Chacón E, Manzour N, Salas A. Risk of endometrial cancer and endometrial hyperplasia with atypia in asymptomatic postmenopausal women with endometrial thickness ≥ 11 mm: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Ultrasound.* 2018;46(9):565-570. DOI: 10.1002/jcu.22631.

18. Минашкина Е.В., Ожогина Е.В., Озерская И.А. Ультразвуковые методы диагностики рецессивности эндометрия. *REJR* 2025; 15(1):193-205. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-193-205.

19. Aggarwal A, Hatti A, Tirumuru SS, Nair SS. Management of Asymptomatic Postmenopausal Women Referred to Outpatient Hysteroscopy Service with Incidental Finding of Thickened Endometrium – A UK District General Hospital Experience. *J Minim Invasive Gynecol.* 2021;28(10):1725-1729. DOI: 10.1016/j.jmig.2021.02.012.

References:

1. Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, Jemal A. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* 2024 May-Jun;74(3):229-263. doi: 10.3322/caac.21834. Epub 2024 Apr 4. PMID: 38572751.

2. Global cancer cases will jump 77% by 2050, WHO report estimates (2024). Available at: <https://edition.cnn.com/2024/02/02/health/who-cancer-estimates/index.html> (in English)

3. Liu L, Habeshian TS, Zhang J, Peeri NC, Du M, De Vivo I, Setiawan VW. Differential trends in rising endometrial cancer incidence by age, race, and ethnicity. *JNCI Cancer Spectr.* 2023 Jan 3;7(1):pkad001. DOI: 10.1093/jncics/pkad001. PMID: 36625534.

4. Malignant neoplasms in Russia in 2024 (incidence), ed. A.D. Kaprin. Moscow, MNIOP.A. Hertzen – filial FGBU “NMIC radiology” Minzdrav Russia, 2025. 178 p. ISBN 978-5-85502-311-4

5. Epstein E, Fischerova D, Valentin L, Testa AC, Franchi D, Sladkevicius P, Frühauf F, Lindqvist PG, Mascilini F, Fruscio R, Haak LA, Opolskiene G, Pascual MA, Alcazar JL, Chiappa

V, Guerriero S, Carlson JW, Van Holsbeke C, Leone FPG, De Moor B, Bourne T, van Calster B, Installé A, Timmerman D, Verbakel JY, Van den Bosch T. Ultrasound characteristics of endometrial cancer as defined by International Endometrial Tumor Analysis (IETA) consensus nomenclature: prospective multicenter study. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2018;51(6):818-828. doi: 10.1002/uog.18909. Erratum in: *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2018 Nov;52(5):684. DOI: 10.1002/uog.20133.

6. Verbakel JY, Mascilini F, Wynants L, Fischerova D, Testa AC, Franchi D, Frühauf F, Cibula D, Lindqvist PG, Fruscio R, Haak LA, Opolskiene G, Alcazar JL, Mais V, Carlson JW, Sladkevicius P, Timmerman D, Valentin L, Bosch TVD, Epstein E. Validation of ultrasound strategies to assess tumor extension and to predict high-risk endometrial cancer in women from the prospective IETA (International Endometrial Tumor Analysis)-4 cohort. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2020;55(1):115-124. DOI: 10.1002/uog.20374.

7. Stachowicz N, Smoleń A, Ciebia M, Łoziński T, Poziemski P, Borowski D, Czekierdowski A. Risk Assessment of Endometrial Hyperplasia or Endometrial Cancer with Simplified Ultrasound-Based Scoring Systems. *Diagnostics (Basel).*

2021;11(3):442. DOI: 10.3390/diagnostics11030442.

8. Singh S, Best C, Dunn S, Leyland N, Wolfman WL; CLINICAL PRACTICE – GYNAECOLOGY COMMITTEE. Abnormal uterine bleeding in pre-menopausal women. *J Obstet Gynaecol Can.* 2013;35(5):473-475. English, French. DOI: 10.1016/S1701-2163(15)30939-7.

9. Wynants L, Verbakel JYJ, Valentin L, De Cock B, Pascual MA, Leone FPG, Sladkevicius P, Heremans R, Alcazar JL, Votino A, Fruscio R, Epstein E, Bourne T, Van Calster B, Timmerman D, Van den Bosch T. The Risk of Endometrial Malignancy and Other Endometrial Pathology in Women with Abnormal Uterine Bleeding: An Ultrasound-Based Model Development Study by the IETA Group. *Gynecol Obstet Invest.* 2022;87(1):54-61. DOI: 10.1159/000522524.

10. Clarke MA, Long BJ, Sherman ME, Lemens MA, Podratz KC, Hopkins MR, Ahlberg LJ, Mc Guire LJ, Laughlin-Tommaso SK, Bakkum-Gamez JN, Wentzensen N. Risk assessment of endometrial cancer and endometrial intraepithelial neoplasia in women with abnormal bleeding and implications for clinical management algorithms. *Am J Obstet Gynecol.* 2020;223(4):549.e1-549.e13. DOI: 10.1016/j.ajog.2020.03.032.

11. Nguyen PN, Nguyen VT. Combination of B-Mode Ultrasound and Doppler Ultrasound in Approaching to Uterine Intracavitary Pathologies Among Women Above 40 Years with Abnormal Uterine Bleeding: A Multicenter-Based Study from Vietnam. *J Midlife Health.* 2022 Apr-Jun;13(2):145-151. doi: 10.4103/jmh.jmh_93_22. Epub 2022 Sep 16. Retraction in: *J Midlife Health.* 2022;13(3):266. DOI: 10.4103/0976-7800.367765.

12. Xu Y, Xie D. Prediction of Factors Associated with Abnormal Uterine Bleeding by Transvaginal Ultrasound Combined with Bleeding Pattern. *Comput Math Methods Med.* 2022;2022:5653250. doi: 10.1155/2022/5653250. PMID: 35799665; PMCID: PMC9256305.

13. Long B, Clarke MA, Morillo ADM, Wentzensen N, Bakkum-Gamez JN. Ultrasound detection of endometrial cancer in

women with postmenopausal bleeding: Systematic review and meta-analysis. *Gynecol Oncol.* 2020;157(3):624-633. DOI: 10.1016/j.ygyno.2020.01.032.

14. Sladkevicius P, Installé A, Van Den Bosch T, Timmerman D, Benacerraf B, Jokubkiene L, Di Legge A, Votino A, Zannoni L, De Moor B, De Cock B, Van Calster B, Valentin L. International Endometrial Tumor Analysis (IETA) terminology in women with postmenopausal bleeding and sonographic endometrial thickness ≥ 4.5 mm: agreement and reliability study. *Ultrasound Obstet Gynecol.* 2018;51(2):259-268. DOI: 10.1002/uog.18813.

15. ACOG Committee Opinion No. 734: The Role of Transvaginal Ultrasonography in Evaluating the Endometrium of Women With Postmenopausal Bleeding. *Obstet Gynecol.* 2018;131(5):e124-e129. DOI: 10.1097/AOG.0000000000002631.

16. Li Z, Li L. Risk of malignancies among asymptomatic postmenopausal women with thickened endometrium: A cohort study. *Medicine (Baltimore).* 2019;98(6):e14464. DOI: 10.1097/MD.00000000000014464.

17. Alcázar JL, Bonilla L, Marucco J, Padilla AI, Chacón E, Manzour N, Salas A. Risk of endometrial cancer and endometrial hyperplasia with atypia in asymptomatic postmenopausal women with endometrial thickness ≥ 11 mm: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Ultrasound.* 2018;46(9):565-570. DOI: 10.1002/jcu.22631.

18. Minashkina E.V., Ozhogina E.V., Ozerskaya I.A. Ultrasonic methods for diagnostics of endometrial receptivity. *REJR* 2025; 15(1):193-205. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-193-205 (in Russian).

19. Aggarwal A, Hatti A, Tirumuru SS, Nair SS. Management of Asymptomatic Postmenopausal Women Referred to Outpatient Hysteroscopy Service with Incidental Finding of Thickened Endometrium – A UK District General Hospital Experience. *J Minim Invasive Gynecol.* 2021;28(10):1725-1729. DOI: 10.1016/j.jmig.2021.02.012.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЦЕНКА МАКРОКАЛЬЦИФИКАЦИИ УЗЛОВ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Тимофеева Л.А.^{1,2}, Александров Ю.К.³, Юманов А.О.¹, Алексеев С.С.¹

1 – ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». г. Чебоксары, Россия.

2 – БУ «Городская клиническая больница №1» МЗ Чувашской Республики. г. Чебоксары, Россия.

3 – ФГБОУ ВО «Ярославский государственный медицинский университет». г. Ярославль, Россия.

Среди патологических структур, выявляемых в узлах щитовидной железы (ЩЖ) при ультразвуковом исследовании (УЗИ), макрокальцификаты являются одними из наиболее частых.

Цель исследования. Определить диагностическое и прогностическое значение различных видов макрокальцификации очаговых образований, выявляемых при ультразвуковом исследовании щитовидной железы.

Материалы и методы. Проведено ретроспективное изучение данных УЗИ у 234 пациентов с узловыми образованиями щитовидной железы, имеющими признаки макрокальцификации. Из общего числа оперированных пациентов были отобраны 234 пациента с верифицированным патоморфологическим диагнозом. По данным морфологического исследования доброкачественные неопухолевые заболевания щитовидной железы (1-я группа) были установлены в 177 случаях (75,6%), опухоли щитовидной железы (2-я группа) – в 57 случаях (24,4%). У всех пациентов при УЗИ и морфологическом исследовании в узлах щитовидной железы были выявлены макрокальцификаты различного строения. Проведена градация узлов щитовидной железы по видам и строению макрокальцификатов, направленная на определение прогностического значения ультразвукового признака.

Результаты и обсуждение. Исследование показало, что ультразвуковой признак «макрокальцификаты» имеет нестабильный неранжированный уровень достоверности при различных вариантах кальцификации узлов щитовидной железы с различным морфологическим строением. Отсутствие единой систематизации макрокальцификатов узлов щитовидной железы вносит диссонанс в оценку специалистами ультразвуковых изображений узлов щитовидной железы. Поскольку при диагностике доброкачественных неопухолевых узлов щитовидной железы ультразвуковые критерии волатильны, а кальцификация является одним из ключевых скрипторов, то большинство доброкачественных узлов с макрокальцификатами потенциально рассматриваются как опухоли. При сравнительной оценке УЗИ доброкачественных образований и опухолей щитовидной железы установлено, что ультразвуковой признак «макрокальцификаты» нельзя оценивать как маркер рака щитовидной железы, он является прогностически зависимым от вида кальцификации.

Заключение. Ультразвуковой признак «макрокальцификаты», выявляемый при обследовании пациентов с узловыми образованиями щитовидной железы, неоднозначен по значению. Он обладает различным диагностическим весом при различных видах патологии. Вместе с тем, он в большинстве случаев трактуется специалистами УЗИ однозначно негативно с креном в гипердиагностику с акцентом на онкопатологию. Необходимо ранжировать макрокальцификаты по их строению, чтобы снизить вероятность их негативных оценок, поскольку частота их выявления в доброкачественных узлах выше, чем в опухолях щитовидной железы.

Ключевые слова: щитовидная железа, узловый зоб, макрокальцификат, ультразвуковое исследование.

Контактный автор: Тимофеева Л.А., e-mail: adabai@mail.ru

Для цитирования: Тимофеева Л.А., Александров Ю.К., Юманов А.О., Алексеев С.С.. Ультразвуковая оценка макрокальцификации узлов щитовидной железы. REJR 2026; 16(1):93-103. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-93-103.

ULTRASOUND ASSESSMENT OF THYROID NODULES MACROCALCIFICATION

Timofeeva L.A.^{1,2}, Alexandrov Yu.K.³, Yumanov A.O.¹, Alekseev S.S.^{1,2}

1 - I.N. Ulianov Chuvash State University. Cheboksary, Russia.

2 - City Clinical Hospital No. 1. Cheboksary, Russia.

3 - Yaroslavl State Medical University. Yaroslavl, Russia.

At ultrasound examination macrocalcifications are the most common among the pathological structures detected in the nodes of the thyroid gland.

Purpose. To determine the diagnostic and prognostic significance of various macrocalcification types of focal masses detected by thyroid gland ultrasound examination.

Materials and methods. A retrospective study of ultrasound data was conducted in 234 patients with thyroid nodules showing signs of macrocalcification. 234 patients with verified pathomorphological diagnosis were selected from the total number of operated patients. According to morphological examination, benign non-cancerous thyroid diseases (group 1) were detected in 177 cases (75,6%), thyroid tumors (group 2) – in 57 cases (24,4%). In all patients, ultrasound and morphological examination revealed macrocalcifications of various structures in the thyroid nodules. The thyroid nodules were graded according to the types and structure of macrocalcifications aimed at determining the prognostic value of the ultrasound feature.

Results and discussion. The study showed that the ultrasound sign “macrocalcifications” has an unstable, unranked level of confidence in different variants thyroid nodules calcification with different morphological structures. The lack of a unified systematization of macrocalcifications of thyroid nodules introduces dissonance in the assessment of ultrasound images of thyroid nodules by specialists. Since ultrasound criteria are volatile in the diagnosis of benign non-cancerous thyroid nodules and calcification is one of the key factors, most benign nodules with macrocalcifications are potentially considered to be as tumors. Ultrasound comparative assessment of benign masses and tumors in the thyroid gland has revealed that the ultrasound sign of “macrocalcifications” cannot be evaluated as a marker of thyroid cancer, it is prognostically dependent on the type of calcification.

Conclusion. The ultrasound sign of “macrocalcification” detected during the examination of patients with nodular masses of the thyroid gland is ambiguous in its significance. It has a different diagnostic weight for different types of pathology. At the same time, in most cases, this is interpreted by ultrasound specialists unambiguously negatively with a bias towards overdiagnosis with an emphasis on oncopathology. It is necessary to rank macrocalcifications according to their structure which reduces the probability of their negative assessments, since the frequency of their detection in benign thyroid nodules is higher than in thyroid tumors.

Keywords: thyroid gland, nodular goiter, macrocalcification, ultrasound examination.

Corresponding author: Timofeeva L.A., e-mail: adabai@mail.ru

For citation: Timofeeva L.A., Alexandrov Yu.K., Yumanov A.O., Alekseev S.S. Ultrasound assessment of thyroid nodules macrocalcification. REJR 2026; 16(1):93-103. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-93-103.

Received: 31.03.26

Accepted: 06.05.26

Среди патологических структур, выявляемых в узлах щитовидной железы при УЗИ, макрокальцификаты являются одними из наиболее частых [1]. Современные УЗИ-аппараты, имеющие различные опции визуализации дают возможность на дооперационном этапе проводить предварительную диагностику узлов щитовидной железы, исходя из вероятной кальцификации узлов различного морфологического строения [2, 3]. В отличие от солидных (железистых) узлов щитовидной железы, в диагностике которых результаты цитологического исследования являются определяющими, в узлах с преобладанием кальцифицированных структур большее значение приобретает УЗИ, позволяющее найти не только участки узла, свободные от кальцификатов, но и определяющее необходимость биопсии таких узлов [4]. Официальная классификация макрокальцификатов узлов щитовидной железы отсутствует, несмотря на большое число публикаций, посвященных этой теме [5, 6]. Вместе с тем у специалистов УЗИ-диагностики сформировались определенные позиции относительно центральных, периферических и смешанных макрокальцификатов, их значения и потенциала злокачественности [7]. Большинство научных исследований, касающихся макрокальцификатов, являются анализом ретроспективного материала [8, 9]. Проспективные исследования, посвященные макрокальцификатам узлов щитовидной железы, отсутствуют. Можно уверенно сказать, что мнения специалистов неоднозначны, что явилось стимулом для этой работы, направленной на получение объективных данных [10].

Цель исследования.

Определить диагностическое и прогностическое значение различных вариантов макрокальцификации очаговых образований щитовидной железы, выявляемых при ультразвуковом исследовании.

Материалы и методы.

Исследование нерандомизированное, открытое, когортное. Исследование заключалось в ретроспективной оценке результатов обследования (УЗИ органов шеи) 234 пациентов с очаговыми образованиями щитовидной железы, которым были выполнены операции. На основании анализа были отмечены особенности макрокальцификатов при различных патоморфологических процессах. Критерием отбора в исследование было выявление при УЗИ в узлах щитовидной железы гиперэхогенных структур в паренхиме и капсуле узла щитовидной железы размером

более 2 мм, имеющих акустическую тень.

Согласно задачам исследования с учетом критериев включения были отобраны 234 клинических случая (17,44% от общего числа оперированных больных) с протоколом УЗИ, включавшим в себя описание основных ультразвуковых признаков, учитываемых EU-TIRADS [11]. По данным патоморфологического исследования доброкачественные неопухолевые заболевания были установлены в 177 случаях (75,64%), а опухоли щитовидной железы, в основном папиллярный рак – в 57 случаях (24,36%). Возраст пациентов 1-й группы был от 19 до 77 лет (средний возраст – 58,1±13,4 года). Во 2-й группе возраст пациентов был от 27 до 72 лет (средний возраст составил 53,4±9,3 года). В 1 и 2 группах пациентов преобладали женщины: 1-я группа – 156 (88,14%), 2-я группа – 52 (91,23%).

Перед операцией всем пациентам проводилось УЗИ органов шеи на аппаратах Aplio XG (Toshiba, Япония) и Sono Scape с широкополосным линейным датчиком сканирования с диапазоном частот 7–14 МГц. УЗИ выполняли по протоколу мультипараметрического УЗИ, которое включало в себя В-режим, ЦДК, ЭД, а при необходимости соноэластографию. Выявленные при выполнении исследования ультразвуковые данные вносились в протокол с градацией по EU-TIRADS. Данные макрокальцификатов фиксировались в виде фото в нескольких проекциях. Выявленные макрокальцификаты систематизировали согласно классификации (рис. 1), которая была сгенерирована на основании литературных данных и послужила матрицей исследования. Данные УЗИ сопоставлялись с результатами морфологического исследования препарата. При патоморфологическом исследовании подтверждение макрокальцификации основывалось на наличии кальцифицированных структур в капсуле и паренхиме узлов щитовидной железы, которые требовали декальцинации на этапе подготовки препаратов. По итогам сопоставления данных УЗИ и морфологии оценивались варианты макрокальцификатов при различных патологических процессах.

Количественные данные, подчиняющиеся нормальному распределению, рассчитывали по стандартным показателям. Для статистической достоверности результатов использовали критерий Стьюдента. Математическая обработка данных проводилась с использованием программных пакетов Stat Soft STATISTICA 10.0 и Microsoft Office Excel 2016.

Результаты.

Согласно задачам исследования с уче

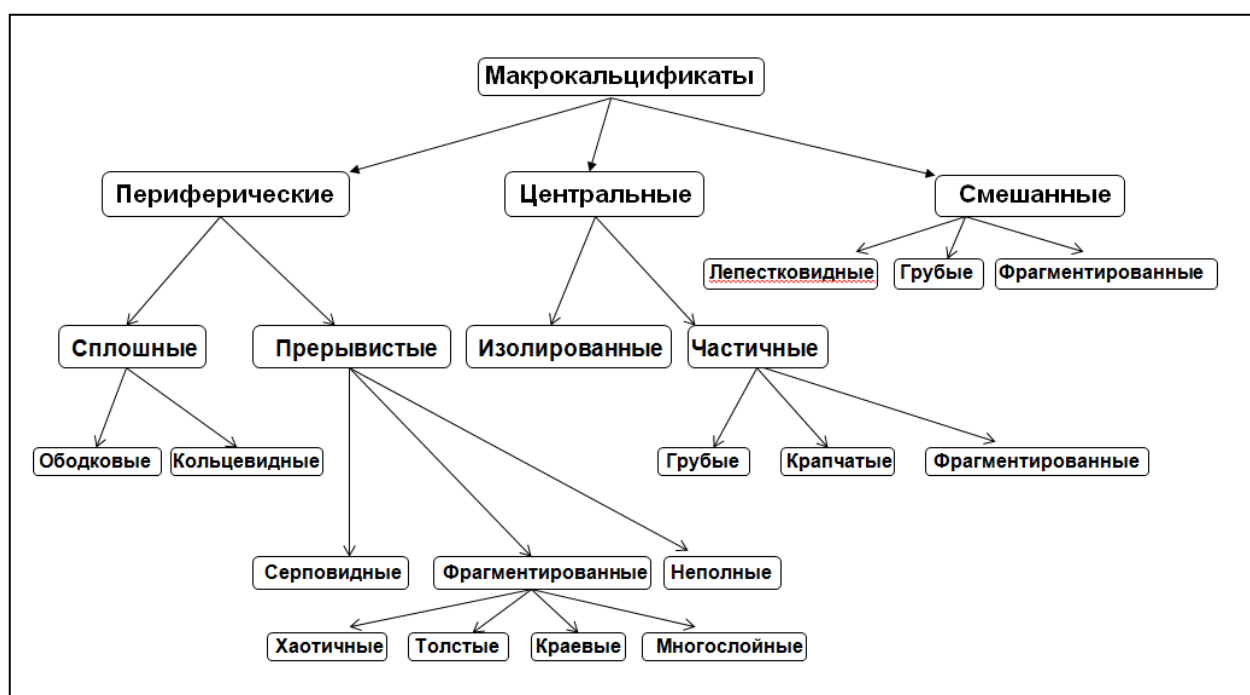


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Схема.

Классификация макрокальцификатов узлов щитовидной железы.

Fig. 1. Scheme.

Classification of macrocalcifications of thyroid nodules.

том критериев включения были отобраны 234 клинических случая (25,56% от числа 1342 оперированных больных с различной патологией ЩЖ). При исследовании установлено, что узловатая патология щитовидной железы, нуждающаяся в хирургическом лечении чаще выявляются у женщин. Также подтверждено, что частота образования узлов щитовидной железы нарастает с возрастом, что в значительной степени связано с изменением гормонального статуса. Анализ влияния указанных параметров на формирование конкретных видов макрокальцификатов в узлах щитовидной железы не позволил выявить закономерности. Также исследование показало, что структура макрокальцификатов не определяется их локализацией в узле и локализацией самих узлов в щитовидной железе.

Вместе с тем на основании ретроспективной оценки материала было подтверждено, что ультразвуковой признак «макрокальцификаты» является объективным показателем существенной грубой морфологической перестройки в узлах щитовидной железы. С целью определения значения ультразвуково-

го признака «макрокальцификаты» узлов щитовидной железы был проведен анализ ультразвуковых особенностей кальцифицированных структур, выявленных в узлах различного морфологического строения.

Макрокальцификаты являются очень неоднородной группой, и имеют различное прогностическое значение. В частности, вариантами «периферической» кальцификации узлов щитовидной железы являются «сплошные» и «прерывистые» макрокальцификаты. «Сплошные» периферические макрокальцификаты могут быть «ободковыми» [12] и «кольцевидными» [13] (рис. 2). «Прерывистые» периферические макрокальцификаты сложно систематизировать ввиду многообразия вариантов (рис. 3). Центральные макрокальцификаты могут быть «изолированными» (массивными) (рис. 4) и «частичными». В свою очередь «частичные» макрокальцификаты могут быть «грубыми» (рис. 5), «крапчатыми» и «фрагментированными» (рис. 6). Сочетание центральной и периферической кальцификации узлов щитовидной железы может быть в виде смешанных кальцификатов: «грубых» (рис. 7), «фрагментированных»

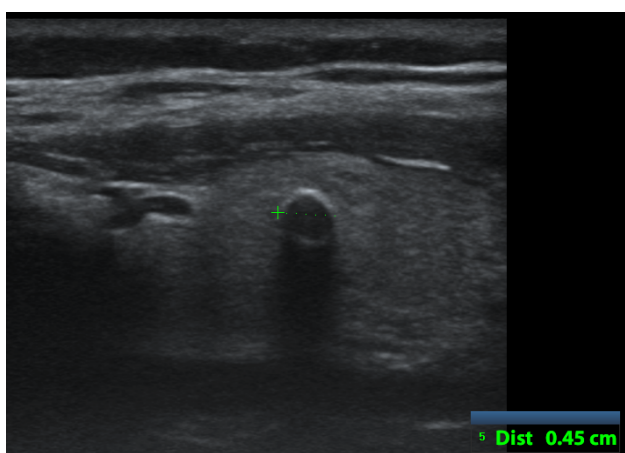


Рис. 2 а (Fig. 2 a)

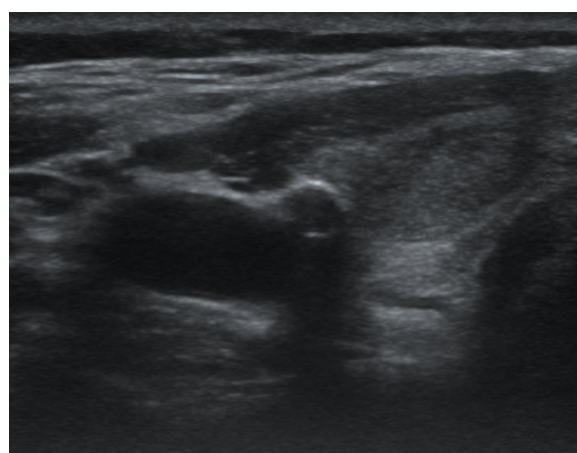


Рис. 2 б (Fig. 2 b)



Рис. 2 в (Fig. 2 c)

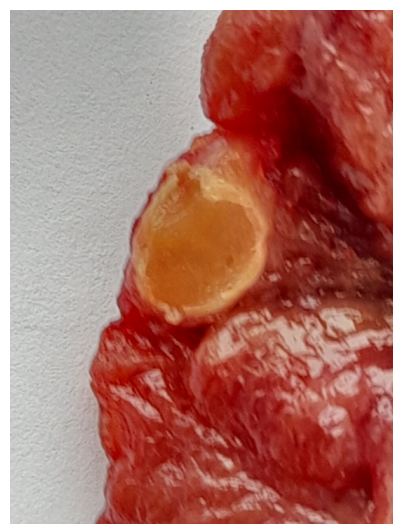


Рис. 2 г (Fig. 2 d)

Рис. 2. Сплошная периферическая ободковая макрокальцификация: а – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный скан). б – УЗИ щитовидной железы, В-режим (поперечный скан). в – Макропрепарат. г – Макропрепарат кальцифицированного узла при увеличении.

а – Гипоэхогенное неоднородное образование размером 0,4 см с четкими ровными гиперэхогенными контурами, дающее акустическую тень (макрокальцификация по типу «яичной скорлупы»). б – Тот же узел. в – Множественные фолликулярные аденомы (белые стрелки) правой доли щитовидной железы с кровоизлияниями (следы выполненной пункции). Узел с периферической макрокальцификацией (черная стрелка) по типу «яичной скорлупы», изображенный на сонограммах. г – Патоморфологическое исследование – фолликулярная аденома щитовидной железы.

Fig. 2. Continuous macrocalcification of the peripheral rim: а – ultrasound examination of the thyroid gland, B-longitudinal scanning mode. б – ultrasound examination of the thyroid gland, C-transverse scanning mode. в – gross specimen. д – gross specimen of a calcified enlarged node.

а – Hypoechoic heterogeneous mass measuring 0,45 cm with clear, even hyperechoic contours, giving an acoustic shadow (eggshell-type macrocalcification); б – The same nodule; в – Multiple follicular adenomas (white arrows) of the right lobe of the thyroid gland with hemorrhages (performed puncture evidence). A nodule with peripheral macrocalcinosis (black arrow) of the “eggshell” type, shown on ultrasound images); д- pathomorphological examination – follicular adenoma.

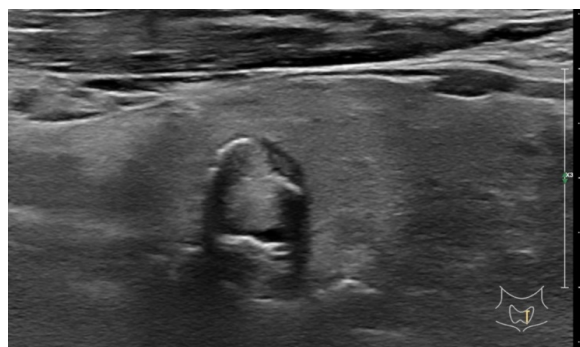


Рис. 3 а (Fig. 3 a)

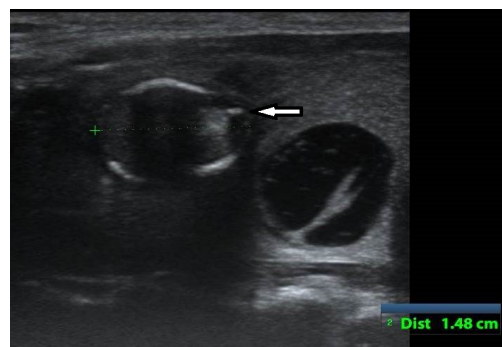


Рис. 3 б (Fig. 3 b)

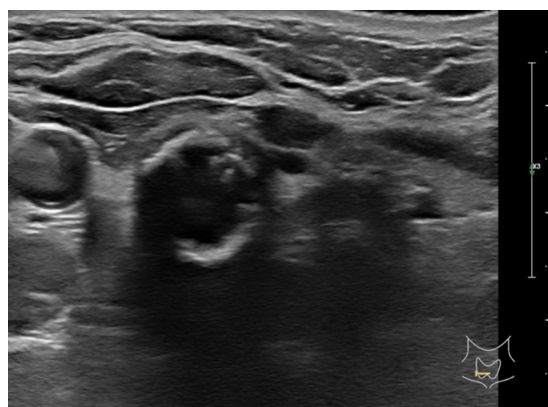


Рис. 3 в (Fig. 3 c)

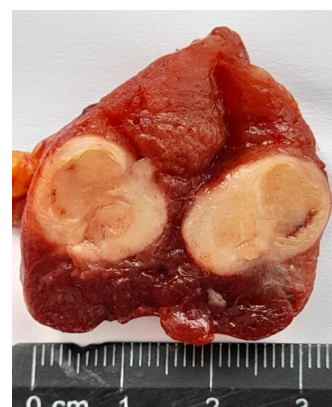


Рис. 3 г (Fig. 3 d)

Рис. 3. «Прерывистые» периферические макрокальцификаты узлов щитовидной железы: а – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный скан). б – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный скан). в – Макропрепарат. г – Макропрепарат щитовидной железы.

а – изоэхогенный неоднородный узел левой доли ЩЖ с ровными четкими контурами с множественными гиперэхогенными линейными локусами в периферической части узла менее 50% поверхности, с краевой акустической тенью. б- гипоехогенный неоднородный узел 1,2 см в правой доле ЩЖ с ровными четкими контурами с множественными дугообразными и точечными (стрелка) гиперэхогенными линейными локусами в периферической части узла. ТАПБ – фолликулярная опухоль ЩЖ (Bethesda IV). Патоморфологическое исследование – атипичная аденома ЩЖ. в – Гипоехогенный неоднородный узел правой доли ЩЖ с неровными четкими контурами с фрагментированными утолщенными гиперэхогенными участками в периферической части узла, дающими акустическую тень. ТАПБ – признаки коллоидного зоба (Bethesda III). г – Узел правой доли ЩЖ с толстой кальцифицированной капсулой. Патоморфологическое исследование – папиллярный рак ЩЖ (инкапсулированный вариант).

Fig. 3. “Periodic” peripheral macrocalcifications of thyroid nodules: a – thyroid ultrasound, B-mode (longitudinal scan). b – thyroid ultrasound, B-mode (longitudinal scan). c – Thyroid ultrasound, B-mode (transverse scan). d – Thyroid gross specimen.

а – Isoechoic heterogeneous nodule in the left lobe of the thyroid gland with smooth, clear margins and multiple hyperechoic linear foci in the peripheral portion of the nodule covering less than 50% of the surface area with marginal acoustic shadowing. б – Hypoechoic heterogeneous nodule 1,2 cm in the right lobe of the thyroid gland with smooth, clear margins and multiple arcuate and punctate (arrow) hyperechoic linear foci in the peripheral portion of the nodule. FNA – follicular thyroid tumor (Bethesda IV). Pathological examination – atypical thyroid adenoma. в – Hypoechoic, heterogeneous nodule in the right lobe of the thyroid gland with irregular, clear contours and fragmented, thickened, hyperechoic areas in the peripheral portion of the nodule creating an acoustic shadow. FNA shows signs of colloid goiter (Bethesda III). d – The nodule in the right lobe of the thyroid gland with a thick calcified capsule. Pathological examination reveals papillary thyroid cancer (encapsulated variant).

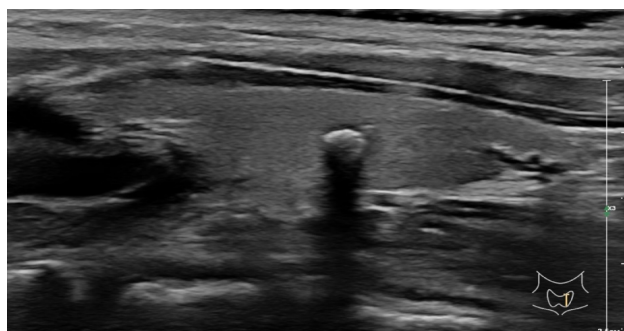


Рис. 4 а (Fig. 4 а)

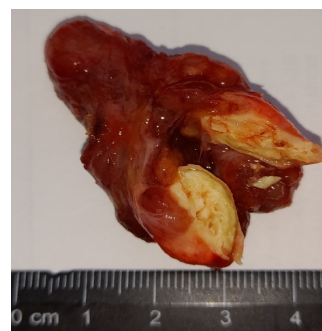


Рис. 4 б (Fig. 4 б)

Рис. 4. Изолированные центральные макрокальцификаты узлов щитовидной железы: а – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный скан). б – Макропрепарат.

а - Гиперэхогенный узел левой доли щитовидной железы 0,5х0,5х0,4 см с акустической тенью (ТАПБ – неинформативный материал (Bethesda I)).

б - Макрокальцификат узла щитовидной железы 1,5 см.

Fig. 4. Isolated central macrocalcifications of thyroid nodules: а – ultrasound of the thyroid gland, B-mode (longitudinal scan). б – gross specimen.

а - Hyperechoic node of the left lobe of the thyroid gland measuring 0,5x0,5x0,4 cm with a sound shadow (FNA – uninformative material (Bethesda));

б - The macrocalcification of the thyroid gland nodule is 1,5 cm.

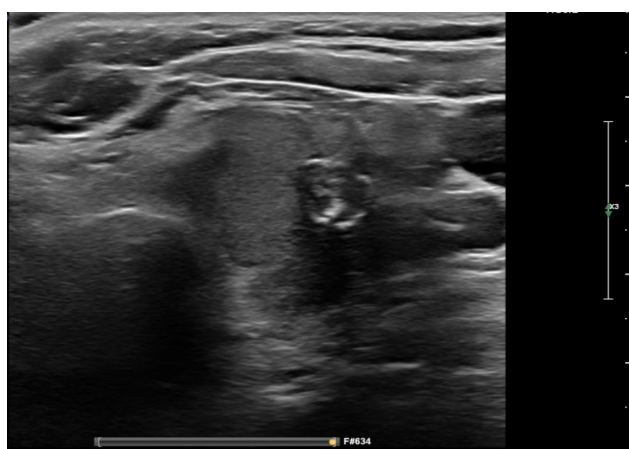


Рис. 5 а (Fig. 5 а)

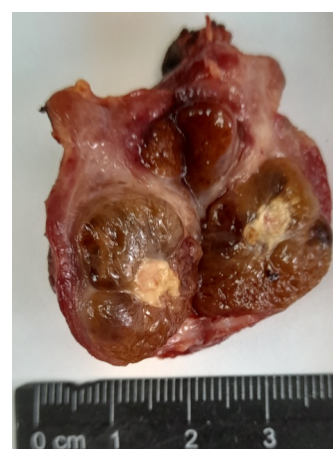


Рис. 5 б (Fig. 5 б)

Рис. 5. Центральная частичная фрагментированная макрокальцификация узла щитовидной железы: а – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный скан). б – Макропрепарат.

а – Неоднородный изоэхогенный узел левой доли щитовидной железы 2,5х3,0 см с центральной гиперэхогенной зоной с акустической тенью. ТАПБ – фолликулярная неоплазия (Bethesda IV). б – Узел левой доли щитовидной железы с макрокальцификацией в центральной части. Патоморфологическое исследование – фолликулярная аденома с явлениями кальцификации.

Fig. 5. Central partial fragmented macrocalcinous thyroid nodule: а – ultrasound examination of the thyroid gland, B-mode (longitudinal scan). б – gross specimen.

а – An inhomogeneous isoechoic nodule of the left lobe of the thyroid gland measuring 2,5x3,0 cm with a central hyperechoic zone with an acoustic shadow. FNA – follicular neoplasia (Bethesda IV); б – A nodule in the left lobe of the thyroid gland with macrocalcification in the central part. Pathomorphological examination – follicular adenoma with calcification.

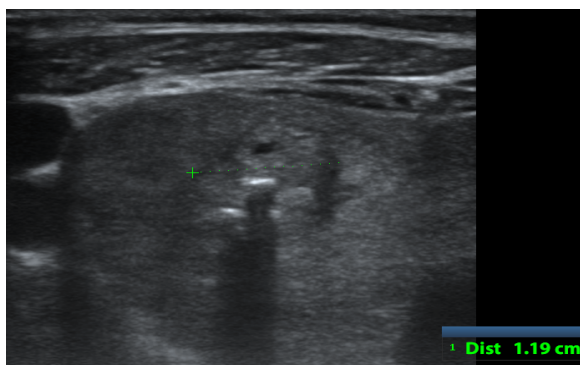


Рис. 6 а (Fig. 6 а)

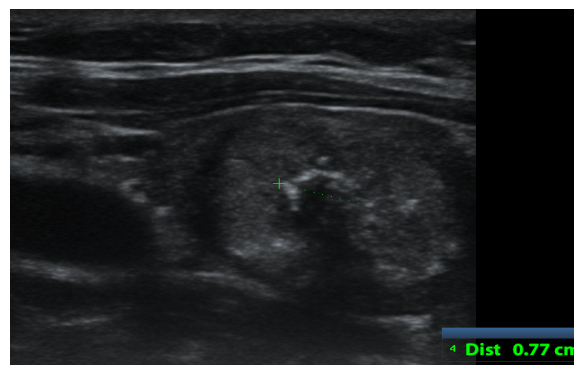


Рис. 6 б (Fig. 6 б)

Рис. 6. Фрагментированная центральная макрокальцификация узлов щитовидной железы: а – УЗИ щитовидной железы, В-режим (поперечный скан). б – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный поперечный скан).

а – изоэхогенный неоднородный узел правой доли щитовидной железы с неровными нечеткими контурами с множественными гиперэхогенными локусами до 0,4 см в центральной части. б – изоэхогенный неоднородный узел левой доли щитовидной железы с ровными четкими контурами с множественными гиперэхогенными локусами до 0,8 см в центральной части.

Fig. 6. Fragmented central macrocalcification of thyroid nodules: а – ultrasound of the thyroid gland, B-mode (transverse scan). б – ultrasound of the thyroid gland, B-mode (longitudinal transverse scan).

а – isoechoic heterogeneous nodule of the right lobe of the thyroid gland with uneven indistinct contours with multiple hyperechoic foci up to 0.4 cm in size in the central part; б – an isoechoic heterogeneous nodule in the left lobe of the thyroid gland with smooth, clear contours and multiple hyperechoic foci up to 0.8 cm in size in the central part.

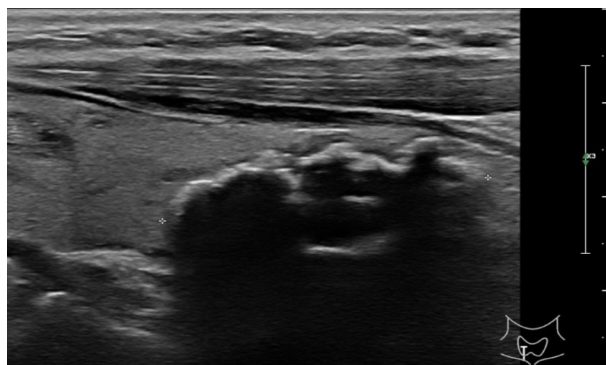


Рис. 7 а (Fig. 7 а)

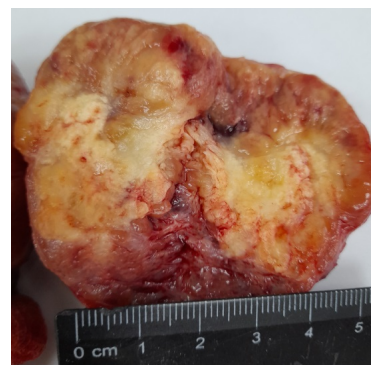


Рис. 7 б (Fig. 7 б)

Рис. 7. Грубая смешанная макрокальцификация узлов щитовидной железы: а – УЗИ щитовидной железы, В-режим (продольный скан). б – Макропрепарат.

а – Гипоэхогенный неоднородный узел правой доли щитовидной железы с неровными нечеткими контурами, с «грубым» вариантом смешанной кальцификации (периферическая по типу «зубьев пилы» и гиперэхогенными участками в центральной части), с акустической тенью. ТАПБ – подозрение на рак щитовидной железы (Bethesda V). б – Массивная макрокальцификация в очаговом образовании щитовидной железы. Патоморфологическое исследование – папиллярный рак щитовидной железы.

Fig. 7. Rough mixed macrocalcification of thyroid nodules: а – ultrasound examination of the thyroid gland, B-longitudinal scanning mode. б – gross specimen.

а – A hypoechoic heterogeneous nodule of the right lobe of the thyroid gland with uneven, indistinct contours, with a “rough” variant of mixed calcification (peripheral by the type of “saw teeth” and hyperechoic areas in the central part), with an acoustic shadow. FNA – suspected thyroid cancer (Bethesda V); б – Massive macrocalcification in the focal mass of the thyroid gland. Pathomorphological examination – papillary thyroid cancer.

и «лепестковидных» [14].

По данным ретроспективного анализа было установлено, что отдельные варианты макрокальцификации узлов щитовидной железы могут быть косвенными «маркерами» патологического процесса, указывая на необходимость проведения биопсии и цитологического исследования (табл. №1).

формирование макрокальцификатов может протекать по нескольким сценариям, в частности по типу «инкрустации» и «импрегнации» солями кальция, «стромального кальциноза», «эктопического костеобразования», «мелкоглыбчатого обызвествления». Полиморфность макрокальцификатов связана с их различным элементным составом (разны-

Таблица №1. Частота встречаемости отдельных видов макрокальцификации в узлах щитовидной железы различного морфологического строения.

Макрокальцификаты узлов ЩЖ	Доброкачественные неопухолевые заболевания		Опухоли		Статистическая значимость <i>P</i>
	абс.	%	абс.	%	
Периферические	78	44,07	4	7,02	0,0012
Сплошные	36	20,34	2	3,51	0,0024
Прерывистые	42	23,73	2	3,51	0,0019
Центральные	82	46,33	23	40,35	0,4317
Изолированные	13	7,34	3	5,26	0,5911
Частичные	69	38,98	20	35,08	0,6041
Смешанные	17	9,60	30	52,63	0,0071
ИТОГО	177	100	57	100	

Из расчетов понятно, почему одни из вариантов макрокальцификатов попадают в градацию EU-TIRADS2, которая регламентирует возможный отказ от пункционной биопсии, а другие рекомендуют ранжировать как EU-TIRADS5, обязательную для цитологического исследования. Поэтому описание макрокальцификатов в протоколе УЗИ является обязательным, но единые требования к описанию макрокальцификатов узлов щитовидной железы отсутствуют, что является причиной диссонанса в оценках.

Обсуждение.

Многообразие макрокальцификатов узлов щитовидной железы по размерам, строению, особенностям расположения кальцифицированных структур определяется сложным патоморфозом, зависящим от морфологии узлов и времени их существования. Макрокальцификаты выявляются в узлах щитовидной железы различного морфологического строения, причем при доброкачественном (коллоидном, паренхиматозном, смешанном) зобе они встречаются чаще, чем в опухолях. Поскольку патоморфоз макрокальцификатов определяется особенностями морфологии узлов, то они имеют различные вид, структуру и значение. В частности, в отличие от микрокальцификатов («псаммомных телец»),

ми концентрациями водородных ионов, магния, кальция и фосфора), с гормональным статусом и другими факторами.

Большинство специалистов считают макрокальцификаты, как и микрокальцификаты, маркерами рака щитовидной железы [15]. Однако отсутствие глубокого анализа их строения и особенностей ультразвукового отображения их структуры часто приводит к гипердиагностике. К этому необходимо добавить, что биопсия узлов щитовидной железы с макрокальцификатами не всегда технически выполнима, а при оценке препаратов цитологи нередко дают неопределенные формулировки.

Заключение.

Признак «макрокальцификаты» при описании узлов щитовидной железы трактуется специалистами ультразвуковой диагностики неоднозначно, в его оценке в большинстве случаев применяется принцип онкологической настороженности. Однако «макрокальцификаты» выявляются при УЗИ как в опухолях, так и в доброкачественных узлах щитовидной железы, причем в последних – чаще. Анализ ретроспективных данных показал, что «макрокальцификаты» многообразны по размерам и строению. Они имеют различный вид в зависимости от характера

патологии и сроков существования. Упрощенный подход к оценке данного признака приводит к гипердиагностике. Одним из шагов по совершенствованию ультразвуковой диагностики является систематизация «макрокальцификатов» с прогностической целью. Предлагаемый вариант классификации «макрокальцификатов» является предметом

для дальнейшей разработки.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Wang G, Nie F, Wang Y, Wang P, Wang L, Fan X, Ma Z. Value of Echogenic Foci in Diagnosing Papillary Thyroid Carcinoma and Predicting Aggressive Biological Behavior. *J Ultrasound Med.* 2022; 41 (5): 1237-1245. DOI: 10.1002/jum.15815. Epub 2021 Aug 20. PMID: 34415647.
2. Тимофеева Л. А., Сенча А.Н. Мультипараметрическое ультразвуковое исследование с применением классификации TI-RADS в определении диагностической тактики при тиреоидных узловых образованиях. *Практическая медицина.* 2018; 1 (112): 134-139.
3. Тагиль А.О., Бурсуков А.В. Применение вакуумной тонкоигльной аспирационной биопсии образований малого размера при диагностике рака щитовидной железы. *Опухоли головы и шеи.* 2024; 14 (2): 10-19.
4. Тимофеева Л.А., Степанов В.Г., Александров Ю.К., Насруллаев М.Н. Ультразвуковое исследование кальцинированных образований щитовидной железы. *REJR.* 2023; 13 (1): 49-57. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-1-49-57.
5. Зубов А.Д., Кутья А.Е. Особенности ультразвуковой визуализации разных типов кальцификатов щитовидной железы и их сопряженность с онкологическим риском. *Радиология - практика.* 2023; (6): 10-21. DOI: <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2023-6-10-21>.
6. Shin HS, Na DG, Paik W, Yoon SJ, Gwon HY, Noh BJ, Kim WJ. Malignancy Risk Stratification of Thyroid Nodules with Macrocalcification and Rim Calcification Based on Ultrasound Patterns. *Korean J Radiol.* 2021; 22 (4): 663-671. DOI: 10.3348/kjr.2020.0381. Epub 2021 Feb 2. PMID: 33660454; PMCID: PMC8005340.
7. Степанов В.Г. Ультразвуковая диагностика «кальцифицированных» очаговых образований щитовидной железы. Автореф. канд. дисс. Москва, 2024. 24 с.
8. Şah Ünal FT, Gökçay Canpolat A, Elhan AH, Sevim S, Sak SD, Emral R, Demir Ö, Güllü S, Erdoğan MF, Çorapçioğlu D, Şahin M. Cancer rates and characteristics of thyroid nodules with macrocalcification. *Endocrine.* 2024; 84 (3): 1021-1029. DOI: 10.1007/s12020-023-03650-x. Epub 2023 Dec 26. PMID: 38147262.
9. Ye M, Wu S, Zhou Q, Wang F, Chen X, Gong X, Wu W. Association between macrocalcification and papillary thyroid carcinoma and corresponding valuable diagnostic tool: retrospective study. *World J Surg Oncol.* 2023; 21 (1): 149. DOI: 10.1186/s12957-023-03016-7. PMID: 37194091; PMCID: PMC10186772.
10. Russ G. Risk stratification of thyroid nodules on ultrasonography with the French TI-RADS: description and reflections. *Ultrasonography.* 2016; 35 (1): 25-38. DOI: 10.14366/usg.15027. Epub 2015 Jul 13. PMID: 26324117; PMCID: PMC4701367.
11. Тимофеева, Л.А., Шубин Л.Б. Экспертная оценка стратификационной системы диагностики узловой патологии щитовидной железы. *REJR.* 2019; 9 (1): 48-56. DOI 10.21569/222274152019914856.
12. Kim BM, Kim MJ, Kim EK, Kwak JY, Hong SW, Son EJ, Kim KH. Sonographic differentiation of thyroid nodules with eggshell calcifications. *J Ultrasound Med.* 2008; 27 (10): 1425-30. DOI: 10.7863/jum.2008.27.10.1425. PMID: 18809952.
13. Kim BK, Choi YS, Kwon HJ, Lee JS, Heo JJ, Han YJ, Park YH, Kim JH. Relationship between patterns of calcification in thyroid nodules and histopathologic findings. *Endocr J.* 2013; 60 (2): 155-60. DOI: 10.1507/endocrj.ej12-0294. Epub 2012 Oct 6. PMID: 23047541.
14. Peng Q, Zhang Q, Chen S, Niu C. Petal-Like Calcifications in Thyroid Nodules on Ultrasonography: A Rare Morphologic Characteristic of Calcification Associated With Aggressive Biological Behavior. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2020; (11): 271. DOI: 10.3389/fendo.2020.00271. PMID: 32528405; PMCID: PMC7256483.
15. Liu XN, Duan YS, Wu YS, Brogna MR, Domínguez-Ayala M, Di X, Wang XD. Correlation between ultrasound calcification patterns, and clinicopathological factors and recurrence risk in papillary thyroid carcinoma. *Gland Surg.* 2025; 14 (9): 1821-1834. DOI: 10.21037/gs-2025-324. Epub 2025 Sep 26. PMID: 41142536; PMCID: PMC12552579.

References:

1. Wang G, Nie F, Wang Y, Wang P, Wang L, Fan X, Ma Z. Value of Echogenic Foci in Diagnosing Papillary Thyroid Carcinoma and Predicting Aggressive Biological Behavior. *J Ultrasound Med.* 2022 May; 41 (5): 1237-1245. DOI: 10.1002/jum.15815. Epub 2021 Aug 20. PMID: 34415647.
2. Timofeeva L. A., Sencha A. N. Multiparametric ultrasound examination using the TI-RADS classification in determining diagnostic tactics for thyroid nodular formations. *Practical Medicine.* 2018; 1 (112): 134-139 (in Russian).
3. Tagil A.O., Borsukov A.V. The use of vacuum fine needle aspiration biopsy of small formations in the diagnosis of thyroid cancer. *Head and Neck Tumors.* 2024; 14 (2): 10-19 (in Russian).
4. Timofeeva L.A., Stepanov V.G., Aleksandrov Yu.K., Nasrul-

- laev M.N. Ultrasound examination of calcified formations of the thyroid gland. *REJR*. 2023; 13 (1): 49-57. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-1-49-57 (in Russian).
5. Zubov A.D., Kutya A.E. Features of ultrasound imaging of different types of thyroid calcifications and their association with oncological risk. *Radiology - practice*. 2023; (6): 10-21. DOI: <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2023-6-10-21> (in Russian).
6. Shin HS, Na DG, Paik W, Yoon SJ, Gwon HY, Noh BJ, Kim WJ. Malignancy Risk Stratification of Thyroid Nodules with Macrocalcification and Rim Calcification Based on Ultrasound Patterns. *Korean J Radiol*. 2021; 22(4): 663-671. DOI: 10.3348/kjr.2020.0381. Epub 2021 Feb 2. PMID: 33660454; PMCID: PMC8005340.
7. Stepanov V.G. Ultrasound diagnostics of "calcified" focal thyroid lesions. *Cand. Diss. Abstract*. Moscow, 2024. 24 p. (in Russian).
8. Şah Ünal FT, Gökçay Canpolat A, Elhan AH, Sevim S, Sak SD, Emral R, Demir Ö, Güllü S, Erdoğan MF, Çorapçioğlu D, Şahin M. Cancer rates and characteristics of thyroid nodules with macrocalcification. *Endocrine*. 2024; 84 (3): 1021-1029. DOI: 10.1007/s12020-023-03650-x. Epub 2023 Dec 26. PMID: 38147262.
9. Ye M, Wu S, Zhou Q, Wang F, Chen X, Gong X, Wu W. Association between macrocalcification and papillary thyroid carcinoma and corresponding valuable diagnostic tool: retrospective study. *World J Surg Oncol*. 2023; 21 (1): 149. DOI: 10.1186/s12957-023-03016-7. PMID: 37194091; PMCID: PMC10186772.
10. Russ G. Risk stratification of thyroid nodules on ultrasonography with the French TI-RADS: description and reflections. *Ultrasonography*. 2016; 35 (1): 25-38. DOI: 10.14366/usg.15027. Epub 2015 Jul 13. PMID: 26324117; PMCID: PMC4701367.
11. Timofeeva, L.A., Shubin L.B. Expert assessment of the stratification system for the diagnosis of nodular thyroid pathology. *REJR*. 2019; 9 (1): 48-56. DOI 10.21569/222274152019914856 (in Russian).
12. Kim BM, Kim MJ, Kim EK, Kwak JY, Hong SW, Son EJ, Kim KH. Sonographic differentiation of thyroid nodules with eggshell calcifications. *J Ultrasound Med*. 2008; 27 (10): 1425-30. DOI: 10.7863/jum.2008.27.10.1425. PMID: 18809952.
13. Kim BK, Choi YS, Kwon HJ, Lee JS, Heo JJ, Han YJ, Park YH, Kim JH. Relationship between patterns of calcification in thyroid nodules and histopathologic findings. *Endocr J*. 2013; 60 (2): 155-60. DOI: 10.1507/endocrj.ej12-0294. Epub 2012 Oct 6. PMID: 23047541.
14. Peng Q, Zhang Q, Chen S, Niu C. Petal-Like Calcifications in Thyroid Nodules on Ultrasonography: A Rare Morphologic Characteristic of Calcification Associated With Aggressive Biological Behavior. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2020; 11:271. DOI: 10.3389/fendo.2020.00271. PMID: 32528405; PMCID: PMC7256483.
15. Liu XN, Duan YS, Wu YS, Brogna MR, Domínguez-Ayala M, Di X, Wang XD. Correlation between ultrasound calcification patterns, and clinicopathological factors and recurrence risk in papillary thyroid carcinoma. *Gland Surg*. 2025; 14 (9): 1821-1834. DOI: 10.21037/gs-2025-324. Epub 2025 Sep 26. PMID: 41142536; PMCID: PMC12552579.

APPLICATION OF SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY FOR DIFFERENTIATING PARATHYROID ADENOMAS AND COLLOID THYROID NODULES

Khamzina F.T.^{1,2}, Vagapova G.R.¹, Druzhkova N.B.³

1 - Kazan State Medical Academy, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education.

2 - Occupational health facility of Kazan (Volga region) Federal University.

3 - M.Z. Sigal Regional Clinical Oncological Dispensary, Tatarstan Ministry of Healthcare. Kazan, Russia.

Purpose. To study the efficacy of ultrasound shear wave elastography in differential diagnostics of parathyroid adenomas in primary hyperparathyroidism from nodular masses of the thyroid.

Materials and Methods. The study included a group of 71 patients (69 women and 2 men) with clinically and morphologically confirmed primary hyperparathyroidism and a group of 17 patients with cytologically verified nodular or multinodular colloid goiter (13 women and 4 men), who underwent an ultrasound examination (US) of the thyroid gland (TG) with two-dimensional shear wave elastography (2D-SWE) on the Aixplorer device (SuperSonic Imagine, France).

Results. Quantitative assessment of stiffness was performed in 76 adenomatous altered parathyroid glands (PTG), in 94 visually unchanged PTG, in 33 colloid thyroid nodules and in 64 visually unchanged areas of the thyroid parenchyma.

When comparing the mean values of Young's modulus (E_{mean}) of normal thyroid tissue (10 ± 2.5 kPa) with unchanged parathyroid glands (10 ± 3.7 kPa) and with parathyroid gland adenomas (9.4 ± 3.6 kPa), no significant difference was found ($p = 0.296$ and $p = 0.282$, respectively). Statistically significant differences were obtained when comparing the stiffness of colloid nodules with histologically confirmed parathyroid adenomas with a threshold value of E_{mean} above 12.5 kPa ($p=0.019$). The diagnostic efficiency of the test " $E_{mean} > 12.5$ kPa - colloid nodules" is characterized by a specificity of 81.2% and a sensitivity of 52.9%. (AUC 0.706 ± 0.078).

Conclusion. 2D-shear wave elastography is a promising method of differential diagnosis between parathyroid adenomas in patients with primary hyperparathyroidism and colloidal thyroid nodes. This study demonstrated that parathyroid adenomas are more elastic than colloid nodules. The threshold meaning of $E_{mean} > 12.5$ kPa can be used for their differential diagnostics with specificity of 81.2% (AUC 0.706 ± 0.078).

Keywords: parathyroid glands, ultrasound examination, ultrasound shear wave elastography (SWE), primary hyperparathyroidism (PHPT), parathyroid adenoma, colloid thyroid nodules.

Corresponding author: Khamzina F.T., e-mail: fhamzina@inbox.ru

For citation: Khamzina F.T., Vagapova G.R., Druzhkova N.B. Application of shear wave elastography for differentiating parathyroid adenomas and colloid thyroid nodules. REJR 2026; 16(1):104-114. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-104-114.

Received: 25.07.25

Accepted: 03.09.25

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОГРАФИИ СДВИГОВОЙ ВОЛНОЙ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ АДЕНОМ ПАРАЩИТОВИДНЫХ ЖЕЛЕЗ И КОЛЛОИДНЫХ УЗЛОВ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Хамзина Ф.Т.^{1,2}, Вагапова Г.Р.¹, Дружкова Н.Б.³

1 – Казанская государственная медицинская академия – филиал ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» МЗ РФ. г. Казань, Россия.

2 – Медико-санитарная часть Казанского (Приволжского) Федерального Университета. г. Казань, Россия.

3 – ГАУЗ «Республиканский клинический онкологический диспансер Министерства здравоохранения Республики Татарстан им. проф. М.З. Сигала». г. Казань, Россия.

Цель исследования. Изучить эффективность ультразвуковой эластографии сдвиговой волной в дифференциальной диагностике аденом паращитовидных желез при первичном гиперпаратиреозе от узловых образований щитовидной железы.

Материалы и методы. В исследование включена группа из 71 пациента (69 женщин и 2 мужчин) с клинически и морфологически подтвержденным первичным гиперпаратиреозом (ПГПТ) и группа из 17 пациентов с цитологически верифицированным узловым или многоузловым коллоидным зобом (13 женщин и 4 мужчин), которым было выполнено ультразвуковое исследование (УЗИ) щитовидной железы (ЩЖ) с двумерной эластографией сдвиговой волной (2D-ЭСВ) на аппарате Aixplorer (SuperSonic Imagine, Франция).

Результаты. Количественная оценка жесткости была проведена в 76 аденоматозно измененных паращитовидных железах (ПЩЖ), в 94 визуально неизмененных ПЩЖ, в 33 коллоидных узлах ЩЖ и в 64 визуально неизмененных участках паренхимы ЩЖ.

При сравнении средних значений модуля Юнга (E_{mean}) нормальной тиреоидной ткани ($10 \pm 2,5$ кПа) с неизмененными ПЩЖ ($10 \pm 3,7$ кПа) и с аденомами ПЩЖ ($9,4 \pm 3,6$ кПа), достоверной разницы выявлено не было ($p=0,296$ и $p=0,282$ соответственно). Статистически значимые различия были получены при сопоставлении жесткости коллоидных узлов с гистологически подтвержденными аденомами ПЩЖ с пороговым значением E_{mean} выше 12,5 кПа ($p=0,019$). Диагностическая эффективность теста « $E_{mean} > 12,5$ кПа – коллоидные узлы» характеризуется специфичностью 81,2% и чувствительностью 52,9% ($AUC 0,706 \pm 0,078$).

Заключение. Двумерная ультразвуковая ЭСВ является перспективным методом в дифференциальной диагностике между аденомами ПЩЖ при ПГПТ и коллоидными узлами ЩЖ. Проведенное исследование показало, что аденомы ПЩЖ более эластичные, чем коллоидные узлы. Пороговое значение $E_{mean} > 12,5$ кПа может быть использовано для их дифференциальной диагностики со специфичностью 81,2% ($AUC 0,706 \pm 0,078$).

Ключевые слова: паращитовидные железы, ультразвуковое исследование, ультразвуковая эластография сдвиговой волной, первичный гиперпаратиреоз, аденома паращитовидной железы, коллоидные узлы щитовидной железы.

Контактный автор: Хамзина Ф.Т., e-mail: fhamzina@inbox.ru

Для цитирования: Хамзина Ф.Т., Вагапова Г.Р., Дружкова Н.Б. Применение эластографии сдвиговой волной в дифференциальной диагностике аденом паращитовидных желез и коллоидных узлов щитовидной железы. REJR 2026; 16(1):104-114. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-104-114.

Статья получена: 25.07.25

Статья принята: 03.09.25

Hyperparathyroidism (HPT) is an endocrine disease caused by excessive amounts of parathyroid hormone (PTH) produced by hyperplastic or neoplastic parathyroid. Depending on the etiological factor, primary, secondary, tertiary HPT and pseudo-hyperparathyroidism caused by hyperproduction of PTH by tumors of non-parathyroid origin are distinguished. Hyperparathyroidism occupies the third place in incidence among endocrinal diseases after diabetes and thyroid pathology and also is one of the most frequent causes of the development of osteoporosis and fractures among secondary osteopathy. The annual HPT incidence ranges from 0.4 to 18.8 cases per 100 000 people. The HPT occurrence rises with the age: the prevalence rate in the total population makes 1%, reaches 2% among persons 55 years older, and grows to 2.1-3.4% in postmenopausal women (the ratio of men to women is 1:3). In most cases (85-90%) PHPT is caused by a solitary adenoma of the parathyroid gland, in 5-10% cases – by multiple adenomas or several parathyroid hyperplasia and less frequently (1-5 %) by parathyroid cancer [1,2].

PHPT is a socially important problem of modern medicine because of involvement of most organs and systems into the pathological process, the development of complications such as osteoporosis, pathological fractures, nephrolithiasis, gastric and duodenal ulcers, calcification of blood vessels and heart valves, leading to disability and reducing the quality and duration of life of patients. In the early stages the PHPT is low-symptom or asymptomatic which needs increased attention from specialists since timely diagnosis and surgical removal of parathyroid adenoma can prevent the development of bone-visceral complications of the disease [1,2]. The optimal method of treating PHPT is surgical removal of PTG adenomas, including minimally invasive surgery. The volume and tactics of surgical treatment of GPT largely depend on the results of preoperative topical diagnostics of PTG adenomas. [3,4]. While the efficiency of laboratory diagnostics of HPT approaches 100%, there are still many unresolved issues in the process of determining the localization of altered parathyroid glands.

The sensitivity of ultrasound examination in diagnostics of parathyroid formations varies from 33.3 to 96.8% and depends both from the class of the equipment and the doctor's knowledge of ultrasound diagnostics of parathyroid anatomical variations [5,6]. Difficulties in visualizing parathyroid adenomas arise in the case of their atypical localization and if it is necessary to carry out differential

diagnostics with thyroid nodular formations, lymph nodes, blood vessels, neck muscles and esophagus. The most common problem is the erroneous interpretation of thyroid nodules, present in 20-84% of patients with HPT, especially in cases of their localization on the posterior surface of the gland, as formations of the parathyroid gland [7-10].

The 2D shear wave elastography – a non-invasive method which makes it possible to evaluate elasticity (stiffness) of the tissue under examination by real-time registration of the shear wave deformation degree in 2D mode and to measure the shear wave speed (m/sec) or/and the Young's modulus (kPa) with mapping quantitative elastograms – is a relatively new sphere expanding capabilities of the ultrasound diagnostics [11]. The World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology (WFUMB) has developed leading guidelines for using methods of ultrasound elastography in thyroid diseases [11]. However up till now the role of ultrasound thyroid elastography both in differential diagnostics of the parathyroid gland with nodular formations of the thyroid gland and between various lesions (hyperplasia, adenoma) for various types of HPT has been not defined completely and continues to be widely studied [12-21].

Purpose.

To study the efficacy of ultrasound shear wave elastography in differential diagnostics of parathyroid adenomas in primary hyperparathyroidism from nodular masses of the thyroid.

Materials and methods.

The study included 88 patients divided into two groups: with PHPT and with nodular or multinodular colloid goiter (MNCG). The first group included 71 patients operated on for PHPT, of which 69 (97.2%) were women, with an average age of 59.3 ± 10.6 , and 2 (2.8%) were men, with an average age of 48.5 ± 26.2 (the ratio of men to women was 1:34.5). The second group included 17 patients with cytologically confirmed NCG or MNCG, of which 13 (76.5%) were women, with an average age of 57.2 ± 11.2 and 4 (23.5%) men with an average age of 55.5 ± 12.8 (the ratio of men to women was 1:3.25).

All patients underwent complete examination with the use of clinical, instrumental and laboratory examination technique, including ultrasound examination, parathyroid scintigraphy with ^{99m}Tc -MIBI combined with SPECT and CT, the immunohistochemistry assay of punctate of nodular formations for the presence of parathyroid hormone (PTH) and thyroglobulin (TG). The diagnosis, classification of forms of clinical course of PHPT, differential

diagnosis of the disease were carried out on the basis of criteria proposed by the Russian Association of Endocrinologists (RAE) in 2020 [2].

The standard US examination using the 2D SWE was carried out employing the Aixplorer (SuperSonic Imagine, France) with a linear probe working in the frequency range of 15-4 MHz.

The qualitative characteristics of tissue stiffness were coded in the form of a color map, where stiffer tissues were colored in yellow-red, and softer tissues were colored in shades of blue. The quantitative determination of tissue stiffness (measurement of Young's modulus) was performed within the color window and assessed using the standard thyroid examination scale from 0 to 80 kilopascals (kPa). The area of interest was the survey window/quantitative assessment box (Q-box). The Q-box size was 2-4 mm. Cystic changes and calcifications were removed beyond the Q-box. Scanning was carried out without additional compression, to stabilize the image; the hand position in the area of interest was fixed for at least 4 seconds. The Young's modulus value (kPa) was automatically shown on the screen of

the device. Mean (Emean) and maximum (Emax) Young's modulus values were analyzed.

Statistical processing was carried out using the statistical software package SPSS (v.18.0) using nonparametric statistical methods, the Mann-Whitney and Kruskal-Wallis tests were used. The evaluation of correlations between pairs of quantitative characteristics was carried out using the nonparametric Spearman rank coefficient. Contingency tables were analyzed using the χ^2 test. Quantitative data, which followed a normal distribution, are presented as $M \pm \sigma$ and minimum and maximum values, data that did not follow a normal distribution are presented as Me [Q25; Q75], where Me is the median, Q25, Q75 are the 25th and 75th percentile quartiles. Differences between comparison groups were considered statistically significant at $p < 0.05$. The ROC analysis was performed to evaluate the diagnostic capabilities of shear wave ultrasound elastography. The quality of the predictive model obtained by this method was assessed based on the values of the area under the ROC curve with the standard error and 95% confidence interval (CI) and the level of statistical significance.

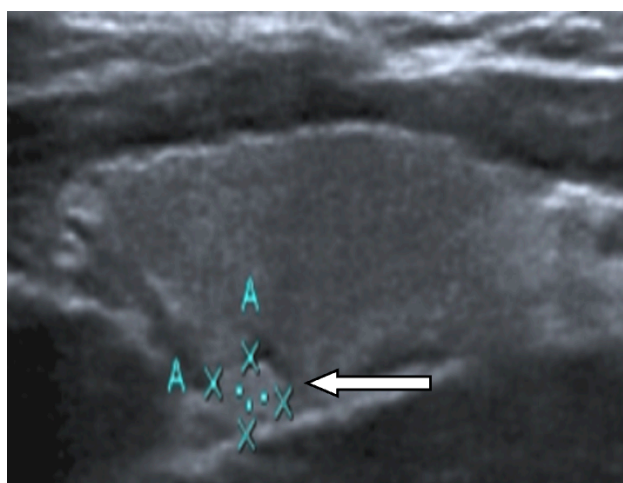


Fig. 1 а (Рис. 1 а)

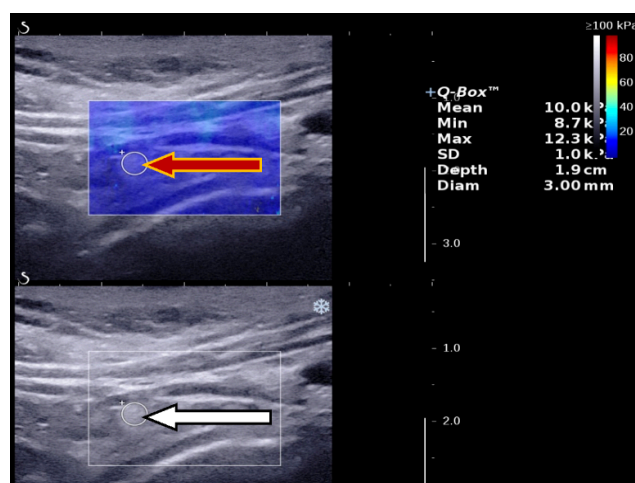


Fig. 1 б (Рис. 1 б)

Fig. 1. а – ultrasound, B-mode, longitudinal section; б – 2D-SWE. Normal upper PTG. Female patient R., 38 y.o.

а – Oval-shaped hyperechoic mass with clear even shape on the posterior surface of the left lobe (marked with cursors and the white arrow).

б – Elastogram of unchanged parathyroid gland characterized by uniform blue coloring (red arrow). Young's modulus value – 10.0 kPa.

Рис. 1. а – УЗИ, В-режим, продольный срез; б – 2D эластография сдвиговой волной. Неизменная верхняя паращитовидная железа. Пациентка Р., 38 лет.

а – Гиперэхогенное образование овальной формы с четкими ровными контурами по задней поверхности левой доли на уровне среднего сегмента (отмечено курсорами и белой стрелкой).

б – Эластограмма характеризуется равномерным синим окрашиванием, (красная стрелка). Значение модуля Юнга – 10,0 кПа.

The results of US examination of the parathyroid gland using the 2D SWE technique, performed before surgery, or before fine-needle aspiration biopsy under ultrasound control, were subsequently compared with the results of postoperative laboratory and morphological studies. The following hypothesis was used for a comparative assessment of preoperative topical diagnostic methods with calculation of sensitivity, specificity and accuracy of each method using well-known formulas:

- True-positive results: the abnormal parathyroid gland has been detected by the method used, the correctness of its localization has been confirmed during surgical intervention with the following histological examination and by the decrease of the PTH and calcium (Ca) level to the target values in the blood serum;

- True-negative results: the abnormal parathyroid gland has not been detected by the method used, this has been confirmed by surgical intervention, histological examination and by the absence of the decrease of the PTH and calcium (Ca) level to the target values in the

blood serum;

- False-positive results: the abnormal parathyroid gland has been detected by the method used, however this has not been confirmed by surgical intervention, histological examination and by the decrease of the PTH and calcium (Ca) level to the target values in the blood serum;

- False-negative result: the abnormal gland has not been detected by the method used, but its localization was detected during the surgical intervention, histological examination and by the decrease of the PTH and calcium (Ca) level to the target values in the blood serum.

Study results.

In B-mode US examination of patients with clinically confirmed PHPT, a total of 170 PTGs were visualized, 76 of which were assessed as altered (adenoma, hyperplasia) based on an increase in size and/or a decrease in echogenicity. Normal parathyroid glands (n=94) were better visualized during longitudinal scanning, as homogeneous formations of a

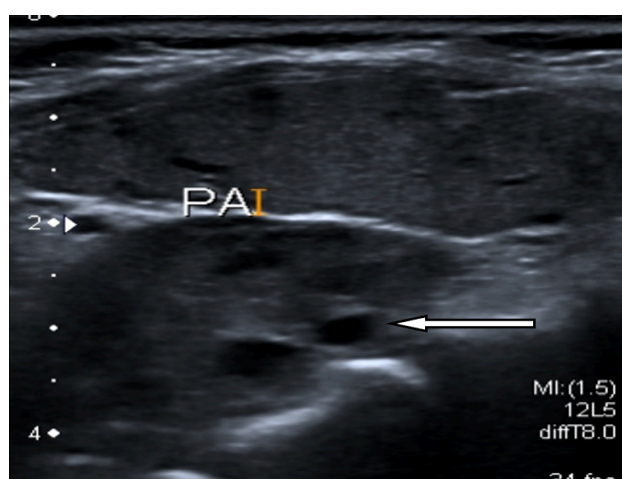


Fig. 2 а (Рис. 2 а)

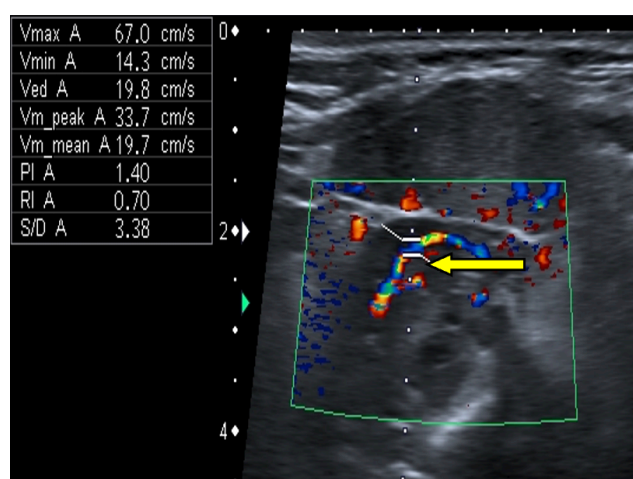


Fig. 2 б (Рис. 2 б)

Fig. 2. Ultrasound, а – B-mode, longitudinal scan; б – CDI-mode, cross section. Parathyroid adenoma. Female patient Z., 78 y.o.

а – Oval-elongated hypoechoic mass with cystic inclusions (white arrow) along the posterior surface of the right lobe.

б – The afferent artery visualized in the pole region (yellow arrow).

Histological diagnosis – parathyroid adenoma.

Рис. 2. УЗИ, а – В-режим, продольный срез; б – режим ЦДК, поперечный срез. Аденома паращитовидной железы. Пациентка З., 78 лет.

Аденома паращитовидной железы. Пациентка З., 78 лет.

а – Гипоэхогенное образование вытянутой овальной формы с кистозными включениями (белая стрелка) по задней поверхности правой доли.

б – В области полюса визуализируется питающая афферентная артерия (желтая стрелка).

Гистологический диагноз – аденома паращитовидной железы.

regular oval, round or bean-shaped form, predominantly of increased echogenicity, with smooth clear contours, up to 6–8 mm long, up to 5 mm wide and up to 4 mm thick, with a volume of 0.1–0.15 cubic cm (fig. 1).

Adenomatous and hyperplastic PTG in 72.4% of cases were visualized as hypoechoic round or oval homogeneous formations with linear dimensions from 9 to 46 mm (19.9 ± 8.5 mm), the volume from 0.17 to 7.7 cm³, with clear, smooth contours, the hyperechoic capsule. In 25% of cases, the echostructure of the altered parathyroid glands was moderately or significantly heterogeneous due to hyperechoic inclusions and anechoic cystic areas. In two observations (2.6%), there was a partial cystic degeneration of adenomas (fig. 2).

We have analyzed results of the ultrasound SWE of the parathyroid adenomas of 71

patients with PHPT, having compared them with results obtained by examination of visually unaltered parathyroid glands, sections of visually unaltered thyroid parenchyma of the same patients and of 17 patients with the thyroid colloid nodules, which in B-mode had ultrasound characteristics similar to parathyroid adenomas (hypoechoic, location on the posterior surface of the upper and lower poles of both lobes of the thyroid gland).

The summarized qualitative evaluation of stiffness was made for 76 pathologically altered parathyroid glands, for 94 visually parathyroid glands, for 64 visually unaltered sections of parenchyma of thyroid lobes and for 33 thyroid colloid nodules. Of the 76 altered parathyroid glands, 33 observations had morphological verification of the diagnosis based on the histological examination of postoperative material. In

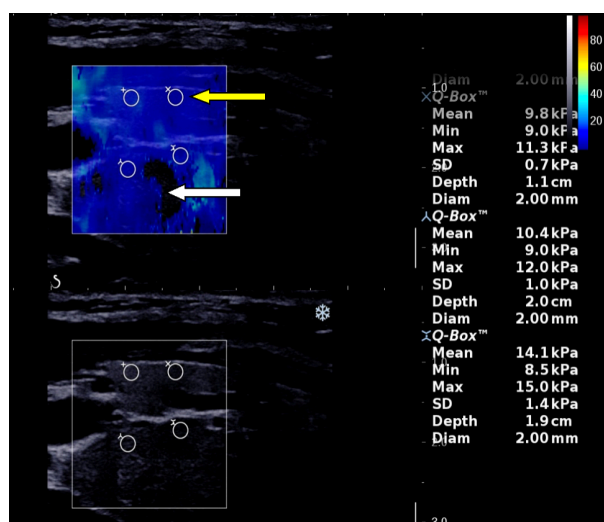


Fig. 3 (Рис. 3)

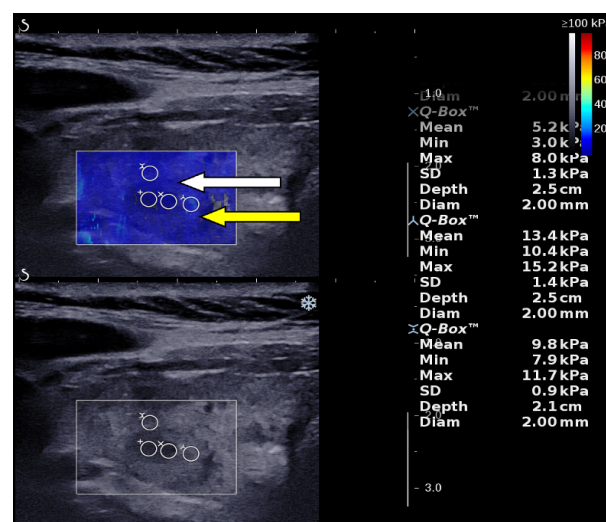


Fig. 4 (Рис. 4)

Fig. 3. 2D-SWE.

Comparison of elasticity values for a parathyroid adenoma and a section of unchanged thyroid parenchyma. Female Patient S., 63 y.o. Uniform blue staining of the parathyroid adenoma, the average value of Young's modulus (E_{mean}) – 10.4 kPa (white arrow). Uniform blue staining of the thyroid parenchyma, the average value of Young's modulus (E_{mean}) – 14.1 kPa (yellow arrow).

Рис. 3. 2D-эластография сдвиговой волной.

Аденома паращитовидной железы. Пациентка С., Сравнение показателей эластичности аденомы паращитовидной железы и участка паренхимы неизмененной щитовидной железы. Пациентка С., 63 лет. Равномерное синее окрашивание аденомы паращитовидной железы, среднее значение модуля Юнга – 10,4 кПа (белая стрелка). Равномерное синее окрашивание паренхимы щитовидной железы, среднее значение модуля Юнга – 14,1 кПа (желтая стрелка).

Fig. 4. 2D-SWE.

Comparison of the average value of Young's modulus (E_{mean}) in the thyroid parenchyma and in the thyroid nodule. Female patient N., 58 y.o. The average value of Young's modulus (E_{mean}) in the thyroid parenchyma – 5.2 kPa (white arrow), in the thyroid nodule – 13.4 kPa (yellow arrow). Histological diagnosis – colloid nodule.

Рис. 4. 2D-эластография сдвиговой волной.

Сравнение среднего значения модуля Юнга в паренхиме щитовидной железы и в узловом образовании щитовидной железы. Пациентка Н., 58 лет. Среднее значение модуля Юнга в паренхиме щитовидной железы – 5,2 кПа (белая стрелка), в узловом образовании – 13,4 кПа (желтая стрелка). Гистологический диагноз – коллоидный узел.

all cases of colloid nodular formations of the thyroid gland, the diagnosis was made on the basis of either postoperative histological examination or cytological examination of the punctate with determination of TG and PTH levels in it. The obtained SWE results are given in Table 1. The Emean and Emax values of unaltered parathyroid glands were comparable with the stiffness of normal thyroid parenchyma ($p=0.979$ and $p=0.832$, respectively).

No significant differences were found when comparing the Emean of Young's modulus of parathyroid adenomas, normal thyroid parenchyma ($p=0.282$) and unchanged parathyroid glands ($p=0.296$). Comparison of Young's modulus Emax values has also not shown significant differences between parathyroid adenomas, normal thyroid parenchyma and unaltered parathyroid glands ($p=0.156$ and $p=0.091$, respectively) (Fig.3).

The values of Young's modulus obtained when assessing the stiffness of colloid thyroid nodules ($n=33$) were: Emean - 12.3 ± 4.3 kPa, Emax - 16.2 ± 3.1 kPa and statistically significantly differed from the elastographic stiffness values of normal thyroid parenchyma ($p=0.006$

The ROC analysis was performed to assess the diagnostic efficiency of SWE and to determine the threshold value of the "stiffness" criterion in the differential diagnosis of nodular formations of the neck (colloid nodes) and parathyroid adenomas, (Fig. 5). The area of the obtained ROC-curve (AUC) has made 0.706 ± 0.078 , which proves the efficiency of the SWE in differential diagnostics of parathyroid adenomas and thyroid nodules. The criterion for selecting the threshold value was the graph point with the maximum total sensitivity and specificity: Cutt-off = max (Se + Sp). At the Emean value above 12.5 kPa, the total sensitivity and specificity of the SWE method is 1.341. Thus, the threshold value of Young's modulus above 12.5 kPa allows distinguishing colloid thyroid nodules from parathyroid adenomas in PHPT with a sensitivity of 52.9% and a specificity of 81.2%.

Discussion.

The threshold value of Young's modulus, obtained in our work, which allows us to distinguish colloid thyroid nodules from parathyroid adenomas in cases of PHPT, is comparable with the data of Golu I. et al., who proposed the

Table 1. Young's modulus values in areas of unchanged thyroid parenchyma, in unchanged parathyroid gland, parathyroid adenomas and colloid thyroid nodules.

п/п	Subject of research	Young modulus value (kPa)		Statistical significance (p) of Young's modulus values (kPa)	
		Emean	Emax	Emean	Emax
1	Thyroid parenchyma (n=64)	$10 \pm 2,5$	$12,6 \pm 2,6$	$p_{1-2}=0,979$ $p_{1-3}=0,282$ $p_{1-4}=0,006$	$p_{1-2}=0,832$ $p_{1-3}=0,156$ $p_{1-4}=0,000$
2	Normal parathyroid gland (n=94)	$10 \pm 3,7$	$12,4 \pm 3,7$	$p_{2-1}=0,979$ $p_{2-3}=0,296$ $p_{2-4}=0,685$	$p_{2-1}=0,832$ $p_{2-3}=0,091$ $p_{2-4}=0,432$
3	Parathyroid adenoma (n=76)	$9,4 \pm 3,6$	$14,1 \pm 4,3$	$p_{3-1}=0,282$ $p_{3-2}=0,296$ $p_{3-4}=0,019$	$p_{3-1}=0,156$ $p_{3-2}=0,091$ $p_{3-4}=0,158$
4	Colloid nodules (n=33)	$12,3 \pm 4,3$	$16,2 \pm 3,1$	$p_{4-1}=0,006$ $p_{4-3}=0,019$	$p_{4-1}=0,000$ $p_{4-3}=0,158$

and $p=0.000$, respectively) and unaltered parathyroid glands ($p=0.031$ and $p=0.001$, respectively), (Fig.4).

Comparison of stiffness of thyroid colloid nodules and parathyroid adenomas showed that, the Emean values of colloid thyroid nodules were significantly higher ($p=0.019$) than similar values of parathyroid adenomas (12.3 ± 4.3 and 9.4 ± 3.6 , respectively). Whereas the Emax values of colloid thyroid nodules and parathyroid adenomas did not differ significantly from each other ($p=0.158$). Thus, the average values of stiffness (Emean) of colloid thyroid nodules were significantly higher compared to parathyroid adenomas in PHPT.

Young's modulus mean value lower than 12.5 kPa with sensitivity of 93% and specificity of 86% (AUC = 0.949; $p < 0,001$) as a cut-off point for the diagnosis of parathyroid adenomas [22]. Cotoi L. et al. defined the stiffness of the parathyroid gland in cases of PHPT in comparison with the thyroid parenchyma and muscle tissue and found that the average value of Young's modulus below 9.58 kPa had the specificity of 94.1%, the sensitivity of 95.6%, and the accuracy of 94.6% ($p < 0.001$) in the differential diagnosis of PTG adenomas [16].

Analysis of the results of a number of studies on the use of 2D-SWE for differential diagnostics of thyroid nodules and parathyroid

adenomas also showed that parathyroid adenomas in cases of PHPT and hyperplastic parathyroid glands in cases of SHPT and THPT have statistically significantly lower stiffness values than thyroid benign nodules or parenchyma (Table 2).

The study of Batur A. et al. using ARFI VTQ technology, in which opposite results were obtained, stands in a separate row: parathyroid adenomas were stiffer than thyroid benign nodules. This is probably due to the use of ARFI

hyperparathyroidism depend on stages of chronic kidney disease (for example, development of terminal chronic renal failure when conditions are created for adenomatous transformation of hyperplastic parathyroid glands) [17]. According to Xiang-Yi Li et al. adenomatous altered parathyroid glands of patients with the secondary hyperparathyroidism who were on dialysis, the Young's modulus values were much higher compared to hyperplastic parathyroid glands (19.42 ± 6.29 kPa versus 14.61 ± 5.69 kPa, $p < 0.001$). It is assumed that the change in the morphological structure from hyperplasia to adenoma of the parathyroid gland leads to a significant increase in the content of fibrous tissue and, consequently, to an increase in the stiffness of the organ [20].

Amzar D. et al. also obtained a statistically significant difference ($p < 0.001$) between the stiffness of hyperplastic parathyroid glands in cases of the secondary hyperparathyroidism and parathyroid adenomas in the cases of primary hyperparathyroidism where the median of the mean values of Young's modulus was 6.96 kPa and 4.86 kPa, respectively. The threshold values of Young's modulus were lower - for PTG adenomas 5.96 kPa and for PTG tissue - 9.58 kPa. [18].

In our work, we have noted a tendency towards higher stiffness of unaltered parathyroid glands ($E_{\text{mean}} = 10 \pm 3.7$) compared to parathyroid gland adenomas ($E_{\text{mean}} = 9.4 \pm 3.6$), ($p = 0.296$).

It appears that the use of ultrasound SWE will expand the capabilities of radiation examination methods for topical diagnostics of altered parathyroid glands in cases of hyperparathyroidism can be included in the ultrasound examination of the neck organs as an additional diagnostic option.

Conclusions.

The results obtained in our work demonstrate that the SWE is a promising method of differential diagnostics of parathyroid adenomas with PHPT and thyroid colloid nodules. The carried research showed that parathyroid adenomas are more elastic than colloid nodules. The threshold value $E_{\text{mean}} > 12.5$ kPa can be used for their differential diagnostics with the specificity of 81.2% (AUC 0.706 ± 0.078).

At the same time the issue of the role of ultrasound elastography in differential diagnostics of various morphological parathyroid pathologies (hyperplasia, adenoma, and cancer) remains unsolved, all this needs further research.

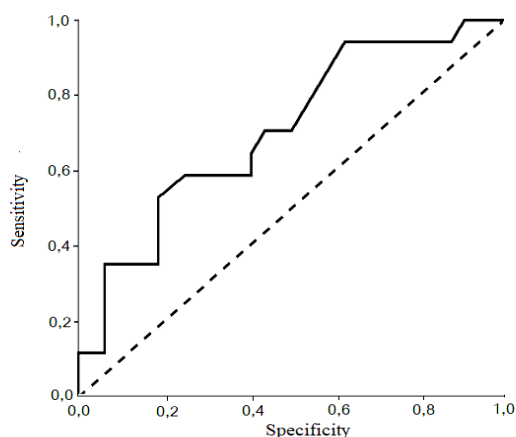


Fig. 5 (Рис. 5)

Fig. 5. ROC curve when analyzing the effectiveness of shear wave elastography in the differential diagnosis of parathyroid adenoma and colloid thyroid nodules.

Рис. 5. ROC-кривая при анализе эффективности эластографии сдвиговой волной в дифференциальной диагностике аденом паращитовидной железы и коллоидных узлов щитовидной железы.

VTQ technology, which has strictly fixed dimensions of the measurement area (0.5×0.6 cm) [13]. In a number of other studies conducted using two-dimensional SWE technology there were advantages associated with the possibility of adjusting the size of the window of interest depending on the area of the analyzed lesion zone which may have influenced the results obtained.

As far as the comparison of stiffness inside the group of altered parathyroid glands (adenomas in cases of PHPT and hyperplasia in cases of SHPT and THPT) is concerned, the data remain contradictory.

SWE values in the cases of the secondary

Table 2. Comparison of elastographic stiffness indices of altered (adenoma, hyperplasia) parathyroid glands with various benign thyroid nodules (BTN) and thyroid parenchyma, muscle tissue according to different authors.

Research authors	Type of elastography	Number of patients	Mean value of the Young's modulus in the comparison group	Mean value of the Young's modulus in parathyroid	Statistical significance (p)
Batur A. et al., 2016, [13]	ARFI VIITQ	21	BTNs 2,20 ± 0,39 m/sec	Parathyroid adenomas 3,09 ± 0,75 m/sec	p<0,001
Golu I. et al., 2017, [14]	2 D SWE	22	Thyroid parenchyma 19,5 ± 7,6 kPa	Parathyroid adenomas and hyperplasia 10,2 ± 4,9 kPa	p=0,007
Stangierski A et al., 2018, [15]	2 D SWE	65	BTNs 24,3 ± 33,8 kPa	Parathyroid adenomas 5,2 ± 7,2 kPa	p<0,001
E.V. Polukhina et al.2018, [8]	2 D SWE	66	BTNs 13,4 (9,5-30,2) кПа	Parathyroid hyperplasia 11,4 (7.2-30,2) кПа	p=0,009
Vlad M. et al., 2019, [16].	2 D SWE	22	BTNs 21,78, ± 1,45 kPa	Parathyroid adenomas 10,18 ± 4,85 kPa	p<0,001
L. Cotoi et al. 2019 [17].	2 D SWE	59	Thyroid parenchyma (median)- 13,76 kPa	Parathyroid hyperplasia<9,74 kPa	p<0,001
			Muscles (median)15,78kPa	Parathyroid hyperplasia<9,98 kPa	
D. Amzar et al., 2021 [18]	2 D SWE	68	Muscles 16,86 (15,08-17,74) kPa	Parathyroid adenomas and hyperplasia ≤ 9,58 kPa	p<0,001
			Thyroid parenchyma 12,08 (10,48-14,78) kPa		p<0,001
D.Stoian et al.,2023 [19]	2 D SWE	86	BYNs 12,2-18,8 kPa	Parathyroid adenomas and hyperplasia ≤ 9,24 kPa	p<0,0001
Own data	2 D SWE	71	Thyroid colloid nodules 12,3 ± 4,3 kPa	Parathyroid adenomas 9,4 ± 3,6 kPa	p=0,019

References:

1. Mokrysheva N.G., A.K. Eremkina, S.S. Mirnaya, Y.A. Krupinova, I.A. Voronkova, I.V. Kim, D.G. Beltsevich, N.S. Kuznetsov, E.A. Pigarova, L.Y. Rozhinskaya, M.V. Degtyarev, L.B. Egshatyan, P.O. Romyantsev, E.N. Andreeva, M.B. Antsiferov, N.V. Markina, I.V. Kryukova, T.L. Karonova, S.V. Lukianov, I.V. Sleptsov, N.B. Chagai, G.A. Melnichenko, I.I. Dedov. Clinical practice guidelines for primary hyperparathyroidism, abridged version. Problems of endocrinology. 2021;67(4):94-124. <https://doi.org/10.14341/probl12801> (In Russian)
2. Bilezikian J.P. et al. Primary hyperparathyroidism. Nature reviews Disease primers, 2016; 2: 16033.
3. Kalinin A.P., A.V. Pavlov, Y.K. Aleksandrov, I.V. Kotova, Y.N. Patrunov, S.N. Pamputis, D.V. Oralov. Methods of parathyroid visualization and parathyroid surgery. Guidelines for doctors. //Under the editorship of the Associate Member of Russian Academy of Medical Sciences, Professor A.P. Kalinin, Vidar Publishers. M., 2010. 231 p. (in Russian).
4. Liu C, Wu B, Huang P, Ding Q, Xiao L, Zhang M, et al. US-guided percutaneous microwave ablation for primary hyperparathyroidism with parathyroid nodules: feasibility and safety study. J Vasc Interv Radiol 2016; 27:867-875
5. Cheung, K., et al., A meta-analysis of preoperative localization techniques for patients with primary hyperparathyroidism. Annals of surgical oncology. 2012. 19(2): 577-583.
6. Wilhelm S.M., Wang T.S., Ruan D.T. et al. The American Association of Endocrine Surgeons Guidelines for Definitive Management of Primary Hyperparathyroidism. JAMA Surg. 2016; 151(10): 959-968.
7. Dudney W.C., Bodenner D., Brendan C., Stack Jr. Parathyroid carcinoma. Otolaryngol Clin North Am. 2010;43(2):441-53. doi: 10.1016/j.otc.2010.01.011.
8. Polukhina E.V. Ultrasound diagnostics of parathyroid pathologies. Vidar Publishers. M., 2019. 212 p. (in Russian).
9. Sleptsova E.A., A.A. Gonchar. The possibilities of ultrasound examination in the differential diagnosis of formations of the parathyroid glands and lymph nodes. Medical news. 2014; 74 (7): 73-76
10. Timofeeva L.A., Stepanov V.G., Alexandrov Yu.K., Nasrullaev M.N. Differential diagnosis of follicular tumors of the thyroid. REJR. 2023; 13(1):49-57. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-1-49-57 (in Russian).
11. Tsuyoshi Shina, Katryn R., Nightingale, Mark L. Palmeri et al WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 1: Basic principles and terminology. Ultrasound in Med. & Biol. 2015; 41 (5): 1126-1147. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2015.03.009>
12. Cosgrove D., Barr R., Bojunga J. et al. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography. Part 4: thyroid. Ultrasound Med. & Biol. 2017; 43 (1): 4-26. Epub 2016
13. Batur A., Atmaca M., Yavuz A. et al. Ultrasound Elastography for Distinction Between Parathyroid Adenomas and Thyroid Nodules. J Ultrasound Med. 2016; 35: 1277-1282.
14. Golu I., Sporea I., Moleriu L. et al. 2D-shear wave elastography in the evaluation of parathyroid lesions in patients with hyperparathyroidism. Int. J. Endocr. 2017; ID9092120: 6.
15. Stangierski A., Wolinski K., Ruchala M. Shear Wave Elastography in the diagnostics of parathyroid adenomas-new application of the method. Endocrine 60, 2018;:240-245, <https://doi.org/10.1007/s12020-018-1553-0>
16. Vlad M., Golu I., Oprea M. et al. Diagnostic value of Shear Wave Elastography in differentiating parathyroid adenomas from thyroid nodules. Endocr. Abstr. 2019;63:663, DOI: 10.1530/endoabs.63.P663
17. Laura Cotoi, Florin Borcan, Ioan Sporea, Dana Amzar, Oana Schiller, Adalbert Schiller et al. Shear Wave Elastography in Diagnosing Secondary Hyperparathyroidism. Diagnostics 2019; 9: 213. doi:10.3390/diagnostics9040213
18. Daniela Amzar, Laura Cotoi, Ioan Sporea et al. Shear Wave Elastography in Patients with Primary and Secondary Hyperparathyroidism. J. Clin. Med. 2021; 10: 697. <https://doi.org/10.3390/jcm10040697>
19. Dana Stoian, Andreeva Borles, Laura Taban, Felix-Mihai Maralescu, Flaviu Bob et al. Differentiating thyroid nodules parathyroid lesions using 2D shearwave elastography: a novel approach for accuracy. DOI 10.3389/fendo.2023.1231784
20. Xiang-Yi Li, Master's degree, Hao-Wen Li, Bachelor's degree, Yong-Kang Liu, Master's degree. Application of real time shear wave elastography to the differential diagnosis of secondary parathyroid hyperplasia and adenoma. Medicine 2023;102:37(e35079). <http://dx.doi.org/10.1097/MD.00000000000035079>
21. Cuiping Wu, Binyang Zhu, Song Kang, Shiyu Wang, Yingying Liu, Xue Mei, He Zhang, and Shuangquan Jiang. Ultrasound characteristics of normal parathyroid glands and analysis of factors affecting their display. BMC Medical Imaging. 2024; 24: 42. <https://doi.org/10.1186/s12880-024-01214-7>

Список литературы:

1. Мокрышева Н.Г., Еремкина А.К., Мирная С.С., Крупинова Ю.А., Воронкова И.А., Ким И.В., Бельцевич Д.Г., Кузнецов Н.С., Пигарова Е.А., Рожинская Л.Я., Дегтярев М.В., Егшатян Л.В., Румянцев П.О., Андреева Е.Н., Анциферов М.Б., Маркина Н.В., Крюкова И.В., Каронова Т.Л., Лукьянов С.В., Слепцов И.В., Чагай Н.Б., Мельниченко Г.А., Дедов И.И. Клинические рекомендации по первичному гиперпаратиреозу, краткая версия. Проблемы Эндокринологии. 2021;67(4):94-124. <https://doi.org/10.14341/probl12801>
2. Bilezikian J.P., et al. Primary hyperparathyroidism. Nature reviews Disease primers. 2016; 2: 16033.
3. Калинин А.П., Павлов А.В., Александров Ю.К., Котова И.В., Патрунов Ю.Н., Пампутис С.Н., Оралов Д.В. Методы визуализации околощитовидных желез и паратиреоидная хирургия. Руководство для врачей. Под редакцией члена-корр. РАМН, проф. А.П. Калинина. Видар. М, 2010. 231 с.
4. Liu C, Wu B, Huang P, Ding Q, Xiao L, Zhang M, et al. US-guided percutaneous microwave ablation for primary hy-

- perparathyroidism with parathyroid nodules: feasibility and safety study. *J Vasc Interv Radiol* 2016; 27:867-875
5. Cheung, K., et al., A meta-analysis of preoperative localization techniques for patients with primary hyperparathyroidism. *Annals of surgical oncology*. 2012. 19(2): 577-583.
 6. Wilhelm S.M., Wang T.S., Ruan D.T. et al. The American Association of Endocrine Surgeons Guidelines for Definitive Management of Primary Hyperparathyroidism. *JAMA Surg*. 2016; 151(10): 959-968.
 7. Dudney W.C., Bodenner D., Brendan C., Stack Jr. Parathyroid carcinoma. *Otolaryngol Clin North Am*. 2010; 43(2): 441-53. doi: 10.1016/j.otc.2010.01.011.
 8. Полукина Е.В. Ультразвуковая диагностика патологии паращитовидных желез. Вудар-М, 2019. 212 с.
 9. Слепцова Е.А., Гончар А.А. Возможности ультразвукового исследования в дифференциальной диагностике образований паращитовидных желез и лимфатических узлов. *Медицинские новости*. 2014; 7: 73-76.
 10. Тимофеева Л.А., Степанов В.Г., Александров Ю.К., Насруллаев М.Н. Ультразвуковое исследование кальцинированных образований щитовидной железы. *REJR*. 2023; 13(1): 49-57. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-1-49-57.
 11. Tsuyoshi Shina, Katryn R., Nightingale, Mark L. Palmeri et al WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 1: Basic principles and terminology. *Ultrasound in Med. & Biol.* 2015; 41 (5): 1126-1147. <http://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2015.03.009>
 12. Cosgrove D., Barr R., Bojunga J. et al. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography. Part 4: thyroid. *Ultrasound Med. & Biol.* 2017; 43 (1): 4-26. Epub 2016
 13. Batur A., Atmaca M., Yavuz A. et al. Ultrasound Elastography for Distinction Between Parathyroid Adenomas and Thyroid Nodules. *J Ultrasound Med.* 2016; 35: 1277-1282.
 14. Golu I., Sporea I., Moleriu L. et al. 2D-shear wave elastography in the evaluation of parathyroid lesions in patients with hyperparathyroidism. *Int. J. Endocr.* 2017; ID9092120: 6.
 15. Stangierski A., Wolinski K., Ruchala M. Shear Wave Elastography the in the diagnostics of parathyroid adenomas-new application of the method. *Endocrine* 60, 2018; 240-245, <https://doi.org/10.1007/s12020-018-1553-0>
 16. Vlad M., Golu I., Oprea M. et al. Diagnostic value of Shear Wave Elastography in differentiating parathyroid adenomas from thyroid nodules. *Endocr. Abstr.* 2019; 63: 663, DOI: 10.1530/endoabs.63.P663
 17. Laura Cotoi, Florin Borcan, Ioan Sporea, Dana Amzar, Oana Schiller, Adalbert Schiller et al. Shear Wave Elastography in Diagnosing Secondary Hyperparathyroidism. *Diagnostics* 2019; 9: 213. doi:10.3390/diagnostics9040213
 18. Daniela Amzar, Laura Cotoi, Ioan Sporea et al. Shear Wave Elastography in Patients with Primary and Secondary Hyperparathyroidism. *J. Clin. Med.* 2021; 10: 697. <https://doi.org/10.3390/jcm10040697>
 19. Dana Stoian, Andreeva Borles, Laura Taban, Felix-Mihai Maralescu, Flaviu Bob et al. Differentiating thyroid nodules parathyroid lesions using 2D shearwave elastography: a novel approach for accuracy. DOI 10.3389/fendo.2023.1231784
 20. Xiang-Yi Li, Master's degree, Hao-Wen Li, Bachelor's degree, Yong-Kang Liu, Master's degree. Application of real time shear wave elastography to the differential diagnosis of secondary parathyroid hyperplasia and adenoma. *Medicine* 2023; 102: 37(e35079). <http://dx.doi.org/10.1097/MD.00000000000035079>
 21. Cuiping Wu, Binyang Zhu, Song Kang, Shiyu Wang, Yingying Liu, Xue Mei, He Zhang, and Shuangquan Jiang. Ultrasound characteristics of normal parathyroid glands and analysis of factors affecting their display. *BMC Medical Imaging*. 2024; 24: 42. <https://doi.org/10.1186/s12880-024-01214-7>.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНУСНО-ЛУЧЕВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ВЫЯВЛЕНИИ СНИЖЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ КОСТИ У ПАЦИЕНТОВ С ЛИМФОМОЙ ХОДЖКИНА

Блинов В.С.¹, Китаева Ю.С.², Праскурничий Е.А.³, Чибисова М.А.⁴

1 – ГАУЗ СО «Верхнепышминская ЦГКБ им. П.Д. Бородина». г. Верхняя Пышма, Россия.

2 – ФГБОУ ВО Уральский государственный медицинский университет МЗ РФ. г. Екатеринбург, Россия.

3 – ФГАОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова МЗ РФ.
г. Москва, Россия.

4 – ФГБОУ ВО Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова МЗ РФ.
г. Санкт-Петербург, Россия.

Лечение пациентов с лимфомой Ходжкина включает в себя применение глюкокортико-стероидов, что ведет к снижению минеральной плотности костной ткани и повышенному риску низкоэнергетических переломов. Пациенты с лимфомой Ходжкина могут быть направлены на различные методы лучевой диагностики, в том числе по стоматологическим показаниями на конусно-лучевую компьютерную томографию зубочелюстной системы. В настоящий момент нет понимания, возможно ли использовать модифицированные компьютерно-томографические индексы при конусно-лучевой компьютерной томографии у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина для оценки снижения минеральной плотности кости.

Цель исследования. Оценить возможность конусно-лучевой компьютерной томографии и компьютерно-томографических индексов в выявлении снижения минеральной плотности кости у пациентов с лимфомой Ходжкина.

Материалы и методы. Были проанализированы конусно-лучевые компьютерные томограммы с вычислением модифицированных компьютерно-томографических индексов и данные двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (ДРА) 48 пациентов с лимфомой Ходжкина. КАКТ проведена на аппарате Galileos, ДРА проведена на остеоденситометре DEXXIM. Для оценки воспроизводимости индексов высчитывалась каппа Козна. Для корреляционного анализа рассчитывался коэффициент Спирмена (r).

Результаты и обсуждение. Согласованность между исследователями для вычисления компьютерно-томографических индексов колебалась от значимой до точной ($k > 0,78$). Значения верхнего компьютерно-томографического мандибулярного индекса для группы с нормальными и со сниженными значениями минеральной плотности кости составили $0,27 \pm 0,03$ и $0,25 \pm 0,07$ соответственно; нижний компьютерно-томографический мандибулярный индекс: $0,34 \pm 0,05$ и $0,32 \pm 0,08$ соответственно; ментальный индекс компьютерной томографии: $3,73 \pm 0,40$ и $3,54 \pm 0,63$ соответственно. Кортикальный индекс компьютерной томографии: 100% – I тип в группе с нормальной минеральной плотностью кости, 17% – II тип в группе со сниженной минеральной плотностью кости.

Заключение. Модифицированные компьютерно-томографические индексы у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина являются хорошо воспроизводимыми с высокими значениями согласованности между исследователями. Верхний компьютерно-томографический мандибулярный индекс менее 0,25 и ментальный индекс компьютерной томографии менее 3,4 у пациентов с лимфомой Ходжкина могут служить косвенными признаками снижения минеральной плотности кости. При выявлении индексов ниже пороговых значений это может быть показанием для назначения двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии или количественной компьютерной томографии.

Кортикальный индекс компьютерной томографии и нижний компьютерно-томографический мандибулярный индекс не являются надежными прогностическими индексами в выявлении снижения минеральной плотности кости у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина.

Конусно-лучевая КТ может являться полезным инструментом для скрининга сниженной МПК и остеопороза у пациентов с лимфомой Ходжкина.

Ключевые слова: остеопороз, двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия, конусно-лучевая компьютерная томография, индексы компьютерной томографии.

Контактный автор: Блинов Владислав Сергеевич, e-mail: VladSBlinov@mail.ru

Для цитирования: Блинов В.С., Китаева Ю.С., Праскурничий Е.А., Чибисова М.А. Исследование конусно-лучевой компьютерной томографии в выявлении снижения минеральной плотности кости у пациентов с лимфомой Ходжкина. REJR 2026; 16(1):115-125. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-115-125.

Статья получена: 15.06.25

Статья принята: 03.09.25

A STUDY OF CONE-BEAM COMPUTED TOMOGRAPHY IN DETECTING DECREASED BONE MINERAL DENSITY IN PATIENTS WITH HODGKIN'S LYMPHOMA

Blinov V.S.¹, Kitaeva Y.S.², Praskurnichiy E.A.³, Chibisova M.A.⁴

1 - P.D. Borodin Verkhnepyshminskaya Central City Clinical Hospital. Verkhnyaya Pyshma, Russia.

2 - Ural State Medical University. Yekaterinburg, Russia.

3 - N.I. Pirogov Russian National Research Medical University. Moscow, Russia.

4 - I.I. Mechnikov North-Western State Medical University. Saint Petersburg, Russia.

Treatment of patients with Hodgkin's lymphoma includes using of glucocorticosteroids, this leads to decreasing bone mineral density and an increasing risk of low-energy fractures. Patients with Hodgkin's lymphoma can be referred for various methods of radiation diagnostics, including cone-beam computed tomography of the dentoalveolar system for dental indications. At present there is no understanding whether it is possible to use modified computed tomographic indices in cone-beam computed tomography in young patients with Hodgkin's lymphoma to assess the decrease in bone mineral density.

Purpose. To evaluate computed tomographic indices in identifying decreased bone mineral density in patients with Hodgkin's lymphoma.

Material and methods. Cone-beam computed tomograms with calculation of modified computed tomographic indices and dual-energy X-ray absorptiometry data of 48 patients with Hodgkin's lymphoma were analyzed. CBCT was performed on a Galileos. DXA was performed on a DEXXUM osteodensitometer. Cohen's kappa was calculated to assess the reproducibility of the indices. Spearman's coefficient (r) was calculated for correlation analysis.

Results. The agreement between the observers for calculating the computed tomography indices, ranged from significant to exact ($k > 0.78$). The computed tomography mandibular index (superior) for the group with normal and with reduced bone mineral density values were 0.27 ± 0.03 and 0.25 ± 0.07 respectively; computed tomography mandibular index (inferior): 0.34 ± 0.05 and 0.32 ± 0.08 respectively; computed tomography mental index: 3.73 ± 0.40 and 3.54 ± 0.63 respectively. Computed tomography cortical index: 100% – type I in the group with normal bone mineral density, 17% – type II in the group with reduced bone mineral density.

Conclusion. Modified computed tomographic indices in young patients with Hodgkin's lymphoma are well reproducible with high values of agreement between observers.

Computed tomography mandibular index (superior) less than 0.25 and computed tomography mental index less than 3.4 in patients with Hodgkin's lymphoma may serve as indirect signs of decreased bone mineral density. If indices below threshold values are detected, this may be an indication for prescribing dual-energy X-ray absorptiometry or quantitative computed tomography.

Computed tomography cortical index, computed tomography mandibular index (inferior) are not reliable prognostic indices in detecting bone mineral density decline in young patients with Hodgkin's lymphoma.

Cone-beam computed tomography can be a useful tool for screening reduced bone mineral density and osteoporosis in patients with Hodgkin's lymphoma.

Keywords: osteoporosis; dual-energy X-ray absorptiometry; cone-beam computed tomography; computed tomography indices.

Лимфома Ходжкина (ЛХ) – В-клеточное злокачественное высококурабельное заболевание лимфоидной ткани. Полное излечение достигается у 80–90% пациентов с локализованными стадиями и у 60–70% пациентов с распространенными стадиями заболевания [1]. Хорошие результаты лечения ЛХ достигаются эффективными схемами химиотерапии и лучевой терапии. Терапия пациентов с ЛХ включает в себя, в том числе, и применение глюкокортикостероидов (ГКС). Пациенты с ЛХ – молодые пациенты с высокой ожидаемой продолжительностью жизни. Поэтому особое внимание необходимо уделять профилактике осложнений терапии ЛХ, в том числе – развитию остеопороза и низкоэнергетических переломов.

Глюкокортикостероид-индуцированный остеопороз характеризуется быстрой потерей костной массы, повышенным риском переломов вскоре после начала терапии [2]. Риск переломов увеличивается в течение первых 3–6 месяцев терапии ГКС и уменьшается после их отмены. Наибольшее увеличение риска (до 5,18 раза) наблюдается для переломов позвоночника у пациентов, принимающих $\geq 7,5$ мг/день преднизолона или его эквивалента. Данные из базы исследований общей практики в Великобритании продемонстрировали, что риск перелома увеличивается даже при относительно низких суточных дозах (2,5–7,5 мг) преднизолона или его эквивалента и увеличивается далее с увеличением суточной дозы [3]. По данным Н.А. Барановой и соавторов терапия ГКС повышает риск остеопоротических переломов независимо от их локализации в 2,2 раза, переломов тел позвонков – в 5,0 раз, переломов дистального отдела предплечья – в 1,8 раза [4].

Считается, что патогенез остеопороза при приеме ГКС является результатом прямого их воздействия на все три основные костные клетки: остеобласты, остеокласты и остециты, и косвенных эффектов, влияющих на всасывание в кишечнике кальция, снижением выработки половых гормонов [5,

6]. ГКС ингибируют функцию остеобластов и стимулируют апоптоз остеобластов и остеоцитов.

Современными методиками оценки минеральной плотности кости являются двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (ДРА) и количественная компьютерная томография (ККТ). Однако вышеуказанные методики не всегда доступны для пациентов и сопровождаются лучевой нагрузкой, поэтому возникает необходимость поиска альтернативных методик оценки состояния костной ткани.

С широким внедрением в стоматологическую практику панорамной томографии челюстей (ПТ), конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) исследователи активно обсуждают применение данных методик для выявления признаков системного остеопороза. При панорамной томографии для оценки снижения МПК предложены следующие количественные индексы: ментальный индекс, панорамно-мандибулярный индекс, гониальный индекс, антигониальный индекс, нижнечелюстное соотношение [7–9]. Качественным индексом при панорамной томографии является мандибулярно-кортикальный индекс.

Для определения снижения МПК при КЛКТ возможно использовать измерение значений серого, оценивать качество костной ткани (классификации Mish, Likhom and Zarb) и использовать модифицированные панорамные индексы [10]. Модифицированными индексами для выявления снижения МПК при КЛКТ являются:

– верхний компьютерно-томографический мандибулярный индекс (син.: КТМИв, computed tomography mandibular index (superior), CTI(s)): отношение ширины кортикальной пластинки нижней челюсти на уровне подбородочного отверстия к расстоянию от верхнего края подбородочного отверстия до нижнего края нижней челюсти;

– нижний компьютерно-томографический мандибулярный индекс (син.: КТМИн, computed tomography

mandibular index (inferior), CTI(i)): отношение ширины кортикальной пластинки нижней челюсти на уровне подбородочного отверстия к расстоянию от нижнего края подбородочного отверстия до нижнего края нижней челюсти;

– ментальный индекс компьютерной томографии (син.: МИКТ, computed tomography mental index (CTMI)): толщина нижней кортикальной пластинки челюсти в области подбородочного отверстия.

Качественным индексом при КЛКТ является кортикальный индекс компьютерной томографии (син.: КИКТ, computed tomography cortical index (CTCI)), который представляет собой тип кортикальной пластинки нижней челюсти.

Большинство авторов оценивали модифицированные компьютерно-томографические индексы у пациентов старше 50 лет. Использование компьютерно-томографических индексов для оценки снижения МПК у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина не было оценено.

Цель исследования.

Оценить возможность конусно-лучевой компьютерной томографии и компьютерно-томографических индексов в выявлении снижения минеральной плотности кости у пациентов с лимфомой Ходжкина.

Материалы и методы.

Одобрения этического комитета не требовалось. Дизайн: ретроспективное описательное эпидемиологическое исследование. Анализ выполнен за период с мая 2023 г. по январь 2024 г. в популяции жителей Свердловской области. В исследование включено 29 женщин (средний возраст $34,2 \pm 8,3$ года, от 19 до 52 лет), 19 мужчин (средний возраст $37,1 \pm 6,8$ года, от 29 до 53 лет), ИМТ 24 (от 18 до 38). У 44 человек (92%) был вариант нодулярного склероза, у 4 человек (8%) – смешанно-клеточный вариант. Большинство пациентов с лимфомой Ходжкина имели II стадию (классификация Ann Arbor в модификации Costwold) – 20 человек (42%), в меньшем количестве представлены III и IV стадия заболевания – 7 и 18 человек соответственно (15% и 38% соответственно), I стадия заболевания отмечена у 3 пациентов (5%).

Пациенты с лимфомой Ходжкина получили программную полихимиотерапию, включающую цитостатические препараты и ГКС. Количество курсов полихимиотерапии определялось в зависимости от объема опухолевой массы и ответа на проводимое лечение. Лучевая терапия не проводилась.

Исследование зубочелюстной системы выполнялось на конусно-лучевом компью-

терном томографе Galileos (Dentsply Sirona, Германия) при следующих физико-технических условиях: напряжение на трубке – 110 кВ, 35 мАс, область обзора (FOV) $15 \times 15 \times 15$ см. Время сканирования – 14,4 с. Положение зубных рядов пациента – в центральной окклюзии. Неподвижность головы пациента осуществлялась с помощью цефалостата с лобным упором и ушными оливами. Пациенты направлялись на КЛКТ по стоматологическим показаниям, не связанным с диагностикой остеопороза. Данные анализировались на персональном компьютере с помощью программы-просмотрщика Galileos Galaxis Implant. Для оценки согласованности между исследователями данные КЛКТ передавались на оценку двум рентгенологам с опытом интерпретации данных челюстно-лицевой КЛКТ более 10 лет. Рентгенологи не обменивались между собой информацией, проводили анализ томограмм отдельно друг от друга и в разное время.

Для вычисления количественных компьютерно-томографических индексов в программе-просмотрщике на сагиттальном реформате выбирался срез на уровне самого широкого размера подбородочного отверстия. На этом реформате проводилось три измерения: расстояние от верхней стенки подбородочного отверстия до нижней границы кортикальной пластинки нижней челюсти, расстояние от нижней стенки подбородочного отверстия до нижней границы кортикальной пластинки нижней челюсти, толщина кортикальной пластинки нижней челюсти. На рисунке 1 представлены реформаты КЛКТ с измеряемыми параметрами.

Кортикальный индекс компьютерной томографии (КИКТ) субъективно оценивался на панорамных реконструкциях и фронтальных реформатах. На рисунке 2 представлены типы КИКТ.

Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия была выполнена на остеоденситометре Dexxum (Osteosys, Южная Корея). Всем пациентам была проведена ДРА поясничного отдела позвоночника (L1-L4) и ДРА проксимальных отделов бедренной кости. Были получены значения: минерального содержания кости (МСК) в граммах, площадь исследования в см², минеральная плотность кости (МПК) в граммах на см². Полученная МПК сравнивалась со средней МПК референсной базы пациентов соответствующего возраста с вычислением Z-критерия. При Z-критерии более -2,0 стандартных отклонений (СО) значения интерпретировались как «снижение МПК», при Z-критерии менее -2,0 СО значения интерпретировались как «нор-

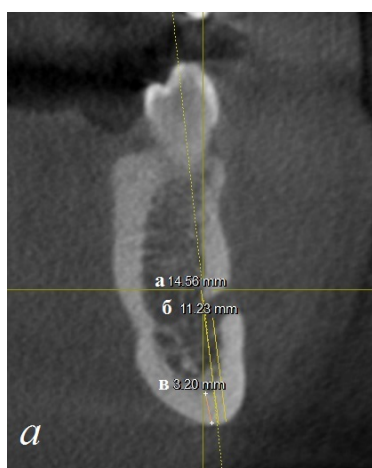


Рис. 1 а (Fig. 1 a)

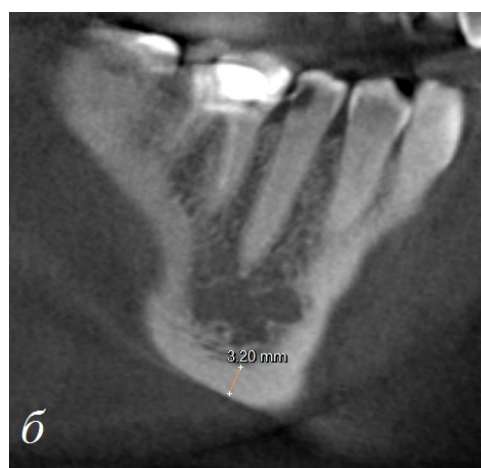


Рис. 1 б (Fig. 1 b)

Рис. 1. КЛКТ, а – сагиттальный реформат, б – фронтальный реформат.

Пациент М., 38 лет. Расстояние а (14,56 мм) – расстояние от верхнего края подбородочного отверстия к кортикальной пластинке нижней челюсти; расстояние б (11,23 мм) – расстояние от нижнего края подбородочного отверстия к кортикальной пластинке нижней челюсти; в (3,20 мм) – толщина кортикальной пластинки нижней челюсти. Отношение в/б – нижний компьютерно-томографический мандибулярный индекс; отношение в/а – верхний компьютерно-томографический мандибулярный индекс; в – ментальный индекс компьютерной томографии.

Fig. 1. CBCT, a – sagittal reformate, b – frontal reformate.

Patient M., 38 years old, Distance a (14.56 mm) – distance from the upper edge of the mental foramen to the cortical plate of the mandible; distance b (11.23 mm) – distance from the lower edge of the mental foramen to the cortical plate of the mandible; c (3.20 mm) – thickness of the cortical plate of the mandible. Ratio c/b – computed tomography mandibular index (inferior); ratio c/a – computed tomography mandibular index (superior); c – mental index of computed tomography.

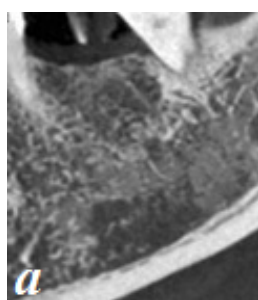


Рис. 2 а (Fig. 2 a)

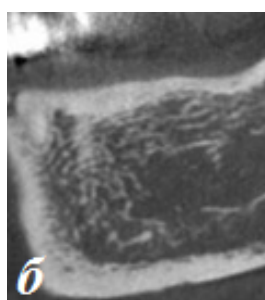


Рис. 2 б (Fig. 2 b)

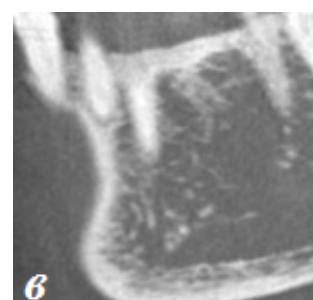


Рис. 2 в (Fig. 2 c)

Рис. 2. КЛКТ, фрагменты фронтальных реформатов нижней челюсти.

Кортикальный индекс компьютерной томографии: а – тип 1: кортикальный слой выглядит ровным и правильным; б – тип 2: в кортикальном слое выявляются полулунные дефекты или 1–2 слоя внутрикортикальных дефектов; в – тип 3: кортикальный слой имеет многочисленные (>3) дефекты.

Fig. 2. CBCT, fragments of mandibular frontal reformates.

Computed tomography cortical index: a – type 1: the cortical layer appears smooth and regular; b – type 2: semilunar defects or 1-2 layers of intracortical defects are detected in the cortical layer; c – type 3: the cortical layer has multiple (>3) defects.

ма».

Методика статистической обработки данных исследования.

Статистический анализ данных проводился по общепринятым методам вариационной статистики на персональном компьютере с помощью пакета программ SPSSInc/Statistics23. Для оценки достоверности различий использовался t-критерий Стьюдента. Статистически значимым считался уровень отличий $p < 0,05$. Для вычисления корреляции между двумя различными параметрическими переменными применялся корреляционный анализ Спирмена (r). Сила корреляции оценивалась по шкале Чеддока: 0,1-0,3 – слабая; 0,3-0,5 – умеренная; 0,5-0,7 – значимая; 0,7-0,9 – высокая; 0,9-0,99 –

лени в таблице №1.

В таблице №2 представлены значения модифицированных компьютерно-томографических индексов у пациентов с лимфомой Ходжкина.

Изучение согласованности между исследователями.

В данном разделе работы изучалась согласованность между двумя рентгенологами в измерении компьютерно-томографических индексов. Полученные средние значения согласованности (каппа) между исследователями представлены в таблице №3.

Как отражено в таблице №3, значения согласованности между исследователями для вычисления КТМИн, КТМИв, МИКТ колебались от 0,81 до 0,87 ($p < 0,001$). Эти значения

Таблица №1. Показатели состояния костной ткани при двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (ДРА).			
Показатель	Локализация	Норма	Снижение МПК
МПК г/см ²	L1-4	1,03±0,10 (0,84–1,24)	0,87±0,12 (0,65–1,05)
	Шейка бедренной кости	1,25±0,12 (0,99–1,53)	1,09±0,13 (0,94–1,37)
Z-критерий	L1-4	0,2±0,7 (-0,8–2,1)	-1,6±0,9 (-2,8–0,1)
	Шейка бедренной кости	0,5±0,9 (-1,4–2,4)	-1,1±1,0 (-2,3–1,2)

очень высокая. Для расчета согласованности между исследователями вычислялись значения каппы Коэна (k). Полученные значения каппы Коэна интерпретировались согласно значениям каппа по таблице Landis и Koch. Согласно значениям по Landis и Koch при значениях каппа менее 0,00 согласованность интерпретировалась как недостаточная, при $k = 0,00-0,02$ – согласованность интерпретировалась как незначительная, при $k = 0,21-0,40$ – удовлетворительная, $k = 0,41-0,60$ – умеренная, $k = 0,61-0,80$ – значимая, $k = 0,81-1,00$ – точная.

Результаты.

При проведении ДРА выявлено 12 человек (25%) с Z-критерием ниже -2,0 стандартных отклонений, что соответствовало снижению МПК. ИМТ в группе со снижением МПК составил 24,6±5,2 (18,5–33,9), в группе пациентов с нормальными значениями МПК: 23,8±4,2 (18,3–38,5). Показатели в группе исследования, полученные при ДРА представ-

соответствуют точной согласованности между исследователями. Значения согласованности для оценки КИКТ составили 0,78 ($p < 0,01$), значения соответствовали значимой согласованности.

Для анализа корреляционных связей между компьютерно-томографическими индексами, МПК и Z-критерием использовался корреляционный анализ Спирмена. В таблице №4 показаны значения корреляции Спирмена между показателями.

Статистически значимые корреляции получены между МПК и КТМИв (корреляция – слабая, положительная), между Z-критерием и КТМИв (корреляция слабая, положительная), между Z-критерием и КТМИн (корреляция слабая, положительная). Остальные корреляции, в том числе между ИМТ и всеми компьютерно-томографическими индексами, статистически не значимые ($p > 0,05$). На рисунке 3 представлены графики корреляции между МПК, Z-критерием и

Таблица №2. Значения компьютерно-томографических индексов у пациентов с лимфомой Ходжкина.

Индекс	Норма	Снижение МПК
КТМИ _В	0,27±0,03 (0,17-0,33)	0,25±0,07 (0,14-0,37)
КТМИ _Н	0,34±0,05 (0,23-0,40)	0,32±0,08 (0,17-0,50)
МИКТ	3,73±0,40 (2,98-4,98)	3,54±0,63 (2,19-4,70)
КИКТ	36 человек (100%) – I тип	10 человек (83%) – I тип, 2 человека (17%) – II тип

Таблица №3. Значения согласованности между исследователями.

Индекс	Каппа Коэна (k)	Значимость (p)
КТМИ _В	0,81	<0,01
КТМИ _Н	0,87	<0,001
МИКТ	0,82	<0,01
КИКТ	0,78	<0,01

Таблица №4. Корреляционный анализ Спирмена между компьютерно-томографическими индексами и значениями МПК.

Показатель	КТМИ _В	КТМИ _Н	МИКТ	КИКТ
МПК	r=0,28 (p=0,04)	r=0,16 (p=0,33)	r=0,24 (p=0,105)	r=-0,16 (p=0,28)
Z-критерий	r=0,22 (p=0,04)	r=0,19 (p=0,04)	r=0,17 (p=0,236)	r=-0,26 (p=0,26)
ИМТ	r= -0,08 (p=0,61)	r=-0,17 (p=0,25)	r=0,08 (p=0,57)	r=0,02 (p=0,88)

КТМИ_В.

Значения площади под ROC-кривой для КТМИ_В для нормальных значений МПК составило AUC=0,70 для порога в 0,25. Значения площади под ROC-кривой для МИКТ для нормальных значений МПК составило AUC=0,70. Значения площади под ROC-кривой остальных индексов составило менее 0,70, что соответствует низкой прогностической способности данных индексов.

Обсуждение.

Пациенты с лимфомой Ходжкина – молодые пациенты с высокой ожидаемой продолжительностью жизни. Лечение пациентов лимфомой Ходжкина носит системный характер и влияет на все органы и системы ор-

ганизма, в том числе на микроархитектонику костной ткани за счет воздействия глюко-

кортикостероидов. В связи с чем, у пациентов с лимфомой Ходжкина вопросы выявления снижения минеральной плотности кости и профилактика низкоэнергетических переломов являются весьма актуальными. Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия и количественная КТ являются признанными стандартизованными методиками оценки МПК. Данные методики не всегда доступны. Пациенты могут обращаться за стоматологической помощью и им могут быть выполнены такие стоматологические диагностические рентгенологические исследования, как панорамная томография зуб-

ных рядов и конусно-лучевая КТ. При использовании данных методик регистрируется информация, которая может дать дополнительную информацию для скрининга низкой

Ходжкина) МИКТ составил 3,22 мм в группе с нормальной МПК и 2,23 мм в группе с остеопорозом [11]. Отсутствие значимых различий между индексами для пациентов с

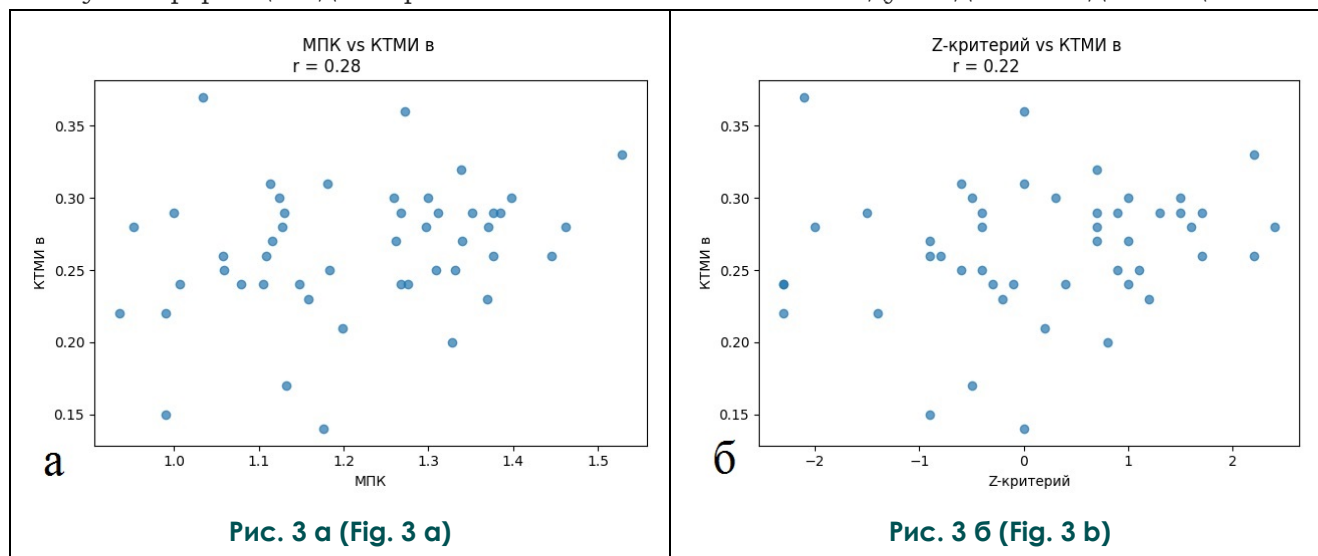


Рис. 3. а – график корреляции между МПК и КТМИв, б – график корреляции между Z-критерием и КТМИв.

а – $r=0,28$, корреляция слабая, положительная; б – $r=0,22$, корреляция слабая, положительная.

Fig. 3. а – graph of the correlation between the MPC and the CTI(s), б – graph of the correlation between the Z-score and the CTI(s).

а – $r=0.28$, the correlation is weak, positive; б – $r=0.22$, the correlation is weak, positive.

МПК.

В нашем исследовании в группе пациентов с лимфомой Ходжкина значения модифицированных компьютерно-томографических индексов составили: верхний компьютерно-томографический мандибулярный индекс для группы с нормальным значением МПК – 0,27, для группы со сниженной МПК – 0,25. Значения нижнего компьютерно-томографического мандибулярного индекса для пациентов с нормальными значениями МПК – 0,34, для группы со сниженной МПК – 0,32. Разница между группами с нормальными и сниженными значениями МПК – незначительная. По данным С.В. Brasileiro и соавторов (пациенты старше 50 лет, без лимфомы Ходжкина) средние значения КТМИв и КТМИн значительно различались. Значения составили 0,21 и 0,25 в группе нормальной МПК, 0,14 и 0,18 в группе с остеопорозом [11].

В данном исследовании средние значения ментального индекса компьютерной томографии составили 3,73 – для группы пациентов с нормальными значениями МПК и 3,54 – для группы со сниженными значениями МПК. По данным С.В. Brasileiro и соавторов (пациенты старше 50 лет, без лимфомы

лимфомой Ходжкина объясняется молодым возрастом пациентов. Снижение МПК у данной группы пациентов незначительно влияет на толщину кортикальной пластинки и высоту альвеолярной части нижней челюсти, что отражается на измеряемых компьютерно-томографических индексах. R.A. Mostafa и соавторы отмечают, что модифицированные компьютерно-томографические индексы можно использовать в качестве вспомогательного инструмента для направления пациентов с риском остеопороза на дальнейшее обследование [12].

В нашем исследовании только 17% пациентов со сниженной МПК имели II тип КИКТ, остальные 83% – имели I тип КИКТ, как и 100% пациентов с нормальными значениями МПК, III тип КИКТ не был выявлен ни в одном случае. Таким образом, КИКТ – не является надежным индексом для косвенной оценки снижения МПК у пациентов с лимфомой Ходжкина. Это связано также с незначительным влиянием снижения МПК в молодом возрасте на толщину и качество кортикального слоя нижней челюсти. K.J. Koh и соавторы исследовали группу женщин в постменопаузе (старше 50 лет) и показали статистически-значимую разницу между I и

III типами КИКТ у пациенток с нормальными значениями МПК и остеопорозом [13]. J.G.K. Castro и соавторы отмечают, что КИКТ является полезным индексом для выявления пациенток с остеопорозом в постменопаузе [14].

Согласованность между исследователями для вычисления компьютерно-томографических индексов колебалась от значимой до полной ($k > 0,78$). Согласованность говорит о высокой воспроизводимости компьютерно-томографических индексов для данной группы пациентов. На согласованность измерений индексов между исследователями могла повлиять погрешность в линейных измерениях. А.Е. Carneiro и соавторы по результатам мета-анализа сообщают об адекватной точности и сильной согласованности между исследователями и внутри исследователей для линейных измерений при конусно-лучевой КТ [15]. Кроме того, авторы отмечают сильную согласованность для линейных измерений между низко-дозовыми протоколами сканирования при КЛКТ и стандартными протоколами. Таким образом, используя низко-дозовый протокол сканирования, можно уменьшить дозовую нагрузку на пациента без потери качества линейных измерений.

В нашем исследовании статистически-значимые, слабые и положительные корреляции получены между МПК, Z-критерием и КТМИВ, между Z-критерием и КТМИн. Остальные корреляции – слабые, незначительные и статистически не значимые. I.R. Roiana и соавторы показали положительную корреляцию между КТМИВ, КИКТ и МПК у пациентов с вторичным остеопорозом на фоне сахарного диабета, акромегалии и синдрома Кушинга [16, 17]. Но все пациенты в приведенном исследовании были старше 50 лет (средний возраст $65,15 \pm 9,12$ лет) и в постменопаузе.

Выявлено, что при значениях КТМИВ менее 0,25 у 73% пациентов с лимфомой Ходжкина будет выявляться снижение МПК, при КТМИВ менее 0,20 – у 95% пациентов будет наблюдаться снижение МПК. При значениях МИКТ более 3,6 – 50% пациентов будут иметь нормальные значения МПК, при МИКТ более 4,4 – 90% пациентов будут иметь нормальную МПК, при МИКТ менее 3,4 – 80%

пациентов будут иметь сниженную МПК. Прогностическая возможность КТМИн – низкая.

Выводы.

1. Модифицированные компьютерно-томографические индексы у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина являются хорошо воспроизводимыми с высокими значениями согласованности между исследователями.

2. Верхний компьютерно-томографический мандибулярный индекс менее 0,25 и ментальный индекс компьютерной томографии менее 3,4 у пациентов с лимфомой Ходжкина могут служить косвенными признаками снижения МПК. При выявлении индексов ниже пороговых значений это может быть показанием для назначения двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии или количественной КТ.

3. Кортикальный индекс компьютерной томографии, нижний компьютерно-томографический мандибулярный индекс не являются надежными прогностическими индексами в выявлении снижения МПК у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина.

4. Конусно-лучевая КТ может являться полезным инструментом для скрининга сниженной МПК и остеопороза у молодых пациентов с лимфомой Ходжкина.

Ограничения исследования.

Наше исследование имеет несколько ограничений. Во-первых, размер выборки был относительно небольшим, а количество пациентов со сниженной МПК было относительно недостаточным. Во-вторых, исследование было одноцентровым, выполнялось на одном конусно-лучевом компьютерном томографе. В-третьих, в выборке нашего исследования преобладали женщины над мужчинами. Необходимы дальнейшие исследования на большей выборке для корректировки полученных пороговых значений, а также на конусно-лучевых КТ разных производителей.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Аббасбейли Ф.М., Зейналова П.А., Вернюк М.А. и др. Особенности состава костного мозга и возможности диагностики опухолевого поражения у пациентов с клас-

сической лимфомой Ходжкина. Онкогематология. 2023; 18 (3): 84-91. DOI:10.17650/1818-8346-2023-18-3-84-91.
2. Compston J.E. Management of glucocorticoid-induced oste-

oporosis. *Nature Rev. Rheumatol.* 2010; 6: 82-88. DOI: 10.1038/nrrheum.2009.259.

3. Staa van T.P., Leufkens H.G., Cooper C. The epidemiology of corticosteroid-induced osteoporosis: a meta-analysis. *Osteoporos Int.* 2002; 13: 777-787. DOI: 10.1007/s001980200108.

4. Баранова И.А. и др. Оценка частоты и факторов риска низкоэнергетических переломов скелета по данным опроса больных хроническими воспалительными заболеваниями. Результаты многоцентрового исследования Российской ассоциации по остеопорозу ГЛЮКОСТ. Остеопороз и остеопатии. 2014; 17 (3): 9-14. DOI: 10.14341/osteo201439-14.

5. Canalis E., Mazziotti G., Giustina A., Bilezikian J.P. Glucocorticoid-induced osteoporosis: pathophysiology and therapy. *Osteoporos Int.* 2007; 18: 1319-1328. DOI: 10.1007/s00198-007-0394-0.

6. Hofbauer L.C., Rauner M. Minireview: live and let die: molecular effects of glucocorticoids on bone cells. *Mol. Endocrinol.* 2009; 23: 1525-1531. DOI: 10.1210/me.2009-0069.

7. Calciolari E., Donos N., Park J.C. et al. Panoramic measures for oral bone mass in detecting osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *J. Dent. Res.* 2015; 94 (3 Suppl): 17S-27S. DOI: 10.1177/0022034514554949.

8. Ledgerton D., Horner K., Devlin H., Worthington H. Radiomorphometric indices of the mandible in a British female population. *Dentomaxillofac. Radiol.* 1999; 28 (3): 173-181. DOI: 10.1038/sj/dmfr/4600435.

9. Nakamoto T., Taguchi A., Kakimoto N. Osteoporosis screening support system from panoramic radiographs using deep learning by convolutional neural network. *Dentomaxillofac. Radiol.* 2022; 51 (6): 20220-20135. DOI: 10.1259/dmfr.20220135.

10. Isayev A., Velieva N., Isedisha L. et al. Cone-Beam Computed Tomography as a Prediction Tool for Osteoporosis in Postmenopausal Women: A Systematic Literature Review. *Diagnostics (Basel).* 2023; 13 (6): 1027. DOI:

References:

1. Abbasbeyli F.M., Zeynalova P.A., Vernyuk M.A. et al. Bone marrow composition features and possibilities of tumor involvement diagnosing in patients with classic Hodgkin's lymphoma. *Oncohematology.* 2023; 18 (3): 84-91. DOI:10.17650/1818-8346-2023-18-3-84-91 (in Russian).

2. Compston J.E. Management of glucocorticoid-induced osteoporosis. *Nature Rev. Rheumatol.* 2010; 6: 82-88. DOI: 10.1038/nrrheum.2009.259.

3. Staa van T.P., Leufkens H.G., Cooper C. The epidemiology of corticosteroid-induced osteoporosis: a meta-analysis. *Osteoporos Int.* 2002; 13: 777-787. DOI: 10.1007/s001980200108.

4. Baranova I.A. et al. Prevalence and risk factors of low-energy skeletal fractures in patients with chronic inflammatory diseases. the results of a multicenter study of the russian association on osteoporosis GLUKOST. Osteoporosis and Bone Diseases. 2014; 17 (3): 9-14. DOI: 10.14341/osteo201439-14 (in Russian).

5. Canalis E., Mazziotti G., Giustina A., Bilezikian J.P. Glucocorticoid-induced osteoporosis: pathophysiology and therapy. *Osteoporos Int.* 2007; 18: 1319-1328. DOI: 10.1007/s00198-

10.3390/diagnostics13061027.

11. Brasileiro C.B., Chalub L.H., Abreu M.G. et al. Use of cone beam computed tomography in identifying postmenopausal women with osteoporosis. *Arch. Osteoporos.* 2017; 12 (1): 26. DOI: 10.1007/s11657-017-0314-7.

12. Mostafa R.A., Arnout E.A., Abo El-Fotouh M.M. Feasibility of cone beam computed tomography radiomorphometric analysis and fractal dimension in assessment of postmenopausal osteoporosis in correlation with dual X-ray absorptiometry. *Dentomaxillofac. Radiol.* 2016; 45 (7): 20160212. DOI: 10.1259/dmfr.20160212.

13. Koh K.J., Kim K.A. Utility of the computed tomography indices on cone beam computed tomography images in the diagnosis of osteoporosis in women. *Imaging Sci. Dent.* 2011; 41: 101-106. DOI: 10.5624/isd.2011.41.3.101.

14. Castro J.G.K., Carvalho B.F., Melo N.S. et al. A new cone-beam computed tomography-driven index for osteoporosis prediction. *Clin. Oral. Investig.* 2020; 24: 3193-3202. DOI:10.1007/s00784-019-03193-4.

15. Carneiro A.E., Reis I.R., Bitencourt F.V. et al. Accuracy of linear measurements for implant planning based on low-dose cone beam CT protocols: a systematic review and meta-analysis. *Dentomaxillofac. Radiology.* 2024; 53 (4): 207-221. DOI: 10.1093/dmfr/twae007.

16. Poiana I.R., Burcea I.F., Pituru Silviu-Mirel, Bucur A. Comprehensive assessment of primary and secondary low bone mass using Dual-Energy X-ray Absorptiometry and Cone Beam Computed Tomography – a cross-sectional study. *Dentomaxillofac. Radiology.* 2025; 17: twaf030. DOI: 10.1093/dmfr/twaf030.

17. Ramachandra Reddy Gowda Venkatesha, Karthik Rajaram Mohan, Ezhilarasi Arumugam Ven-katachalam Sargurunathan, Reethika Rathan, Ignatious Jeba Mary Rajkumar. Radiological insights into intraosseous compound odontomas through 3D CBCT imaging. *REJR* 2025; 15(3):260-266. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-260-266.

007-0394-0.

6. Hofbauer L.C., Rauner M. Minireview: live and let die: molecular effects of glucocorticoids on bone cells. *Mol. Endocrinol.* 2009; 23: 1525-1531. DOI: 10.1210/me.2009-0069.

7. Calciolari E., Donos N., Park J.C. et al. Panoramic measures for oral bone mass in detecting osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *J. Dent. Res.* 2015; 94 (3 Suppl): 17S-27S. DOI: 10.1177/0022034514554949.

8. Ledgerton D., Horner K., Devlin H., Worthington H. Radiomorphometric indices of the mandible in a British female population. *Dentomaxillofac. Radiol.* 1999; 28 (3): 173-181. DOI: 10.1038/sj/dmfr/4600435.

9. Nakamoto T., Taguchi A., Kakimoto N. Osteoporosis screening support system from panoramic radiographs using deep learning by convolutional neural network. *Dentomaxillofac. Radiol.* 2022; 51 (6): 20220-20135. DOI: 10.1259/dmfr.20220135.

10. Isayev A., Velieva N., Isedisha L. et al. Cone-Beam Computed Tomography as a Prediction Tool for Osteoporosis in Postmenopausal Women: A Systematic Literature Review. *Diagnostics (Basel).* 2023; 13 (6): 1027. DOI:

10.3390/diagnostics13061027.

11. Brasileiro C.B., Chalub L.H., Abreu M.G. et al. Use of cone beam computed tomography in identifying postmenopausal women with osteoporosis. *Arch. Osteoporos.* 2017; 12 (1): 26. DOI: 10.1007/s11657-017-0314-7.

12. Mostafa R.A., Arnout E.A., Abo El-Fotouh M.M. Feasibility of cone beam computed tomography radiomorphometric analysis and fractal dimension in assessment of postmenopausal osteoporosis in correlation with dual X-ray absorptiometry. *Dentomaxillofac. Radiol.* 2016; 45 (7): 20160212. DOI: 10.1259/dmfr.20160212.

13. Koh K.J., Kim K.A. Utility of the computed tomography indices on cone beam computed tomography images in the diagnosis of osteoporosis in women. *Imaging Sci. Dent.* 2011; 41: 101-106. DOI: 10.5624/isd.2011.41.3.101.

14. Castro J.G.K., Carvalho B.F., Melo N.S. et. al. A new cone-beam computed tomography-driven index for osteoporosis prediction. *Clin. Oral. Investig.* 2020; 24: 3193-3202.

DOI:10.1007/s00784-019-03193-4.

15. Carneiro A.E., Reis I.R, Bitencourt F.V. et al. Accuracy of linear measurements for implant planning based on low-dose cone beam CT protocols: a systematic review and meta-analysis. *Dentomaxillofacial. Radiology.* 2024; 53 (4): 207-221. DOI: 10.1093/dmfr/twae007.

16. Poiana I.R., Burcea I.F., Pituru Silviu-Mirel, Bucur A. Comprehensive assessment of primary and secondary low bone mass using Dual-Energy X-ray Absorptiometry and Cone Beam Computed Tomography – a cross-sectional study. *Dentomaxillofacial Radiology.* 2025; 17: twaf030. DOI: 10.1093/dmfr/twaf030.

17. Ramachandra Reddy Gowda Venkatesha, Karthik Rajaram Mohan, Ezhilarasi Arumugam Ven-katachalam Sargurunathan, Reethika Rathan, Ignatious Jeba Mary Rajkumar. Radiological insights into intraosseous compound odontomas through 3D CBCT imaging. *REJR* 2025; 15(3):260-266. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-3-260-266.

ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИСПИРАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕЦИДИВНОГО КАМНЕОБРАЗОВАНИЯ ПОСЛЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ЛИТОТРИПСИИ

Михайлин С.Д., Капанадзе А.Б., Руденко В.И., Крупинов Г.Е., Серова Н.С.

ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет).

г. Москва, Россия.

Цель исследования. Оценить возможность прогнозирования рецидивного камнеобразования у пациентов после дистанционной литотрипсии (ДЛТ), учитывая параметры конкрементов, оцениваемые по данным мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ), а также анатомические особенности чашечно-лоханочной системы почек.

Материалы и методы. У 47 (100%) пациентов, из которых 25 (53,2%) составляют мужчины и 22 (46,8%) женщины, была проведена оценка рецидивирующего камнеобразования после ДЛТ в рамках про- и ретроспективного исследования. Всем пациентам проводилась мультиспиральная компьютерная томография на компьютерном томографе Aquilion One 640 (Canon, Япония). В послеоперационном периоде для детализации и окончательного установления физико-химического состава мочевых камней (фрагментов) использовали рентгенофазный анализ или инфракрасную спектроскопию.

Результаты. У 26 из 47 пациентов (55%) отмечено полное отхождение фрагментов камней после ДЛТ к моменту выписки из стационара. Однако у 21 (45%) пациента, при наблюдении в течение 3 месяцев после ДЛТ с оценкой показателя SFR, у 12 из них (57%) отмечено не отхождение фрагментов конкрементов, что привело к ложному рецидивному камнеобразованию. Статистический анализ показал высокую чувствительность и специфичность параметра однородности конкрементов в прогнозировании наличия остаточных фрагментов после ДЛТ, AUC=0,89. При анализе корреляционных взаимодействий между данными показателями и эффективностью ДЛТ наиболее значительная статистическая зависимость с ложным рецидивом при МКБ отмечена при размере мочевого камня от 16 до 19 мм ($r = 0,42$, $p < 0,05$) и плотности 1001–1500 HU ($r = 0,52$, $p < 0,001$). Среднее значение показателя расстояния от кожи до конкремента (SSD) в группе пациентов с остаточными конкрементами составило $107,7 \pm 28,9$ мм ($p \leq 0,05$). Анализ локализации мочевого камня в чашечно-лоханочной системе (ЧЛС) на фоне ложного рецидива МКБ после ДЛТ определил прямую корреляционную связь между рецидивом МКБ после ДЛТ и локализацией камня в нижней группе чашечек ($r = 0,55$, $p < 0,01$). При ложном рецидиве МКБ определялась статистически значимая корреляционная связь ($r = 0,04$, $p < 0,01$) с параметрами ЧЛС (IL ≥ 27 мм, IW ≤ 4 мм, IPA $\leq 90^\circ$).

Обсуждение. В различных публикациях уже неоднократно рассматривалась возможность использования показателей плотности и размеров конкрементов для прогнозирования результатов дистанционной литотрипсии [5-10, 12-15, 18, 20-23]. В нашем исследовании мы определили, что между пациентами, прошедшими 1 и 2 сеанса ДЛТ для полного удаления камней, есть статистически значимые различия в этих показателях, уровень их связи с результатами лечения оказался низким. Мы считаем, что эти параметры не являются надежными для оценки рисков повторного образования камней. Комбинированный анализ данных показателей вместе с оценкой структурных особенностей конкрементов и анатомии чашечно-лоханочной системы почек может значительно улучшить возможности МСКТ в прогнозировании рецидивного камнеобразования у пациентов после ДЛТ.

Заключение. В данном исследовании проведена оценка возможности прогнозирования рецидивного камнеобразования у пациентов, перенесших дистанционную литотрипсию, с использованием различных показателей конкрементов, полученных на основе мультиспиральной компьютерной томографии. Результаты показали, что существует необходимость комплексного подхода, включающего анализ структурных особенностей камней, анатомии чашечно-лоханочной системы почек (ЧЛС), локализации конкрементов в ЧЛС для более точного прогно-

зирования рецидивов. Комбинированный анализ данных может значительно улучшить предсказательные возможности МСКТ и помочь в оптимизации лечения пациентов после ДАТ..

Ключевые слова: МСКТ в прогнозировании, МКБ, дистанционная литотрипсия, мочекаменная болезнь, резидуальные конкременты, мультиспиральная компьютерная томография.

Контактный автор: Михайлин С.Д., e-mail: mikhaylin_s_d@staff.sechenov.ru

Для цитирования: Михайлин С.Д., Капанадзе Л.Б., Руденко В.И., Крупинов Г.Е., Серова Н.С. Возможности мультиспиральной компьютерной томографии в прогнозировании рецидивного камнеобразования после дистанционной литотрипсии. REJR 2026; 16(1):126-137. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-126-137.

Статья получена: 25.03.26

Статья принята: 14.04.26

POSSIBILITIES OF MULTISPIRICAL COMPUTED TOMOGRAPHY IN PREDICTING RECURRENT LITHOGENESIS AFTER THE EXTRACTION LITHOTRIPSY

Mikhaylin S.D., Kapanadze L.B., Rudenko V.I., Krupinov G.E., Serova N.S.

Sechenov University, Moscow, Russia.

Purpose. To evaluate the possibilities of predicting recurrent lithogenesis in patients after extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL), taking into account stone parameters assessed using multislice computed tomography (MSCT) data, as well as the anatomical features of the renal pelvis.

Materials and methods. Lithogenesis after ESWL was assessed in a pro- and retrospective study in 47 patients (100%), including 25 men (53.2%) and 22 women (46.8%). All patients underwent multislice computed tomography scanning using an Aquilion One 640 CT scanner (Canon, Japan). Postoperatively, X-ray phase analysis or infrared spectroscopy were used to detail and finally establish the physicochemical composition of urinary stones (fragments).

Results. In 26 of 47 patients (55%), complete passage of stone fragments after ESWL was observed by the time of hospital discharge. However, in 21 patients (45%), during a 3-month follow-up after ESWL with assessment of the SFR indicator, non-passage of stone fragments was observed in 12 of them (57%), which led to false recurrent stone formation. Statistical analysis showed high sensitivity and specificity of the calculus homogeneity parameter in predicting the presence of residual fragments after ESWL, AUC=0.89. When analyzing the correlation interactions between these parameters and the effectiveness of ESWL, the most significant statistical dependence with false recurrence in urolithiasis was noted for a urinary stone size of 16 to 19 mm ($r = 0.42$, $p < 0.05$) and a density of 1001–1500 HU ($r = 0.52$, $p < 0.001$). The mean skin-to-stone distance (SSD) in the group of patients with residual stones was 107.7 ± 28.9 mm ($p \leq 0.05$). Analysis of urinary stone localization in the renal pelvic system (RPS) in the setting of false recurrence of urolithiasis after ESWL revealed a direct correlation between urolithiasis recurrence after ESWL and stone localization in the lower group of calyces ($r = 0.55$, $p < 0.01$). In case of false recurrence of urolithiasis, a statistically significant correlation ($r = 0.04$, $p < 0.01$) with RPS parameters ($IL \geq 27$ mm, $IW \leq 4$ mm, $IPA \leq 90^\circ$) was determined.

Discussion. The possibility of using stone density and size parameters to predict the results of extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) has been repeatedly discussed in various publications. In our study, we found statistically significant differences in these parameters between patients who underwent 1 and 2 ESWL sessions for complete stone removal, and their correlation with treatment outcomes was low. We believe that these parameters are not reliable for assessing the risk of recurrent lithogenesis. Combined analysis of these parameters, along with an assessment of the structural features of stones and the anatomy of the renal pelvis and calyces, can significantly improve the ability of MSCT to predict recurrent stone formation in patients after ESWL.

Conclusion. This study assessed the feasibility of predicting recurrent stone formation in patients undergoing extracorporeal shock wave lithotripsy using various stone parameters obtained from multislice computed tomography. The results demonstrate the need for a comprehensive ap-

proach, including analysis of stone structural features, renal pelvicalyceal system (RPS) anatomy, and calculus location within the RPS, to more accurately predict recurrence. Combined data analysis can significantly improve the predictive capabilities of MSCT and aid in optimizing patient treatment after ESWL.

Keywords: MSCT in prognosis, urolithiasis, extracorporeal shock wave lithotripsy, urolithiasis, residual stones, multislice computed tomography.

Corresponding author: Mikhailin S. D., e-mail: mikhaylin_s_d@staff.sechenov.ru

For citation: Mikhaylin S.D., Kapanadze L.B., Rudenko V.I., Krupinov G.E., Serova N.S. Possibilities of multispiral computed tomography in predicting recurrent lithogenesis after the extraction lithotripsy. REJR 2026; 16(1):126-137. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-126-137.

Received: 25.03.26

Accepted: 14.04.26

Мочекаменная болезнь (МКБ) сохраняет свою актуальность во всем мире в связи с неуклонным ростом заболеваемости и продолжает оставаться одним из наиболее распространенных урологических заболеваний, встречающимся, по разным данным, у 5-20% популяции, занимая значительное место в структуре урологической патологии, составляя в среднем 34,2% по России. В связи с нарастанием удельного веса пожилых и старческих групп населения в развитых странах, увеличивается вероятность заболевания мочекаменной болезнью, которая составляет в возрастной группе 30-34 лет: 3,7% у мужчин и 2,8% у женщин, а в возрастной группе 65-69 лет: 8,8% и 5,6 % соответственно [1, 2].

Рецидивное течение МКБ, а также необходимость активного удаления мочевых камней оказывает отрицательное воздействие на пациента [3]. Одним из основных объективных показателей успешного лечения уролитиаза является stone-free rate (SFR). Это показатель отсутствия конкрементов, оцениваемый через временной промежуток до 3 месяцев после проведенного лечения, при помощи лучевых методов обследования [4].

В настоящее время достигнут значительный прогресс в оказании помощи пациентам с нефролитиазом, однако некоторые вопросы диагностики, лечения и профилактики МКБ остаются не решенными. В частности, дискуссионным остается вопрос выбора оптимальной методики устранения конкрементов почки размерами от 10 до 20 мм [6]. Согласно последним клиническим рекомендациям для почечных камней размером от 10 до 20 мм рекомендуется дистанционная литотрипсия (ДЛТ) или чрескожная нефролитотрипсия (ЧНЛТ), либо уретероскопия, за исключением камней нижней группы

чашечек, где ДЛТ является вторым выбором при наличии неблагоприятных факторов (рис. 1) [6]. Ранее считалось, что уретероскопия, как альтернатива ДЛТ, имеет более высокие показатели удаления камней по сравнению с ДЛТ, достигая успеха по различным данным от 85% до 95%. Однако недавние проспективные исследования, в которых использовалась мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) SFR после уретероскопии, продемонстрировали значительно более низкий уровень результатов – от 38% до 54% [7].

Несмотря на обширный выбор различных вариантов лечения мочекаменной болезни, одним из общепризнанных высокоэффективных методов, способствующих отхождению почечных конкрементов остается дистанционная литотрипсия. Опубликованные показатели успешного проведения ДЛТ достигают 90% [22]. Эффективность проводимого лечения варьируется в зависимости от структурных особенностей конкрементов: для камней неоднородного строения с нечеткими контурами, средней плотностью менее 800 HU – дезинтеграция наступает в 90-100% случаев после первичного сеанса с образованием мелкодисперсных фрагментов, способных к спонтанному отхождению. Камни однородного или неоднородного строения с четкими контурами средней плотностью 1,000 HU в 70% случаев разрушаются после 1 сеанса, а в 30% случаев необходимы повторные сеансы ДЛТ [21, 22]. Доказано, что ДЛТ, несмотря на ряд очевидных преимуществ, оказывает травматические эффекты на почечную паренхиму, потенцирующие при повторных сессиях, особенно при небольших интервалах времени между процедурами [1, 8, 22]. Ударная волна вызывает ряд повреждений почечной паренхимы различной выраженности – от легких, выявляе-

Guidelines on Urolithiasis, EAU 2025



Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Схема.

Выбор оптимального хирургического лечения камней в зависимости от размера конкремента [6]. ЧНЛТ – чрескожная нефролитотрипсия, РИРХ – ретроградная интратеренальная хирургия, ДЛТ – дистанционная литотрипсия.

Fig. 1. Scheme.

Selection of optimal surgical treatment of stones depending on the size of the calculus [6]. PCNL – percutaneous nephrolithotripsy, RIRS – retrograde intrarenal surgery, ESWL – extracorporeal shock wave lithotripsy.

мые лишь при микроскопии, до глубоких контузионных очагов, сопровождающихся гематомами и в итоге приводящих к нефросклерозу и прогрессирующему снижению функции почки. Кроме того, проведение процедуры ДЛТ, несмотря на ее относительную неинвазивность, приводит к развитию в раннем послеоперационном периоде выраженного болевого синдрома, повышению температуры и гематурии [3]. Когда прогнозируемая эффективность ДЛТ невысока, например, в случае однородного строения конкрементов, имеющих четкие контуры, средней плотностью более 1,200 HU, следует рассмотреть такие альтернативные эндоурологические методики освобождения мочевых путей от конкрементов, как перкутанная нефролитотрипсия, ретроградная интратеренальная хирургия и контактная уретеролитотрипсия (КУЛТ) [6, 9, 22].

Причиной снижения эффективности хирургического лечения при нефролитиазе являются не только сложность в удалении, фрагментации конкремента, но и в затруднении отхождения фрагментов. Резидуальные фрагменты камней могут увеличиваться в размерах (так называемое «ложное» рецидивное камнеобразование), поддерживать активный воспалительный процесс, блокировать отток мочи, вызывая обструкцию мочевыводящих путей [10].

Увеличение частоты рецидивов среди больных с МКБ, несмотря на новые подходы

к лечению, подчеркивает необходимость выявления факторов риска и прогнозирования повторного образования камней [4]. Широкое применение ДЛТ требует поиска новых решений для снижения уровня рецидивов в послеоперационном периоде. Определение факторов риска у пациентов с МКБ и оценка их влияния на вероятность рецидива при использовании ДЛТ позволяют заранее, еще до госпитализации, оценить риск повторного образования камней и разработать меры профилактики. Обоснованный выбор метода лечения и своевременная оценка факторов риска повторного камнеобразования при использовании ДЛТ помогают снизить частоту рецидивов МКБ [12].

В последние годы ряд публикаций отечественных и зарубежных ученых свидетельствует об эффективности МСКТ в оценке структуры конкремента. Оцениваемые параметры могут сыграть важную роль в прогнозировании эффективности фрагментации конкремента при проведении дистанционной ударно-волновой литотрипсии [3, 5, 7, 10, 13, 14, 20-23].

Динамика разрушения конкрементов в процессе процедуры ДЛТ находится в прямой зависимости от плотности (в частности, ее минимального, максимального, а также среднего значений), определяемой при проведении МСКТ. Камни высокой и средней плотности, однородной структуры разрушаются с затруднениями, с образованием

крупных фрагментов до 7 мм, с острыми краями, которые могут травмировать ниже-лежащие мочевыводящие пути и стать причиной формирования «каменной дорожки». Напротив, конкременты низкой плотности и со значительным разбросом разрушаются хорошо, образуя много мелких фрагментов [14].

В нескольких исследованиях изучались факторы, которые могут быть использованы в прогностической модели для успешной ДЛТ, оцениваемые по данным МСКТ. Факторы, связанные с уменьшением вероятности успеха ДЛТ, включают в себя расстояние от кожи до камня (SSD), диаметр лоханочно-мочеточникового перехода, высокую плотность конкрементов в единицах Хаунсфилда (>1200 HU), большой диаметр и объем камня, большое количество камней, высокую неоднородность камня и расположение камня в

шейкой нижней группы, её узкость и большая длина могут не только снижать частоту успеха при лечении МКБ, но и быть непосредственной причиной камнеобразования. Предыдущие работы анализировали строение нижней группы чашечек при выполнении ДЛТ и выявили, что наличие множественных чашечек, ширина шейки менее 4 мм, а также острый угол между лоханкой и шейкой являются наиболее значимыми факторами прогнозирования успеха ДЛТ [16].

Работа по определению индекса однородности конкрементов, проведенная Le JY и соавт. опубликованная в 2015 году [23], продемонстрировала возможность оценки вероятности успеха ДЛТ на предоперационном этапе. В данной работе проводилось измерение стандартного отклонения плотностных показателей конкрементов с использованием выделения области интереса (ROI) с опреде-

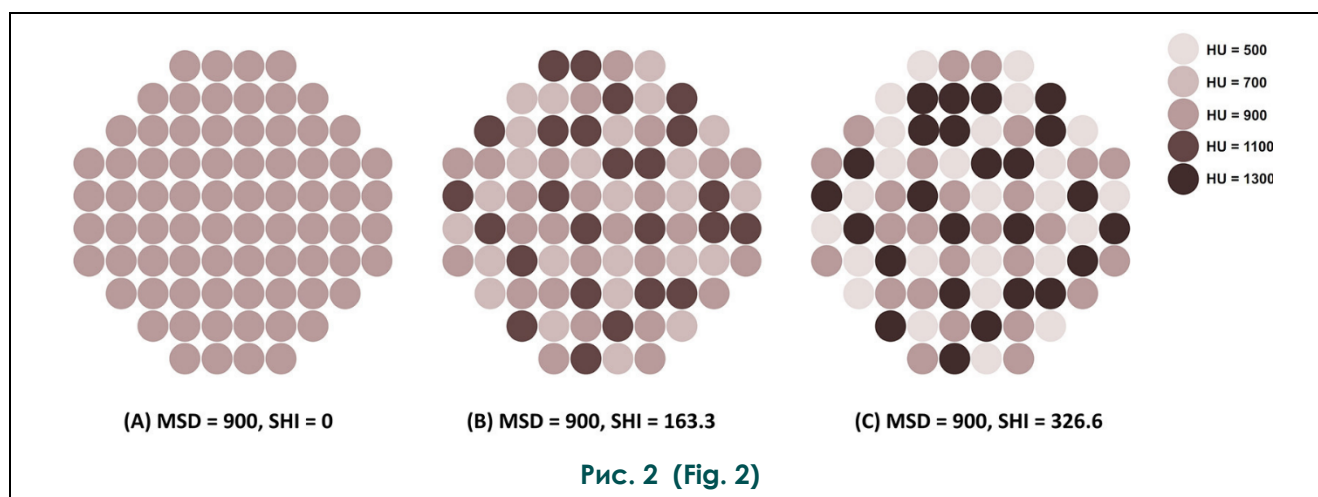


Рис. 2. Схематическое изображение неоднородности состава мочевых камней [23].

Все три конкремента демонстрируют одинаковую среднюю плотность (MSD) 900 HU, но их индекс однородности (SHI) различен.

Fig. 2. Schematic diagram showing the compositional heterogeneity of urinary calculi [23].

All three stones demonstrate the same mean stone density (MSD) of 900 HU but their stone heterogeneity index (SHI) is different.

почке [15].

Показатель SFR независимо от выбранного метода лечения прямо связан со строением чашечно-лоханочной системы (ЧЛС) [16]. Анатомия нижней группы чашечек является одним из основных факторов, влияющих на успех выполнения таких вмешательств, как дистанционная литотрипсия [17]. Низкий SFR для камней нижней группы чашечек при ДЛТ обусловлен не только самим дроблением, но и плохим отхождением фрагментов в связи с анатомическими особенностями. Острый угол между лоханкой и

лением индекса неоднородности конкремента (stone heterogeneity index). Более высокое значение стандартного отклонения плотностных характеристик конкремента имело прямую корреляцию с увеличением показателя SFR после одного сеанса ДЛТ.

В работах Бобылева Д.А. и соавт. сначала определялся участок с наибольшей плотностью с помощью костного окна, который выделялся в ROI при условии, что среднее квадратичное отклонение в этой зоне не превышает 50 ± 5 HU. Это указывало на высокую однородность участка. Затем рассчи-

тывалось соотношение площади однородного участка к общей площади конкремента в процентах, что служило показателем «однородности» конкремента [10,18].

Помимо параметров непосредственно самого конкремента, ряд исследований обращает внимание на сопутствующие доступные к КТ-оценке антропометрические параметры, в т.ч. расстояние от кожи до камня (skin-to-stone distance, SSD). Еще в 2005 г. Pareek G и соавт. установили, что расстояние до конкремента свыше 10 мм является предиктором снижения эффективности методики дистанционной литотрипсии [19]. По данным Wiesenthal J.D. и соавт. (2010) расстояние от кожи до камня более 110 мм было убедительным негативным фактором, влияющим на успешность лечения методом ДЛТ [20].

Цель исследования.

Оценить возможность прогнозирования рецидивного камнеобразования у пациентов после дистанционной литотрипсии, учитывая показатели конкрементов, оцениваемые по данным мультиспиральной компьютерной томографии, а также анатомические особенности чашечно-лоханочной системы почек.

Материалы и методы.

У 47 (100%) больных, среди них 25 (53,2%) мужчин и 22 (46,8%) женщин, после ДЛТ в про- и ретроспективном исследовании, проведена оценка рецидивного камнеобразования. Всем пациентам проводилась мультиспиральная компьютерная томография на компьютерном томографе AquilionOne 640 (Canon, Япония). В послеоперационном периоде для детализации и окончательного установления физико-

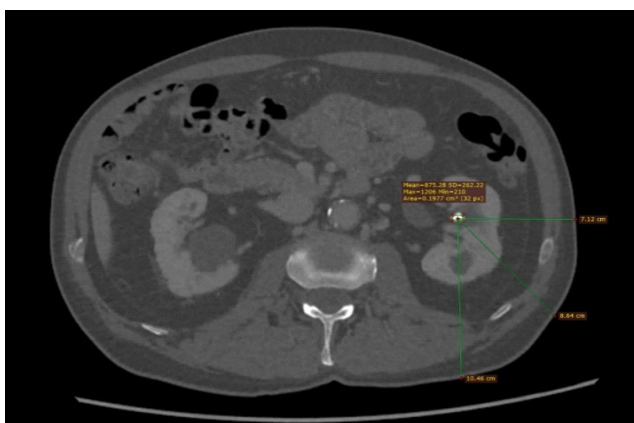


Рис. 3 (Fig. 3)

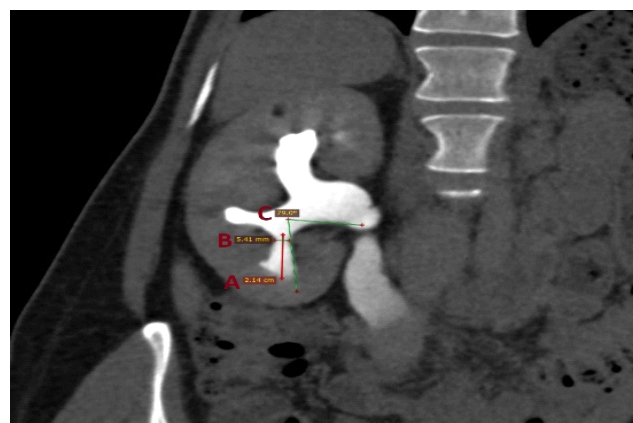


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 3. МСКТ почек, аксиальная плоскость.

Пример измерения расстояния от конкремента до поверхности кожи (stone-skin-distance) под различными угловыми траекториями (0°, 45° и 90°). Расстояние от конкремента до кожи (SSD) 87,3 мм. В средней группе чашечек левой почки определяется неправильной формы конкремент, размерами 6x8x8 мм, средней плотностью +875 HU (SD 262 HU), максимальной плотностью до +1206 HU.

Fig. 3. MSCT of the kidneys, axial plane.

An example of measuring the distance from the calculus to the skin surface (stone-to-skin distance) under different angular trajectories (0°, 45° and 90°). The distance from the calculus to the skin (SSD) is 87.3 mm.

In the middle group of the left kidney calyces, an irregularly shaped calculus is determined, measuring 6x8x8 mm, with an average density of +875 HU (SD 262 HU), and a maximum density of up to +1206 HU.

Рис. 4. МСКТ чашечно-лоханочной системы правой почки, криволинейная реконструкция.

А – измерение длины шейки чашечки (IL), В – измерение ширины шейки чашечки (IW), С – измерение шейно-лоханочного угла (IPA).

Fig. 4. MSCT of the renal pelvis and calyces system of the right kidney, curvilinear reconstruction.

A – measurement of the infundibular length (IL), B – measurement of the infundibular width (IW), C – measurement of the length of the infundibulopelvic angle (IPA).

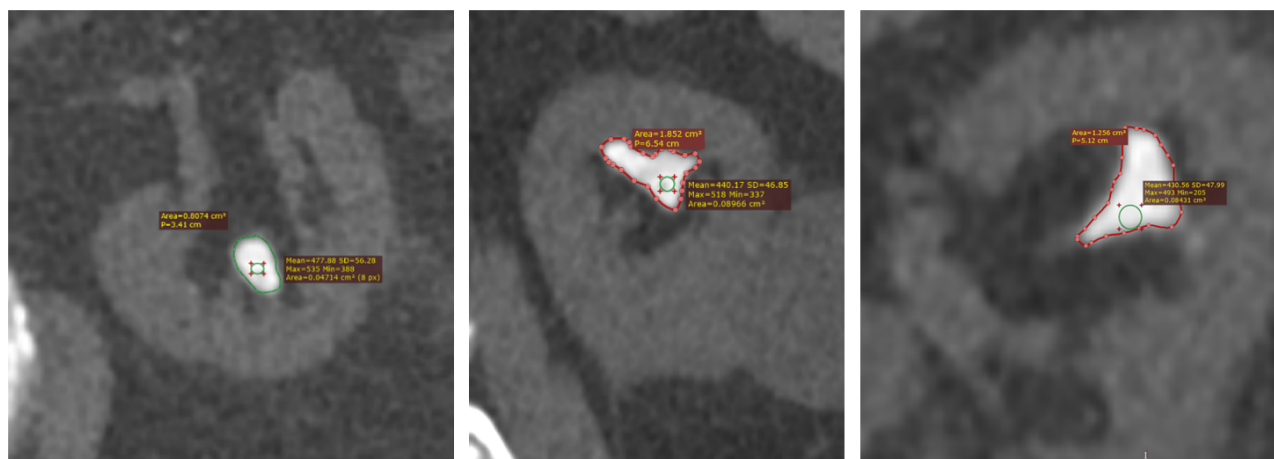


Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. МСКТ, почки, аксиальная плоскость. Пример оценки «ядра» конкремента.

Пример выделения «ядра» конкремента при помощи инструмента ROI (region of interest), в котором стандартное отклонение (SD) не превышает 50 ± 5 HU, с оценкой площади ядра, а также площади конкремента на данном срезе. Соотношение средней площади ядра конкремента к средней площади конкремента в данном случае составило 5,6%.

Fig. 5. MSCT, kidneys, axial plane. An example of assessing the calculus core.

An example of highlighting the calculus core using the ROI (region of interest) tool, with the standard deviation (SD) not exceeding 50 ± 5 HU, with an assessment of core's area, as well as the area of the calculus in a given slice. The ratio of the average area of the calculus core to the average area of the calculus in this case was 5.6%.

химического состава мочевых камней (фрагментов) использовали рентгенофазный анализ или инфракрасную спектроскопию.

Дистанционную литотрипсию выполняли на литотрипторе Gemini (Dornier MedTech, Германия) с электромагнитным источником генерации ударных волн, на котором локализация камня определяется с помощью рентгенологической и ультразвуковой диагностической системы. Мультиспиральную компьютерную томографию проводили на компьютерном томографе AquilionOne 640 (Canon, Япония). В послеоперационном периоде для детализации и окончательного установления физико-химического состава мочевых камней (фрагментов) использовали рентгенофазный анализ или инфракрасную спектроскопию.

При описании каждого больного был использован расширенный протокол, который помимо стандартных параметров, включал в себя следующие показатели:

1. Расстояние от кожи до конкремента (SSD – skin-to-stone distance), мм. Пример измерений представлен на рисунке 3.

2. Характеристика анатомического строения нижней группы чашечек: длина шейки нижней чашки (IL), мм; ширина шей-

ки нижней чашки (IW), мм; шеечно-лоханочный угол (IPA) по Samraio. Пример измерений представлен на рисунке 4.

3. Индекс однородности конкрементов. Пример измерений представлен на рисунке 5.

Результаты.

В исследовании было проанализировано распределение пациентов по различным характеристикам. Конкременты в левой почке обнаружены у 27 пациентов (57,4%), в правой почке – у 23 пациентов (48,9%). Среднее расстояние от кожи до конкремента составило 106,2 мм с разбросом от 36 до 184 мм. Три пациента (6,4%) имели аномалии развития, такие как подковообразная почка. Локализация конкрементов была следующей: в верхней группе чашечек – 11 пациентов (23,4%), в средней группе – 17 пациентов (36,2%), в нижней группе – 27 пациентов (57,4%). Также три пациента (6,4%) имели мочеточниковый стент.

Что касается характеристик конкрементов, то 39 пациентов (83%) имели один камень, 4 пациента (8,6%) – два камня, 1 пациент (2,1%) – три камня и 3 пациента (6,3%) – от четырех до шести камней. Размеры конкрементов по длинной оси составили в сред-

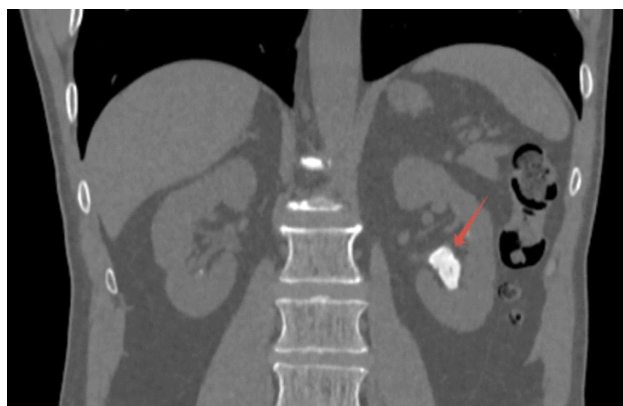


Рис. 6 а (Fig. 6 a)



Рис. 6 б (Fig. 6 b)

Рис. 6. МСКТ почек, корональная плоскость.

А – Исследование перед дистанционной литотрипсией. В нижней группе чашечек левой почки определяется неправильной формы конкремент размерами 10х18х21 мм, средней плотностью + 486 HU, максимальной плотностью + 616 HU.

Б – Исследование после сеанса дистанционной литотрипсии. В нижней группе чашечек левой почки определяются 3 фрагмента первоначального камня неправильной формы, размерами 5х6х7 мм (+425 HU), 3х6х6 мм (+362 HU) и 4х5х5 мм (+490 HU).

Fig. 6. MSCT of the kidneys, coronal plane.

A – The study was performed before shock-wave lithotripsy. In the lower group of calyces of the left kidney, an irregularly shaped calculus is determined, measuring 10x18x21 mm, with an average density of +486 HU, and a maximum density of +616 HU.

B – The study was performed after a session of shock-wave lithotripsy. In the lower group of calyces of the left kidney, 3 fragments of the original stone of irregular shape are determined, measuring 5x6x7 mm (+425 HU), 3x6x6 mm (+362 HU) and 4x5x5 mm (+490 HU).

нем 7,2 мм (разброс от 2,6 до 22,1 мм), по короткой оси – 5,1 мм (от 1,6 до 15,3 мм), а вертикальный размер – 7,1 мм (от 0,2 до 29 мм). Средний показатель плотности составил 570 HU (разброс от 163 до 1217 HU), стандартное отклонение – 373 HU (от 42 до 816 HU).

Анатомическое строение нижней группы чашечек показало среднюю длину шейки нижней чашки 20,7 мм (разброс от 17,2 до 24,2 мм), ширину шейки – 5,5 мм (от 3,3 до 7,5 мм) и шейчно-лоханочный угол по Samraio – 101,8° (от 81,2° до 122,2°).

По количеству сеансов дистанционной литотрипсии результаты распределились следующим образом: один сеанс – у 29 пациента (61,7%), два сеанса – у 18 пациентов (38,3%). Индекс однородности конкрементов при одном сеансе составил 16±4,4%, а при двух сеансах – 7±3,7%. Контрольные КТ-исследования были проведены у 38 пациентов (80,8%).

У 47 наблюдаемых больных (100%) проведено 77 сеансов ДЛТ. SFR 100% достигнут у 26 пациентов (55%). Однако у 21 (45%) па-

циента, при наблюдении в течение 3 месяцев после ДЛТ с оценкой показателя SFR, у 12 из них (57%) отмечено не отхождение фрагментов конкрементов, что привело к ложному рецидивному камнеобразованию (рис. 6). Чаще всего у больных определялось сочетание нескольких факторов рецидивного камнеобразования.

Максимальный размер конкрементов и их средняя плотность в группах пациентов с 1 и 2 сеансами ДЛТ имели статистически значимые различия, однако низкий уровень корреляции между данными показателями и результатами проведенного лечения свидетельствует о низкой прогностической ценности данных параметров в оценке рисков рецидивного камнеобразования. При анализе корреляционных взаимодействий между данными показателями и эффективностью ДЛТ наиболее значительная статистическая зависимость с ложным рецидивом при МКБ отмечена при размере мочевого камня от 16 до 19 мм ($r = 0,42$, $p < 0,05$) и плотности 1001–1500 HU ($r = 0,52$, $p < 0,001$) (табл. 1).

При проведении ретроспективного ана-

Таблица №1. Зависимость количества сеансов ДЛТ для фрагментации конкрементов в зависимости от их размеров и плотности.

Количество сеансов ДЛТ	Характеристики конкрементов	
	Максимальный размер (Me±σ, мм)	Средняя плотность (Me±σ, HU)
1	12±1,9	734±156
2	17±1,5	995±143

лиза результатов предоперационных КТ-исследований пациентов было проведено измерение общей площади конкрементов в трех проекциях и площади участков, где среднее квадратичное отклонение не превышало 50±5 HU. SFR в 100% в группе пациентов, перенесших 1 сеанс ДЛТ, был достигнут при показателе «однородности» 7±3,7%, а для группы пациентов, с 2 сеансами ДЛТ – 16±4,4%. Статистический анализ показал высокую чувствительность и специфичность данного параметра, AUC=0,89. По статистической значимости данный фактор можно считать одним из основных факторов ложного рецидива, связанного с длительной персистенцией фрагментов после ДЛТ. Таким образом, при «однородности» конкремента 10% и менее, то для его устранения рекомендовано проведение ДЛТ, в обратном случае, рекомендованы альтернативные методики, в частности перкутанная нефролитотомия.

Примеры почечных конкрементов раз-

личной «однородности» представлены на рисунках 7 и 8. В первом случае, несмотря на максимальный размер камня 19 мм и среднюю плотность в +450 HU, показатель «однородности» составил всего 5,6%, а успешное отхождение конкремента было достигнуто при помощи одного сеанса ДЛТ (рис. 7). Во втором случае (рис. 8), несмотря на меньший максимальный размер (11 мм) и большую среднюю плотность (550 HU), параметр «однородности» составил 15,8%, а для разрушения конкремента потребовалось 2 сеанса дистанционной литотрипсии.

Среднее значение расстояния от кожи до конкремента (SSD) в группе пациентов, достигших состояния stone-free составило 83,3 ± 21,9 мм, по сравнению с пациентами с остаточными конкрементами, где среднее значение SSD составило 107,7 ± 28,9 мм (p ≤ 0,05). Таким образом, увеличение расстояния от кожи до конкремента снижает показатель SFR после ДЛТ, статистически значимо влияя

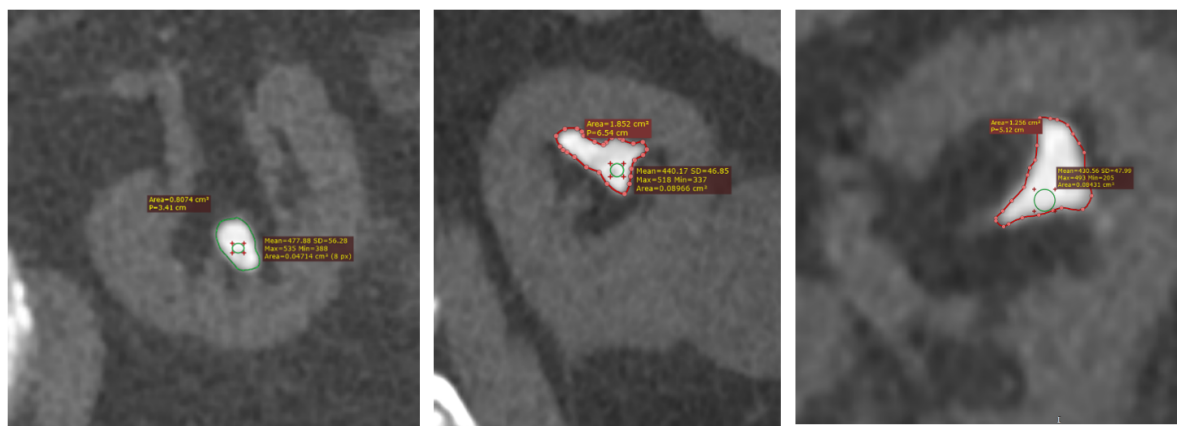


Рис. 7 (Fig. 7)

Рис. 7. МСКТ, почки, аксиальная, сагиттальная, корональная плоскости. Пример измерений площади конкремента и его ядра.

Конкремент с максимальным размером 19 мм, средняя плотность 450 HU, средняя площадь зоны «однородности» 5,6%.

Fig. 7. MSCT, kidneys, axial, sagittal, coronal planes. Example of calculus and core area measurement.

There is a stone with a maximum size of 19 mm, an average density of 450 HU, an average area of the "uniformity" zone of 5,6%.

на число необходимых сеансов для полного отхождения конкрементов.

Анализ локализации мочевого камня в чашечно-лоханочной системе (ЧЛС) на фоне ложного рецидива МКБ после ДЛТ определил прямую корреляционную связь между рецидивом МКБ после ДЛТ и локализацией камня в нижней группе чашечек ($r = 0,55$, $p < 0,01$). При проведении ДЛТ камней почек значи-

камня от 16 до 19 мм ($r = 0,42$, $p < 0,05$) и плотности 1001–1500 HU ($r = 0,52$, $p < 0,001$). Это указывает на то, что данные характеристики не являются надежными в оценке риска повторного образования камней. Однако комплексный анализ данных показателей в сочетании с оценкой индекса однородности конкрементов, SSD, а также анатомии чашечно-лоханочной системы почек может

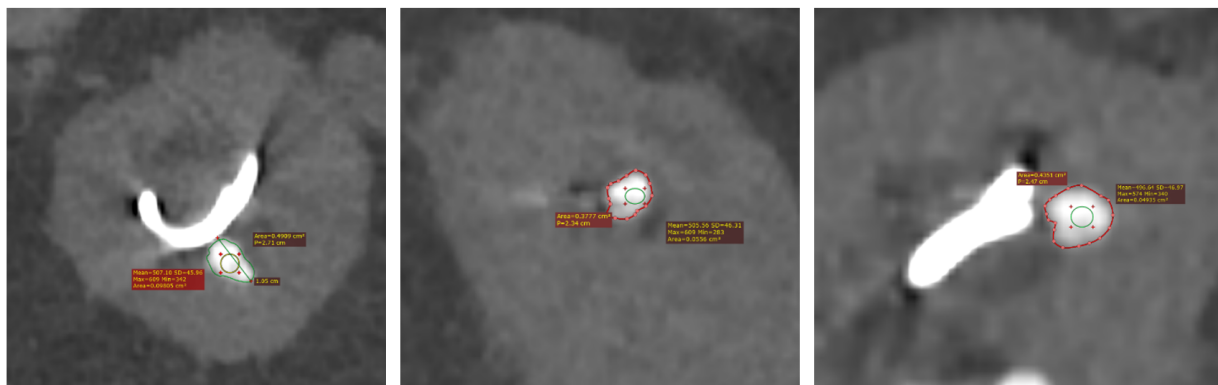


Рис. 8 (Fig. 8)

Рис. 8. МСКТ, почки, аксиальная, сагиттальная, корональная плоскости. Пример измерений площади конкремента и его ядра.

МКонкремент с максимальным размером 11 мм, средняя плотность 550 HU, средняя площадь зоны «однородности» 17%. СКТ, почки, аксиальная, сагиттальная, корональная плоскости. Пример измерений площади конкремента и его ядра.

Fig. 8. MSCT, kidneys, axial, sagittal, coronal planes. Example of calculus and core area measurement.

The calculus has a maximum size of 11 mm, average luminance of 550 HU, and the average «uniformity» zone area is 17%.

тельное влияние на показатель SFR оказывают анатомические параметры (IW, IL, IP) нижней группы чашечек. При ложном рецидиве МКБ определялась статистически значимая корреляционная связь ($r = 0,04$, $p < 0,01$) с параметрами ЧЛС ($IL \geq 27$ мм, $IW \leq 4$ мм, $IPA \leq 90^\circ$). Локализация конкрементов в верхней и нижней группе чашечек значимо не влияет на вероятность рецидивного камнеобразования.

Обсуждение. Оценка показателей плотности и размеров камней по данным МСКТ, многократно обсуждалась авторами различных публикаций в контексте прогнозирования результатов дистанционной литотрипсии. В нашем исследовании мы обнаружили, что, несмотря на статистически значимые различия в этих показателях между пациентами, прошедшими один или два сеанса ДЛТ для полного удаления камней, связь этих параметров с результатами лечения оказалась недостаточно сильной: при размере мочевого

существенно улучшить возможности МСКТ в прогнозировании рецидивов камнеобразования у пациентов после ДЛТ.

Закключение.

В данном исследовании была оценена возможность прогнозирования рецидивного камнеобразования у пациентов, перенесших дистанционную литотрипсию, с использованием различных показателей конкрементов, полученных на основе мультиспиральной компьютерной томографии. Результаты показали, что существует необходимость комплексного подхода, включающего анализ структурных особенностей камней, анатомии чашечно-лоханочной системы почек, расстояния от камня до поверхности кожи для более точного прогнозирования рецидивов. Комбинированный анализ данных может значительно улучшить предсказательные возможности МСКТ и помочь в оптимизации лечения пациентов после ДЛТ.

Источник финансирования и кон-

фликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования

и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Беляева К.А., Серова Н.С., Руденко В.И., Капанадзе Л.Б., Израелян Ш.О. Возможности КТ-перфузии почек у пациентов с камнем мочеочника. *REJR*. 2022; 12(2):113-123. DOI: 10.21569/2222-7415-2022-12-2-113-123.
2. Варюхина Д.А., Крючков И.А., Чехонацкая М.А., Россоловский А.Н., Бобылев Д.А., Маркосян Г.Т., Николенко В.Н. Значение мультиспиральной компьютерной томографии в оценке анатомических параметров чашечно-лоханочного комплекса почки при малоинвазивных методах лечения нефролитиаза. *REJR*. 2025; 15(2):85-96. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-2-85-96.
3. Чехонацкая М.А., Россоловский А. Н., Емельянова Н.В. и др.. Комплексная оценка состояния почечной паренхимы после дистанционной ударно-волновой литотрипсии у больных с нефролитиазом. В сб.: Актуальные вопросы урологии: эндокринологические и гинекологические аспекты урологического здоровья: материалы межрегион, науч.-практ конф. Пенза, 2017. С. 82-85.
4. Аюян Г.Н., Аляев Ю.Г., Рапопорт Л.М., Газимиев М.С.А., Аюян Г.С. Осложнения перкутанной нефролитомии: данные литературы и собственные исследования Вопросы урологии и андрологии. 2017; 5 (3): 28-34.
5. Глыбочко П.В., Аляев Ю.Г., Руденко Ю. и др. Клиническая роль рентгеновской компьютерной томографии в прогнозировании клинической эффективности дистанционной ударно-волновой литотрипсии. *Урология*. 2019; 86 (2): 63-68.
6. EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress Madrid 2025. ISBN 978-94-92671-29-5.
7. Cui HW, Silva MD, Mills AW, North BV, Turney BW. Predicting shockwave lithotripsy outcome for urolithiasis using clinical and stone computed tomography texture analysis variables. *Sci Rep*. 2019 Oct 11;9(1):14674. doi: 10.1038/s41598-019-51026-x. PMID: 31604986; PMCID: PMC6788981.
8. Goldfarb D.S. Empiric therapy for kidney stones. *Urolithiasis*. 2019; 47 (1): 107-113.
9. Аляев Т.Т, Газимиев М.А., Руденко В.И. и др. Мочекаменная болезнь: современные методы диагностики и лечения. М., ГЭОТАР-Медиа, 2016. 224 с.
10. Бобылев Д.А., Чехонацкая М.А., Осадчук М.А., Россоловский А.Н., Илясова Е.Б., Основин О.В., Киреева Н.В., Крючков И.А., Чехонацкий И.А. Прогнозирование результатов дистанционной ударно-волновой литотрипсии у больных нефролитиазом. *REJR*. 2018; 8 (2): 110-115. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-2-110-115.
11. Капанадзе Л.Б., Серова Н.С., Руденко В.И., Кузьмичева Г.М., Александрова К.А., Новиков И.А. Результаты применения двухэнергетической компьютерной томографии в диагностике мочекаменной болезни. *REJR*. 2018; 8 (2): 94-104. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-2-94-104.
12. Руденко В.И., Краев И.Г., Демидко Ю.А. Факторы риска и прогнозирование рецидивного камнеобразования после дистанционной литотрипсии. *Фармакология & Фармакотерапия*. 2023; 2: 70-77. DOI 10.46393/27132129_2023_2_70
13. Bandi G, Meiners RJ, Pickhardt PJ, Nakada SY. Stone measurement by volumetric three-dimensional computed tomography for predicting the outcome after extracorporeal shock wave lithotripsy. *BJU International*. 2012;103:524-528.
14. Руденко В.И., Перекалина АН., Краев И.Г. Клиническое значение КТ-денситометрии в прогнозировании эффективности дистанционной литотрипсии. *Урологические ведомости*. 2016; 6: 17.
15. Weinrich JM, Bannas P, Regier M, et al. Low-dose CT for evaluation of suspected urolithiasis: Diagnostic yield for assessment of alternative diagnoses. *American Journal of Roentgenology* 2018;210(3):557-563.
16. Песегов С.В., Руденко В.И., Саенко В.С., Александрова К.А., Серова Н.С., Капанадзе Л.Б. Современные лучевые технологии в оценке чашечно-лоханочной системы при планировании хирургического лечения больных нефролитиазом. *REJR*. 2019; 9(3):127-133. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-3-127-133.
17. Гаджиев Н.К., Горгоцкий И.А., Аюян А.А., Пивень Н.В., Шкарупа А.А., Бритов В.П., Мартов А.Г., Петров А.Д., Шкарупа Д.Д. Возможности создания пункционной насадки для конвексного УЗ-датчика с использованием технологии 3D-печати. *Экспериментальная и клиническая урология*. 2023;16(1):30-34; <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2023-16-1-30-34>
18. Россоловский А.Н., Крючков И.А., Чехонацкая М.А., Николенко В.Н., Бобылев Д.А., Кондратьева О.А., Россоловская К.А., Чехонацкий И.А. КТ-мониторинг в прогнозировании эффективности лечения резидуальных конкрементов после пункционной нефролитотрипсии. *REJR*. 2021; 11(2):199-208. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-2-199-208.
19. Pareek G, Hedican SP, Lee FT Jr, Nakada S.Y. Shock wave lithotripsy success determined by skin-to-stone distance on computed tomography. *Urology*. 2005; 66: 94–944.
20. Wiesenthal JD, Ghiculete D, D'A Honey RJ, Pace KT (2010) Evaluating the importance of mean stone density and skin-to-stone distance in predicting successful shock wave lithotripsy of renal and ureteric calculi. *Urol Res* 38: 307–313. 10.1007/s00240-010-0295-0
21. Руденко В.И. Мочекаменная болезнь. Актуальные вопросы диагностики и выбора метода лечения. Докт.дисс. Москва, 2004. 260 с.
22. Руденко В.И. Современные аспекты клинической эффективности дистанционной литотрипсии. *Урологические ведомости*. 2017; 7 (1S): 93-95.
23. Lee JY, Kang DH, Chung DY, Kim JH, Kang YJ, Chung HD, et al. MP54-15 stone heterogeneity index defined as the standard deviation of hounsfield units on non-contrast com-

puted tomography is a novel predictor for shock-wave lithotripsy outcomes in ureteral calculi. *Journal of Urology*. 2016;195(4S):e732.

<https://doi.org/10.1016/j.juro.2016.02.585>.

References:

1. Belyaeva K.A., Serova N.S., Rudenko V.I., Kapanadze L.B., Israelyan Sh.O. Possibilities of renal CT perfusion in patients with ureteral stone. *REJR*. 2022; 12(2):113-123. DOI: 10.21569/2222-7415-2022-12-2-113-123 (in Russian).
2. Varyukhina D.A., Kryuchkov I.A., Chekhonatskaya M.L., Rossolovskiy A.N., Bobylev D.A., Markosyan G.T., Nikolenko V.N. The significance of multislice computed tomography in assessing the anatomical parameters of renal calyces-pelvis system in minimally invasive techniques for the treatment of nephrolithiasis. *REJR*. 2025; 15(2):85-96. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-2-85-96 (in Russian).
3. Chekhonatskaya M.L., Rossolovsky A.N., Emelyanova N.V., et al. Comprehensive assessment of the state of the renal parenchyma after extracorporeal shock wave lithotripsy in patients with nephrolithiasis. In: *Current issues in urology: endocrinological and gynecological aspects of urological health: materials of the interregional scientific and practical conference*. Penza, 2017. PP. 82-85 (in Russian).
4. Akopyan G.N., Alyaev Yu.G., Rapoport L.M., Gazimiyev M.S.A., Akopyan G.S. Complications of percutaneous nephrolithotomy: literature data and our own research. *Issues of urology and andrology*. 2017; 5 (3): 28-34 (in Russian).
5. Glybochko PV, Alyaev YuG, Rudenko Yu, et al. Clinical role of X-ray computed tomography in predicting the clinical efficacy of extracorporeal shock wave lithotripsy. *Urology*. 2019; 86(2):63-68 (in Russian).
6. EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress Madrid 2025. ISBN 978-94-92671-29-5.
7. Cui HW, Silva MD, Mills AW, North BV, Turney BW. Predicting shockwave lithotripsy outcome for urolithiasis using clinical and stone computed tomography texture analysis variables. *Sci Rep*. 2019 Oct 11;9(1):14674. doi: 10.1038/s41598-019-51026-x. PMID: 31604986; PMCID: PMC6788981.
8. Goldfarb D.S. Empirical therapy for kidney stones. *Urolithiasis*. 2019; 47 (1): 107-113.
9. Alyaev T.T., Gazimiev M.A., Rudenko V.I. and others. *Urolithiasis: modern methods of diagnosis and treatment*. M., GEOTAR-Media, 2016. 224 p. (in Russian).
10. Bobylev D.A., Chekhonatskaya M.L., Osadchuk M.A., Rossolovsky A.N., Ilyasova E.B., Osnovin O.V., Kireeva N.V., Kryuchkov I.A., Chekhonatsky I.A. Prediction of the results of extracorporeal shock wave lithotripsy in patients with nephrolithiasis. *REJR*. 2018; 8 (2): 110-115. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-2-110-115 (in Russian).
11. Kapanadze LB, Serova NS, Rudenko VI, Kuzmicheva GM, Aleksandrova KA, Novikov IA. Results of using dual-energy computed tomography in the diagnosis of urolithiasis. *REJR*. 2018; 8 (2): 94-104. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-2-94-104 (in Russian).
12. Rudenko V.I., Kraev I.G., Demidko Yu.L. Risk factors and prediction of recurrent stone formation after extracorporeal shock wave lithotripsy. *Pharmacology & Pharmacotherapy*. 2023; 2: 70-77. DOI 10.46393/27132129_2023_2_70 (in Russian).
13. Bandi G, Meiners RJ, Pickhardt PJ, Nakada SY. Stone measurement by volumetric three-dimensional computed tomography for predicting the outcome after extracorporeal shock wave lithotripsy. *BJU International*. 2012;103:524-528.
14. Rudenko V.I., Perekalina A.N., Kraev I.G. Clinical value of CT densitometry in predicting the effectiveness of extracorporeal shock wave lithotripsy. *Urological Journal*. 2016; 6: 17 (in Russian).
15. Weinrich JM, Bannas P, Regier M, et al. Low-dose CT for evaluation of suspected urolithiasis: Diagnostic yield for assessment of alternative diagnoses. *American Journal of Roentgenology* 2018;210(3):557-563.
16. Pesegov SV, Rudenko VI, Saenko VS, Aleksandrova KA, Serova NS, Kapanadze LB. Modern radiation technologies in assessing the renal pelvis and calyces when planning surgical treatment of patients with nephrolithiasis. *REJR*. 2019; 9(3):127-133. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-3-127-133 (in Russian).
17. Gadzhiev N.K., Gorgotsky I.A., Aloyan A.A., Piven N.V., Shkarupa A.A., Britov V.P., Martov A.G., Petrov A.D., Shkarupa D.D. Possibility of creating a puncture nozzle for a convex ultrasound sensor using 3D printing technology. *Experimental and clinical urology*. 2023;16(1):30-34; <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2023-16-1-30-34> (in Russian).
18. Rossolovsky A.N., Kryuchkov I.A., Chekhonatskaya M.L., Nikolenko V.N., Bobylev D.A., Kondratyeva O.A., Rossolovskaya K.A., Chekhonatsky I.A. CT monitoring in predicting the effectiveness of treatment of residual stones after needle nephrolithotripsy. *REJR*. 2021; 11(2):199-208. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-2-199-208 (in Russian).
19. Pareek G, Hedican SP, Lee FT Jr, Nakada SY. Shock wave lithotripsy success determined by skin-to-stone distance on computed tomography. *Urology*. 2005; 66: 94-944.
20. Wiesenthal JD, Ghiculete D, D'A Honey RJ, Pace KT (2010) Evaluating the importance of mean stone density and skin-to-stone distance in predicting successful shock wave lithotripsy of renal and ureteric calculi. *Urol Res* 38: 307-313. 10.1007/s00240-010-0295-0
21. Rudenko V.I. Urolithiasis. Current issues in diagnostics and choice of treatment method. Doctor of Medical Sciences. Moscow, 2004. 260 p. (in Russian).
22. Rudenko V.I. Modern aspects of clinical effectiveness of extracorporeal shock wave lithotripsy. *Urological News*. 2017; 7 (1S): 93-95. (in Russian).
23. Lee JY, Kang DH, Chung DY, Kim JH, Kang YJ, Chung HD, et al. MP54-15 stone heterogeneity index defined as the standard deviation of hounsfield units on non-contrast computed tomography is a novel predictor for shock-wave lithotripsy outcomes in ureteral calculi. *Journal of Urology*. 2016;195(4S):e732. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2016.02.585>.

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ОПЫТА РЕНТГЕНОЛОГА В ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МРТ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ВЕРСИИ PI-RADS 2.1: РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ОДНОЦЕНТРОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Рзаев Р.Т., Хе Минтзе, Фельдшеров М.В., Тычинский А.С., Тянь А.С., Щегельский В.В.,
Захаров Р.С., Федосеева В.К.

ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет).
г. Москва, Россия.

Цель исследования. Определить разницу между опытом рентгенолога и интерпретацией мультипараметрической магнитно-резонансной томографии (мпМРТ) предстательной железы с оценкой по системе PI-RADSv2.1, а также оценить клиническую значимость PI-RADS 3 в диагностике и лечении рака предстательной железы.

Материалы и методы. Было проведено ретроспективное одноцентровое исследование, в котором приняли участие шесть независимых рентгенологов с разным уровнем квалификации. В ходе исследования специалистами были оценены изображения, полученные при мпМРТ пациентов с ранее установленным PI-RADS 3, подтвержденным гистологически. В период с января 2023 по декабрь 2023 года мпМРТ была выполнена 276 пациентам. Из исследования были исключены пациенты с предшествовавшим лечением, с оценками, отличными от PI-RADS 3, и без патогистологического подтверждения. В исследование было включено 35 пациентов. Информация о локализации патологических очагов в шкалах PI-RADS представлена в соответствии с руководством PI-RADS версии 2.1. Полученные результаты были сопоставлены для анализа межэкспертной вариабельности оценок по шкале PI-RADS. Надежность межэкспертных оценок была измерена с помощью значений капши Козна (k), а корреляции между оценками PI-RADS v2.1 и оценками по шкале Глисона анализировались с использованием коэффициента тау Кендалла (t). Были рассчитаны такие диагностические показатели, как площадь под ROC-кривой (AUC), чувствительность, специфичность, положительная прогностическая ценность, отрицательная прогностическая ценность и точность.

Результаты. На основе последней версии PI-RADS v2.1, средний показатель k среди рентгенологов составил 0,087. Средняя корреляция между оценками PI-RADS v2.1 и оценками по шкале Глисона была положительной, что указывает на симметричную, но слабую связь ($t = 0,154$; $P = 0,549$). Специалист 1 показал наилучший результат по AUC, равный 0,785, что свидетельствует о наивысшей эффективности в обнаружении рака предстательной железы (РПЖ). Специалисты 2 и 4 достигли наивысшей точности (60,0%). Специалист 5 показал наивысшую чувствительность (100,0%). Специалисты 2 и 4 отличились наивысшей специфичностью (91,9%).

Обсуждение. В исследовании шесть рентгенологов с различным уровнем опыта оценивали мпМРТ предстательной железы в соответствии с руководством PI-RADSv2.1. Для оценки согласованности между рентгенологами, все специалисты были лишены доступа к предыдущим протоколам мпМРТ, результатам морфологического исследования и данным пациентов. Экспертный рентгенолог достиг наивысших значений AUC и PPV в дифференцировке доброкачественных и злокачественных образований; однако эксперт не показал наивысших или наименьших показателей чувствительности, специфичности, точности и NPV. Начинающий специалист продемонстрировал наихудшие результаты по AUC, точности, NPV и PPV среди всех экспертов, несмотря на лучшую корреляцию между результатами изображений и патологическими данными. Полученные данные указывают на то, что уровень опыта не оказывает существенного влияния на диагностическую эффективность, что подчеркивает необходимость постоянного обучения менее опытных специалистов для повышения точности выявления РПЖ. Наблюдаемая согласованность между специалистами также была низкой.

Категория PI-RADS 3 по-прежнему остаётся «серой зоной» в клинической практике как для рентгенологов, так и для урологов ввиду неопределённости наличия РПЖ. В этом исследовании восемь пациентов были диагностированы с РПЖ на основе гистологических результатов, что составило 23% от общей выборки исследования. Однако большинство из них имели рак с

низким риском ШГ $\leq 7a$ ($n=7$, 87.5%).

Необходимо проведение крупных многоцентровых исследований для дальнейшей проверки клинической ценности оценки PI-RADS 3.

Заключение. Шесть рентгенологов с разным уровнем опыта при использовании руководства PI-RADS версии 2.1 продемонстрировали степень межэкспертной согласованности от низкой до удовлетворительной. Различия в уровне опыта не оказали существенного влияния на точность определений по категории PI-RADS 3.

Ключевые слова: PI-RADSV2.1, рак предстательной железы, мультипараметрическая МРТ, межэкспертная вариабельность.

Контактный автор: Рзаев Р.Т., e-mail: rzaev_r_t@staff.sechenov.ru

Для цитирования: Рзаев Р.Т., Хе Минтзе, Фельдшеров М.В., Тychинский А.С., Тянь А.С., Щегельский В.В., Захаров Р.С., Федосеева В.К. Прогностическая ценность опыта рентгенолога в интерпретации данных мультипараметрической МРТ предстательной железы по версии PI-RADS 2.1: ретроспективное одноцентровое исследование. REJR 2026; 16(1):138-149. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-138-149.

Статья получена: 13.02.26

Статья принята: 14.04.26

PREDICTIVE VALUE OF RADIOLOGIST EXPERIENCE IN INTERPRETING MULTIPARAMETRIC PROSTATE MRI DATA ACCORDING TO PI-RADS 2.1: A RETROSPECTIVE SINGLE-CENTER STUDY

Rzaev R.T., He Mingze, Feldsherov M.V., Tychinskii A.S., Tyan A.S., Shchegelskii V.V., Zakharov R.S., Fedoseeva V.K.

Sechenov University, Moscow, Russia.

Purpose. To explore how radiologist experience influences the interpretation of prostate multiparametric MRI (mpMRI) with PI-RADS score 3 and its clinical utility in prostate cancer (PCa) diagnosis and management.

Materials and Methods. A retrospective single-center study included six radiologists with varying expertise levels to examine mpMRI images of patients designated with PI-RADS 3 scores. Out of 276 reviewed patients from January to December 2023, 35 met the inclusion criteria. Information on the localization of the pathological changes and the PI-RADS scores are reported according to the PI-RADS version 2.1 guideline. The results obtained were compared to analyze the inter-reader variability utilizing Cohen's kappa (k) statistics. Kendall's tau coefficient (t) was used for correlations between PI-RADS and Gleason scores, alongside various diagnostic performance metrics. Diagnostic performance metrics such as AUC, sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, and accuracy were calculated.

Results. Interpreting PI-RADS version 2.1, the median k score was 0.087, showing poor-to-fair agreement among radiologists. A weak positive correlation was found between PI-RADS scores and Gleason scores ($t = 0.154$; $P = 0.549$). Diagnostic performance varied, with Reader 1 showing the highest AUC (0.785) for superior PCa detection. Readers 2 and 4 had the highest accuracy (60%), while Reader 5 achieved 100% sensitivity. Readers 2 and 4 also recorded the highest specificity (91.9%).

Discussion. Six radiologists with varying levels of experience evaluated prostate multiparametric MRI (mpMRI) in accordance with the PI-RADSV2.1 guidelines. To assess inter-reader agreement, all specialists were blinded to prior mpMRI reports, histopathological results, and patient data. The expert radiologist achieved the highest AUC and PPV values in differentiating benign and malignant lesions; however, this reader did not demonstrate the highest or lowest sensitivity, specificity, accuracy, or NPV. The least experienced radiologist showed the poorest performance in terms of AUC, accuracy, NPV, and PPV among all readers, despite demonstrating the best correlation between imaging findings and pathological data. The obtained data suggest that the level of experience does not have a significant impact on diagnostic performance, highlighting the need for continuous training of less experienced specialists to improve the accuracy of prostate cancer detection. The observed inter-

reader agreement was also low.

The PI-RADS 3 category remains a “gray zone” in clinical practice for both radiologists and urologists due to uncertainty regarding the presence of prostate cancer. In this study, eight patients were diagnosed with prostate cancer based on histological findings, accounting for 23% of the total sample. However, most of these cases were low-risk cancers with a Gleason score $\leq 7a$ ($n = 7$, 87.5%).

Large multicenter studies are needed to further validate the clinical value of PI-RADS 3 assessment.

Conclusion. The findings demonstrate poor-to-fair agreement among radiologists of differing experience levels when interpreting PI-RADS 3 scores using version 2.1 guidelines, suggesting that radiologist expertise does not significantly impact PI-RADS 3 score assessments. This underlines the need for larger, multicenter studies to enhance diagnostic consistency and potentially update guidelines for more precise PCa detection.

Keywords: PI-RADS version 2.1, Prostate cancer, multiparametric MRI, Inter-reader variability.

Corresponding author: Rzaev Ramin, e-mail: rzaev_r_t@staff.sechenov.ru

For citation: Rzaev R.T., He Mingze, Feldsherov M.V., Tychinskii A.S., Tyan A.S., Shchegelskii V.V., Zakharov R.S., Fedoseeva V.K. Predictive value of radiologist experience in interpreting multiparametric prostate MRI data according to PI-RADS 2.1: a retrospective single-center study. REJR 2026; 16(1):138-149. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-138-149.

Received: 13.02.26

Accepted: 14.04.26

Рак предстательной железы (РПЖ) является одной из ведущих причин смертности среди мужчин по всему миру, при этом наблюдается тревожная тенденция роста заболеваемости [1]. Согласно руководству Европейской ассоциации урологов (EAU) мультипараметрическая МРТ (мпМРТ) предстательной железы является основным методом визуализации для выявления РПЖ и настоятельно рекомендуется к проведению перед биопсией [2, 3]. Система PI-RADS (Prostate Imaging Reporting and Data System) предлагает комплексные рекомендации для получения, интерпретации и составления отчетов по результатам мпМРТ [4]. Хотя руководство PI-RADS регулярно обновляется и направлено на стандартизацию процедур (последовательности) сканирования и интерпретации мпМРТ, точный анализ данных мпМРТ требует высокого уровня квалификации [5]. Кроме того, межэкспертная вариабельность ввиду разного уровня опыта среди радиологов значительно снижает прогностическую точность, что приводит к уменьшению чувствительности [6, 7]. Несмотря на то, что в последней PI-RADS версии 2.1 (PI-RADSv2.1) значительно повысилась специфичность, точное определение PI-RADS 3 остается серьезной проблемой из-за неоднозначных магнитно-резонансных признаков [8, 9]. Это может привести к расхождениям в выборе

последующей тактики лечения, что может повлечь либо недостаточное, либо чрезмерное лечение, существенно влияя на прогноз [10]. Учитывая важность точного определения оценки PI-RADS, мы привлекли для участия в ретроспективной оценке пациентов с установленными PI-RADS 3 и подтвержденными патологическими результатами шестерых рентгенологов с разным уровнем квалификации: экспертов, врачей со средним опытом работы и начинающих специалистов. С междисциплинарной точки зрения данное исследование проводилось с целью изучения оценки мпМРТ предстательной железы с акцентом на определение PI-RADS 3 и определения клинической ценности диагностики и лечения РПЖ, основанных на PI-RADS 3.

Цель исследования.

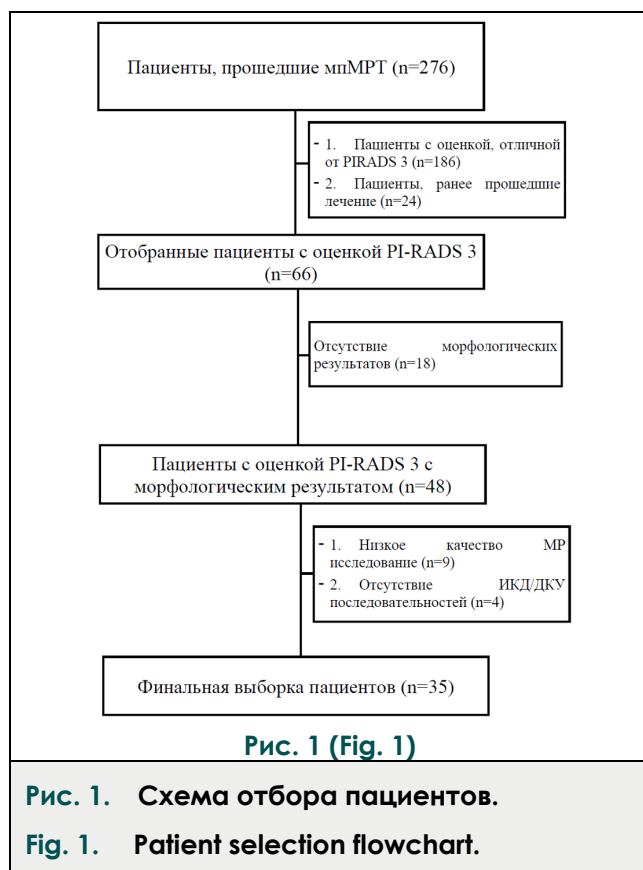
Определить алгоритм действия рентгенологов и урологов при выявлении у пациентов PI-RADS 3 с дальнейшим более эффективным междисциплинарным сотрудничеством.

Материалы и методы.

Дизайн исследования и выборка пациентов.

Данное исследование ретроспективное одноцентровое, было проведено в Институте урологии и репродуктивного здоровья Сеченовского университета и получило одобрение локального этического комитета.

Исследование проведено в соответ-



ствии с Хельсинкской декларацией. В период с января 2023 года по декабрь 2023 года в исследование были включены пациенты с подозрением на РПЖ, которым была проведена мпМРТ предстательной железы. Согласно медицинской электронной системе (МИС), в исследование было включено 276 пациентов с протоколами мпМРТ предстательной железы. После отбора финальная выборка составила 35 пациентов (рис. 1).

Параметры последовательностей МРТ.

Мультипараметрические МРТ-исследования предстательной железы проводились на аппарате GE MPT 3.0 T_h (SIGNA Architect, Chicago, Illinois, United States), оснащенный катушкой AIR™ с 30 каналами. Последовательности МРТ выполнялись в соответствии с параметрами, указанными в таблице №1, а также в соответствии с последней версией руководства PI-RADSv2.1. В последовательности были включены T2-ВИ, ДВИ и изображения на фоне динамического контрастного усиления (ДКУ). Для ДВИ использовались значения b-факторов: 50, 800 и 1400 с/мм², с синтетическими b-значениями 2000 и 2500 с/мм². Карты ИКД автоматически генерировались для качественной и количественной оценки ДВИ. Осевые изображения динамического контрастирования бы-

ли выполнены до, во время и после быстрого введения хелатов гадолиния (14 фаз, каждая по 16 секунд) с использованием инжектора (Medrad, spectris solaris EP, Bayer), после чего вводилось 20 мл физиологического раствора со скоростью 2,5 мл/с.

Интерпретация МРТ.

Каждое мпМРТ исследование предстательной железы с ранее определенным PI-RADS 3 и патологическими результатами было оценено шестью независимыми специалистами с различным уровнем квалификации и опытом в оценке по системе PI-RADS (рентгенолог 1: R.R., эксперт; рентгенолог 2: V.F., эксперт; рентгенолог 3: A.T., специалист с опытом работы; рентгенолог 4: Z.S., специалист с опытом работы; рентгенолог 5: S.A., начинающий специалист; рентгенолог 6: T.A., начинающий специалист). Рентгенологи не имели доступа к информации о пациентах и клиническим данным, включая патогистологические результаты. Два аспиранта, рентгенолог и уролог, ассистировали в процессе просмотра и оценки. Они отвечали за начальную рандомизацию и анонимизацию, а также за сбор окончательных оценок PI-RADS от каждого рентгенолога. После рандомизации и анонимизации полные файлы DICOM, включающие все необходимые последовательности МРТ, были просмотрены и проанализированы каждым из специалистов. Локализация поражений и оценка по PI-RADS были указаны в соответствии с руководством PI-RADS версии 2.1. Полученные результаты были сопоставлены для оценки межэкспертной вариабельности оценки PI-RADS.

Оценка магнитно-резонансных и гистологических данных.

Поскольку некоторые из вновь определенных оценок PI-RADS отличались от предыдущих, результаты гистологического исследования были использованы для сравнения с полученными данными МРТ для оценки качества интерпретации, выполненной рентгенологами.

Статистический анализ.

Статистический анализ был выполнен с использованием языка программирования Python, специализированного с применением функциональности библиотек pandas, numpy и scipy. В процессе анализа использовалась Python версия 3.11. Нормальность распределения и однородность дисперсии значений параметров оценивались соответственно с помощью теста Колмогорова-Смирнова и теста Левена на однородность дисперсий. Межнаблюдательная надежность была количественно оценена с использованием каппа-

Таблица №1. Параметры различных последовательностей мпМРТ.

Параметры	T2WI sag.	T2WI ax.	T2WI cor.	DWI	DCE	T1WI
Время повторения (мс)	3889	3933	2992	6041	5.1	478
Время появления эхо-сигнала (мс)	115.9	133.8	115.9	79.8	1 - 1.1. 2 - 2.2	7.1
Толщина среза (мм)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	4
Промежуток между срезами (мм)	0.3	0.3	0.3	0.3	-1.3	0
Угол поворота (°)	142	120	142	90	12	111
Поле обзора (мм ²)	200	200	200	200	300	300
Матрица	384×384	384×384	384×384	128×6 4	160×19 2	384×25 6
Длительность последовательности (с)	3:38	3:02	2:48	4:56	3:04	3:35
Количество срезов	26	28	20	28	76	48
Полоса пропускания	41.67	41.67	41.67	250	142.86	111.1

статистики Козна (k). Корреляции между оценками PI-RADS среди специалистов и оценками по Глисон (GS) были установлены с помощью коэффициента тау Кендалла (t), что является непараметрическим методом, подходящим для переменных, которые не следуют нормальному распределению. Диагностическая эффективность оценивалась путем расчета площади под кривой характеристики оператора (AUC). Чувствительность, специфичность, положительная прогностическая ценность (PPV), отрицательная прогностическая ценность (NPV) и точность были определены путем категоризации оценок PI-RADS с пороговыми значениями 3 и 4.

Истинно-положительный: PI-RADS≥3 и шкала по Глисон ≥6;

Истинно-отрицательный: PI-RADS≤2 и шкала по Глисон <6;

Ложноположительный: истинно-положительный: PI-RADS≥3 и шкала по Глисон <6; Ложноотрицательный: PI-RADS≤2 и шкала по Глисон ≥6.

Данные пороги были выбраны для дифференцировки доброкачественных и злокачественных случаев с рентгенологической точки зрения. Значение P менее 0,05 считалось статистически значимым.

Результаты.

Характеристика пациентов.

Были проанализированы данные МРТ органов малого таза, полученные у 35 пациентов, из которых у 8 был диагностирован рак предстательной железы, а у 27 – доброкачественная гиперплазия предстательной железы. Все пациенты прошли либо системную биопсию, либо совмещенную МРТ-ультразвуковую таргетную биопсию. Средний возраст пациентов составил 64.8 ± 6.45 лет (в диапазоне от 52 до 78 лет). Средний уровень ПСА был 9.33 ± 8.52 нг/мл, с колебаниями от 2.8 до 48 нг/мл. Подробные демографические и клинические данные пациентов представлены в таблице №2.

Вариабельность между наблюдателями и статистический анализ.

Результаты повторных оценок по шкале PI-RADS, проведенных шестью рентгенологами, подробно представлены в таблице №3. Каппа-статистика Козна (k) для специалистов была оценена и представлена в таблице №4. Чем ближе значение k к 1, тем более точное согласование между рентгенологами. Оценка k может быть интерпретирована следующим образом: $k < 0.20$ – крайне слабое согласие; $0.21 \leq k \leq 0.40$ – слабое согласие; $0.41 \leq k \leq 0.60$ – умеренное согласие; $0.61 \leq k \leq 0.80$ – значительное согласие; $0.81 \leq k \leq 1.00$ – почти идеальное согласие. В целом, согласие между рентгенологами в этом кон-

Таблица №2. Демографические и клинические характеристики пациентов.

Характеристика	Всего (n=35)	Рак предстательной железы (n=8)
Количество пациентов	35	8
Возраст (лет), средний	64.8 (52-78)	66.3 (62-78)
Уровень ПСА (нг/мл), средний	9.33 (2.8-48)	9.05 (4.9-14)
Объем предстательной железы (мл)	71.17 (24-177)	75.13 (49-105)
Оценка по Глиссону		8
6		4
7a		3
7b		1

Таблица №3. Результаты повторной оценки баллов по шкале PI-RADS.

Шкала PI-RADS	Рентгенолог 1	Рентгенолог 2	Рентгенолог 3	Рентгенолог 4	Рентгенолог 5	Рентгенолог 6
≤2	13	21	7	21	9	8
3	17	11	0	0	15	20
4	4	3	20	12	11	7
5	1	0	8	2	0	0

Таблица №4. Коэффициенты k для согласия между рентгенологами по версии PI-RADS 2.1.

Рентгенолог А	Рентгенолог В	Коэффициент k	Стандартная ошибка
1	2	0.070	0.136
1	3	0.030	0.075
1	4	0.057	0.101
1	5	0.005	0.121
1	6	0.163	0.137
2	3	0.037	0.081
2	4	0.158	0.131
2	5	0.123	0.121
2	6	0.228	0.127
3	4	0.163	0.123
3	5	0.071	0.099
3	6	-0.020	0.070
4	5	0.165	0.109
4	6	0.044	0.088
5	6	0.008	0.129
Среднее		0.087	0.110

k – коэффициент Каппа Коэна.

тексте варьировалось от плохого до слабого. В частности, для PI-RADS v2.1, медианное значение коэффициента k и стандартная ошибка для всех возможных пар читателей составили соответственно 0.087 и 0.110.

Корреляция оценки PI-RADS с гистологическими результатами.

Частота полученных МРТ-изображений и корреляций с гистологическими данными, исследованные шестью рентгенологами, по-

ричными, предполагая различные степени согласия или интерпретации. Также не было выявлено корреляции между оценками PI-RADS, выставленными рентгенологом 3 и ШГ. Таким образом, результаты демонстрируют разнообразие в согласованности интерпретаций рентгенологов относительно данных гистологического исследования.

В таблице №7 показатели эффективности шести рентгенологов при интерпретации

Таблица №5. Частота полученных МРТ-изображений и корреляций с гистологическими данными.						
Шкала Глисона	Рентгенолог 1	Рентгенолог 2	Рентгенолог 3	Рентгенолог 4	Рентгенолог 5	Рентгенолог 6
6	0,75	0,25	1	0,5	1	0,5
7a	1	1	0,33	0,33	1	1
7b	1	0	1	0	1	1

дробно представлены в таблице №5. В этом исследовании данные не соответствовали требованиям нормального распределения, поэтому для оценки корреляции между оценками PI-RADS, указанными шестью рентгенологами и оценками по шкале Глисона (ШГ), которые представляют собой результаты гистологического исследования, был использован коэффициент корреляции τ Кендалла (табл. №6). Средняя корреляция между оценками PI-RADS и ШГ была статистически незначимой и слабой ($t = 0.154$; $P = 0.549$), что

указывает на симметричную, но слабую связь. Наиболее значительная корреляция была выявлена между оценками PI-RADS, поставленными рентгенологом 7, и оценками по ШГ ($t = 0.751$; $P = 0.029$), что свидетельствует о сильной связи. Напротив, корреляции между оценками PI-RADS от наблюдателей 4 и 5 и ШГ были совершенно асиммет-

оценок PI-RADS. Было установлено, что рентгенолог 1 продемонстрировал наивысший AUC, равный 0.785, что свидетельствует о лучшей общей производительности в обнаружении рака предстательной железы. Рентгенологи 2 и 4 имели наивысший уровень точности (60.0%). Рентгенолог 5 достиг наивысшей чувствительности (100.0%). Рентгенологи 2 и 4 были отмечены за наивысшую специфичность (91.9%). Рисунок 2 дополняет эти данные, показывая ROC-кривые для каждого из шести рентгенологов, что позволяет сравнить их уровни диагностической эффективности и экспертности.

Обсуждение.

Ранее проводимые исследования подтвердили, что МРТ является основным методом диагностики рака предстательной железы [11-26]. Данное исследование направлено на оценку согласованности между рентгенологами по категории PI-RADS 3 с использованием PI-RADSv2.1. В данном исследовании шесть рентгенологов с различным уровнем опыта были приглашены для оценки мпМРТ предстательной железы в соответствии с руководством PI-RADSv2.1. Окончательная выборка включала тридцать пять пациентов с диагностированным PI-RADS 3 и с гистологическими результатами, которые были подвергнуты повторной оценке указанными специалистами. Для оценки согласованности между рентгенологами, все специалисты были лишены доступа к предыдущим протоколам мпМРТ, демографической информации пациентов, а также результатам морфологи-

Таблица №6. Коэффициенты t Кендалла для корреляции между оценками PI-RADS и оценками по Гли-сону.		
Наблюдатель	t	Значение P
1	0.342	0.311
2	0.154	0.655
3	0.000	1.000
4	-0.211	0.546
5	-0.115	0.752
6	0.751	0.029
Среднее	0.154	0.549
t – коэффициент корреляции Кендалла.		

ческого исследования. В целом, наблюдаемая согласованность между специалистами была низкой, однако это необязательно отражает влияние различий в уровне опыта на интерпретацию изображений. Категория PI-RADS 3 по-прежнему остаётся «серой зоной» в клинической практике как для рентгенологов, так и для урологов ввиду неопределённости наличия РПЖ. Согласно последним рекомендациям EAU 2024 года, частота выявления клинически значимого РПЖ (csPCa) на основе PI-RADS 3 составляет 16% [11].

В этом исследовании восемь пациентов были диагностированы с РПЖ на основе гистологических результатов, что составило

5. Другое исследование, проведенное Mussi и др. [17], включало большее количество исследователей с различным уровнем навыков в оценке по версии PI-RADS 2 (n=8), подробно рассматривая оцененные характеристики в переходной, периферической зоне и по категориям PI-RADS. Их результаты показали умеренное согласие среди восьми исследователей при выявлении PI-RADS 3 ($k = 0,38$), что позволило сделать вывод об улучшении общей межэкспертной согласованности с увеличением опыта.

Тем не менее, результаты данного исследования не подтвердили положительную корреляцию между опытом специалистов и

Таблица №7. Показатели эффективности шести рентгенологов при интерпретации оценок PI-RADS.

Наблюдатель	AUC (95% CI)	Точность (%)	PPV (%)	NPV (%)	Чувствительность (%)	Специфичность (%)
1	0.785 [0.301-0.687]	54.3	31.8	92.3	87.5	44.4
2	0.602 [0.315-0.718]	60.0	28.6	81.0	50.0	63.0
3	0.678 [0.294-0.678]	37.1	25.0	85.7	87.5	22.2
4	0.597 [0.301-0.708]	60.0	28.6	81.0	50.0	63.0
5	0.704 [0.296-0.708]	48.6	30.8	100.0	100.0	33.3
6	0.576 [0.322-0.706]	34.3	22.2	75.0	75.0	22.2

AUC – под кривой характеристики оператора; PPV – положительная прогностическая ценность; NPV – отрицательная прогностическая ценность.

23% от общей выборки исследования. Однако большинство из них имели рак с низким риском ШГ $\leq 7a$ (n=7, 87.5%). С выходом обновления системы оценки PI-RADS до версии 2.1 было указано, что многие системные ограничения были в значительной степени устранены и межнаблюдательная изменчивость улучшилась, особенно в отношении выявления изменений в переходной зоне [12–14]. Несмотря на хорошо изученные показатели согласованности между экспертами для версии PI-RADS 2, как указали Muller и др., Ке и др.), в исследованиях со значительными размерами выборки (n=95 и n=183 соответственно) и различным уровнем опыта рентгенологов, они пришли к выводу о умеренной межэкспертной надежности с коэффициентами согласия k в диапазоне от 0,46 до 0,51 [15, 16]. Однако их выборка включала пациентов со всеми категориями PI-RADS от 1 до

согласованностью по категории PI-RADS 3. Наивысший коэффициент согласия k составил 0,228, что указывает лишь на умеренное согласие между экспертом (специалист 2) и начинающим специалистом (специалист 6). Интересно, что специалист 6, несмотря на меньший опыт, также продемонстрировал наивысший коэффициент $t = 0,751$ ($P=0,029$), что указывает на значительную корреляцию между оценкой PI-RADS и патологическими результатами. Напротив, корреляция между оценками PI-RADS и ШГ у специалиста 4, хотя он и был высококвалифицированным, оказалась полностью асимметричной, что свидетельствует о различных уровнях согласия или интерпретации. Более того, не была обнаружена корреляция между оценками PI-RADS, выставленными рентгенологом с опытом работы (специалист 3), и ШГ, что демонстрирует потенциальные разногласия в

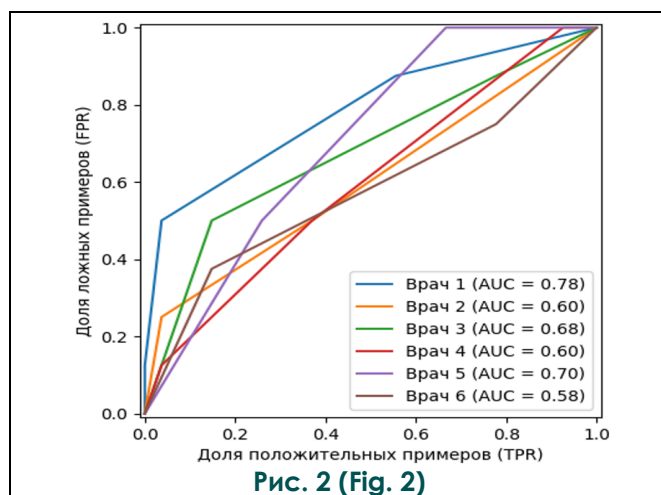


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Анализ ROC-кривых, сравнивающих диагностическую эффективность шести наблюдателей с различным уровнем опыта.

Fig. 2. ROC curves comparing the diagnostic performance of six readers with varying levels of expertise.

оценке степени тяжести гистологических изменений на основе результатов изображений. Средняя корреляция между оценками PI-RADS и гистологических результатов при выявлении рака предстательной железы была симметричной, но слабой, что подчеркивает неоднозначный характер категории PI-RADS 3. В исследовании, проведенном Mussi и др. [18], средняя положительность по результатам изображений и гистологических данных для оценок PI-RADS 3 среди восьми экспертов была значимой для выявления опухолей как в переходная зона, так и в транзиторная зона (соответственно 27,5% и 16,3%, $P < 0,001$); однако они полагались на стратегию оценивания по PI-RADS версии 2, а аналогичные результаты с использованием руководства PI-RADS версии 2.1 находятся на стадии изучения.

Экспертный рентгенолог (специалист 1) достиг наивысших значений AUC и PPV в дифференцировке доброкачественных и злокачественных образований; однако, эксперт не показал наивысших или наименьших показателей чувствительности, специфичности, точности и NPV. В отличие от него, начинающий специалист (специалист 6) продемонстрировал наихудшие результаты по AUC, точности, NPV и PPV среди всех экспертов, несмотря на лучшую корреляцию между результатами изображений и патологическими данными. Это расхождение может свидетельствовать о том, что менее опытные рентгенологи чаще склонны классифицировать образования как неопределённые, чтобы из-

бежать ошибки в диагнозе и неправильного лечения [19]. Тем не менее, данные, полученные в настоящем исследовании, указывают на то, что уровень опыта не оказал существенного влияния на диагностическую эффективность, что подчеркивает необходимость постоянного обучения менее опытных специалистов для повышения точности выявления РПЖ.

В PI-RADS версии 2.1 критерии для классификации поражений в переходной зоне как категории 3 были обновлены, чтобы позволить учитывать поражения с высокой интенсивностью сигнала с ДВИ 4 или 5 категории, несмотря на более низкую интенсивность сигнала категории 2 на T2-ВИ. Это изменение в критериях классификации облегчает потенциальное повышение категории поражения в соответствии с актуальными стандартами PI-RADS версии 2.1 по сравнению с предыдущей версией 2 [20]. Также это подчеркивает диагностический потенциал PI-RADSv2.1 по сравнению с версией 2, что предполагает необходимость более детального изучения клинических последствий использования PI-RADSv2.1, особенно в отношении некоторых проявлений вариантов МРТ, таких как вариант «узел в узле» [21].

В этом исследовании существует несколько ограничений. Признается, что большинство рентгенологов могут обнаружить более крупные и агрессивные РПЖ, что может исказить согласованность между экспертами и диагностическую эффективность [16]. Поэтому, в отличие от других исследований, решение включить только случаи с оценкой PI-RADS 3 кажется более справедливым для сравнения диагностических расхождений среди рентгенологов с разным уровнем опыта. Однако такой подход значительно уменьшил размер выборки. Кроме того, ретроспективный характер и выполнение исследования в одном центре не дают достаточно убедительных доказательств, особенно учитывая, что результаты этого исследования значительно отличаются от предыдущих в отношении опыта рентгенологов и диагностической эффективности [15–19]. Это может быть частично объяснено использованием рекомендаций PI-RADS версии 2 для классификации поражений и тем, что выборка не ограничивалась только пациентами с оценкой PI-RADS 3.

Ожидается, хотя и сложно, проведение крупных многоцентровых исследований для дальнейшей проверки клинической ценности оценки PI-RADS 3. Также в этом исследовании представлены только общие баллы PI-RADS, без учета отдельных зональных оце-

нок. Однако, учитывая сложные МРТ-изображения поражений, подозреваемых как PI-RADS 3, предложено, что есть потенциал для разработки таких моделей искусственного интеллекта (ИИ), как глубокое машинное обучение и продвинутые радиомические сети, для помощи в процессе принятия решений [22].

В недавнем исследовании Tamada и др. [23] были оценены согласованность между экспертами и диагностический потенциал би-параметрической МРТ (бпМРТ) без применения динамического контрастирования, с использованием руководства PI-RADS версии 2.1. В исследовании участвовали три эксперта с 165 подозрительными случаями, и были получены коэффициенты согласия k 0,642 для бпМРТ и 0,644 для мпМРТ, что свидетельствует о существенной согласованности между экспертами. У двух экспертов AUC для бпМРТ была выше, чем для мпМРТ, со статистически значимой разницей (0,823 против 0,785, $P = 0,035$, и 0,828 против 0,773, $P = 0,002$ соответственно), что позволяет заключить, что согласованность между экспертами и диагностические показатели бпМРТ в выявлении cсРСа сравнимы с мпМРТ. Несмотря на недостаток убедительных доказательств, это послужило основой для будущих исследований с целью уточнить потенциал использования бпМРТ в оценке категорий PI-RADS 3, направленных на более быстрый и бюджетный процесс сканирования с уменьшением риска нефрогенного системного фиброза.

Заключение.

Список литературы:

1. Taïtt HE. Global Trends and Prostate Cancer: A Review of Incidence, Detection, and Mortality as Influenced by Race, Ethnicity, and Geographic Location. *American journal of men's health*. 2018;12(6):1807-23. <https://doi.org/10.1177/1557988318798279>.
2. Mottet N, van den Bergh RCN, Briers E, Van den Broeck T, Cumberbatch MG, De Santis M, et al. EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG Guidelines on Prostate Cancer-2020 Update. Part 1: Screening, Diagnosis, and Local Treatment with Curative Intent. *Eur Urol*. 2021;79(2):243-62. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2020.09.042>.
3. Manfredi C, Fernández-Pascual E, Arcaniolo D, Emberton M, Sanchez-Salas R, Artigas Guix C, et al. The Role of Prostate-specific Membrane Antigen Positron Emission Tomography/Magnetic Resonance Imaging in Primary and Recurrent Prostate Cancer: A Systematic Review of the Literature. *European urology focus*. 2022;8(4):942-57. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2021.08.013>.
4. Turkbey B, Rosenkrantz AB, Haider MA, Padhani AR, Villeirs G, Macura KJ, et al. Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2.1: 2019 Update of Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2. *Eur Urol*. 2019;76(3):340-51. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2019.02.033>.
5. He M, Cao Y, Chi C, Yang X, Ramin R, Wang S, et al. Research progress on deep learning in magnetic resonance imaging-based diagnosis and treatment of prostate cancer: a review on the current status and perspectives. *Front Oncol*. 2023;13:1189370. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1189370>.
6. Westphalen AC, McCulloch CE, Anaokar JM, Arora S, Barashi NS, Barentsz JO, et al. Variability of the Positive Predictive Value of PI-RADS for Prostate MRI across 26 Centers: Experience of the Society of Abdominal Radiology Prostate Cancer Disease-focused Panel. *Radiology*. 2020;296(1):76-84. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020190646>.
7. Smith CP, Harmon SA, Barrett T, Bittencourt LK, Law YM, Shebel H, et al. Intra- and interreader reproducibility of PI-RADSv2: A multireader study. *Journal of magnetic resonance imaging* : JMRI. 2019;49(6):1694-703.

Прогностическая ценность опыта рентгенолога в интерпретации данных мультипараметрической МРТ предстательной железы по версии PI-RADS 2.1 была следующая:

Шесть рентгенологов с разным уровнем опыта при использовании руководства PI-RADS версии 2.1 продемонстрировали степень межэкспертной согласованности от низкой до удовлетворительной. Различия в уровне опыта не оказали существенного влияния на точность определений по категории PI-RADS 3. Это свидетельствует о том, что, несмотря на обновления в руководстве PI-RADS версии 2.1, остаются проблемы с интерпретацией данных, что приводит к снижению диагностической точности. Это может усложнить процессы принятия решений в клинической практике, что делает необходимым разработку дополнительных инструментов или стратегий для повышения прогностической ценности и надежности оценок PI-RADS 3. Таким образом, будущие исследования могут основываться на этих результатах, используя более крупные и разнообразные популяции пациентов, а также изучать влияние таких новых технологий и методов, как технологии глубокого обучения при анализе мпМРТ с выставлением оценок PI-RADS и последующее ведение пациентов с РПЖ.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

<https://doi.org/10.1002/jmri.26555>.

8. Annamalai A, Fustok JN, Beltran-Perez J, Rashad AT, Krane LS, Triche BL. Interobserver Agreement and Accuracy in Interpreting mpMRI of the Prostate: a Systematic Review. *Current urology reports*. 2022;23(1):1-10. <https://doi.org/10.1007/s11934-022-01084-y>.

9. Schoots IG. MRI in early prostate cancer detection: how to manage indeterminate or equivocal PI-RADS 3 lesions? *Translational andrology and urology*. 2018;7(1):70-82. <https://doi.org/10.21037/tau.2017.12.31>.

10. Giambelluca D, Cannella R, Vernuccio F, Comelli A, Pavone A, Salvaggio L, et al. PI-RADS 3 Lesions: Role of Prostate MRI Texture Analysis in the Identification of Prostate Cancer. *Current problems in diagnostic radiology*. 2021;50(2):175-85. <https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2019.10.009>.

11. EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress Milan 2023. ISBN 978-94-92671-19-6.

12. Byun J, Park KJ, Kim MH, Kim JK. Direct Comparison of PI-RADS Version 2 and 2.1 in Transition Zone Lesions for Detection of Prostate Cancer: Preliminary Experience. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2020;52(2):577-86. <https://doi.org/10.1002/jmri.27080>.

13. Purysko AS, Rosenkrantz AB, Turkbey IB, Macura KJ. RadioGraphics Update: PI-RADS Version 2.1-A Pictorial Update. *Radiographics*. 2020;40(7):E33-e7. <https://doi.org/10.1148/rg.2020190207>.

14. Tamada T, Kido A, Takeuchi M, Yamamoto A, Miyaji Y, Kanomata N, et al. Comparison of PI-RADS version 2 and PI-RADS version 2.1 for the detection of transition zone prostate cancer. *Eur J Radiol*. 2019;121:108704. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.108704>.

15. Muller BG, Shih JH, Sankineni S, Marko J, Rais-Bahrami S, George AK, et al. Prostate Cancer: Interobserver Agreement and Accuracy with the Revised Prostate Imaging Reporting and Data System at Multiparametric MR Imaging. *Radiology*. 2015;277(3):741-50. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015142818>.

16. Ke Z, Wang L, Min XD, Feng ZY, Kang Z, Zhang PP, et al. Diagnostic Performance and Interobserver Consistency of the Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2: A Study on Six Prostate Radiologists with Different Experiences from Half a Year to 17 Years. *Chinese medical journal*. 2018;131(14):1666-73. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.235872>.

17. Mussi TC, Yamauchi FI, Tridente CF, Tachibana A, Tonso VM, Recchimuzzi DZ, et al. Interobserver agreement of PI-RADS v. 2 lexicon among radiologists with different levels of experience. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2020;51(2):593-602. <https://doi.org/10.1002/jmri.26882>.

18. Mussi TC, Yamauchi FI, Tridente CF, Tachibana A, Tonso VM, Recchimuzzi DR, et al. Interobserver Agreement and Positivity of PI-RADS Version 2 Among Radiologists with Different Levels of Experience. *Academic radiology*. 2019;26(8):1017-22. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2018.08.013>.

19. Greer MD, Brown AM, Shih JH, Summers RM, Marko J, Law YM, et al. Accuracy and agreement of PIRADSv2 for prostate cancer mpMRI: A multireader study. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2017;45(2):579-85. <https://doi.org/10.1002/jmri.25372>.

20. Walker SM, Mehralivand S, Harmon SA, Sanford T, Merino MJ, Wood BJ, et al. Prospective Evaluation of PI-RADS Version 2.1 for Prostate Cancer Detection. *AJR American journal of roentgenology*. 2020;215(5):1098-103. <https://doi.org/10.2214/ajr.19.22679>.

21. Sun M, Xu L, Zhang X, Cao L, Chen W, Liu K, et al. PI-RADS v2.1 evaluation of prostate "nodule in nodule" variants: clinical, imaging, and pathological features. *Insights into imaging*. 2024;15(1):79. <https://doi.org/10.1186/s13244-024-01651-6>.

22. Turkbey B, Purysko AS. PI-RADS: Where Next? *Radiology*. 2023;307(5):e223128. <https://doi.org/10.1148/radiol.223128>.

23. Tamada T, Kido A, Yamamoto A, Takeuchi M, Miyaji Y, Moriya T, et al. Comparison of Biparametric and Multiparametric MRI for Clinically Significant Prostate Cancer Detection With PI-RADS Version 2.1. *J Magn Reson Imaging*. 2021;53(1):283-91. <https://doi.org/10.1002/jmri.27283>.

24. Тальшинский А.Э., Камышанская И.Г., Крючкова О.В., Бахтиозин Р.Ф., Пашковская А.А. Применение глубокого обучения для автоматизированного контурирования предстательной железы по данным магнитно-резонансной томографии: промежуточные результаты. *REJR*. 2024; 14(4):179-188. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-179-188.

25. Коссов Ф.А., Олимов Б.П., Ахвердиева Г.И., Камолов Б.Ш., Абдуллин И.И., Панов В.О., Тарачкова Е.В., Тюрин И.Е., Буйденко Ю.В. Современные возможности лучевой диагностики рака предстательной железы. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2017; 98 (6): 327–36. DOI: 10.20862/0042-4676-2017-98-6-327-336

26. Andreas G. Wibmer, Hebert Alberto Vargas, Hedvig Hricak. Granulomatous prostatitis mimicking prostate cancer on magnetic resonance imaging: report of two cases. *REJR*. 2017; 7 (2):153-157. DOI:10.21569/2222-7415-2017-7-2-153-157.

References:

1. Taitt HE. Global Trends and Prostate Cancer: A Review of Incidence, Detection, and Mortality as Influenced by Race, Ethnicity, and Geographic Location. *American journal of men's health*. 2018;12(6):1807-23. <https://doi.org/10.1177/1557988318798279>.

2. Mottet N, van den Bergh RCN, Briers E, Van den Broeck T, Cumberbatch MG, De Santis M, et al. EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG Guidelines on Prostate Cancer-2020 Update. Part 1: Screening, Diagnosis, and Local Treatment with Curative

Intent. *Eur Urol*. 2021;79(2):243-62. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2020.09.042>.

3. Manfredi C, Fernández-Pascual E, Arcaniolo D, Emberton M, Sanchez-Salas R, Artigas Guix C, et al. The Role of Prostate-specific Membrane Antigen Positron Emission Tomography/Magnetic Resonance Imaging in Primary and Recurrent Prostate Cancer: A Systematic Review of the Literature. *European urology focus*. 2022;8(4):942-57. <https://doi.org/10.1016/j.euf.2021.08.013>.

4. Turkbey B, Rosenkrantz AB, Haider MA, Padhani AR, Villeirs G, Macura KJ, et al. Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2.1: 2019 Update of Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2. *Eur Urol*. 2019;76(3):340-51. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2019.02.033>.
5. He M, Cao Y, Chi C, Yang X, Ramin R, Wang S, et al. Research progress on deep learning in magnetic resonance imaging-based diagnosis and treatment of prostate cancer: a review on the current status and perspectives. *Front Oncol*. 2023;13:1189370. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1189370>.
6. Westphalen AC, McCulloch CE, Anaokar JM, Arora S, Barashi NS, Barentsz JO, et al. Variability of the Positive Predictive Value of PI-RADS for Prostate MRI across 26 Centers: Experience of the Society of Abdominal Radiology Prostate Cancer Disease-focused Panel. *Radiology*. 2020;296(1):76-84. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020190646>.
7. Smith CP, Harmon SA, Barrett T, Bittencourt LK, Law YM, Shebel H, et al. Intra- and interreader reproducibility of PI-RADSv2: A multireader study. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2019;49(6):1694-703. <https://doi.org/10.1002/jmri.26555>.
8. Annamalai A, Fustok JN, Beltran-Perez J, Rashad AT, Krane LS, Triche BL. Interobserver Agreement and Accuracy in Interpreting mpMRI of the Prostate: a Systematic Review. *Current urology reports*. 2022;23(1):1-10. <https://doi.org/10.1007/s11934-022-01084-y>.
9. Schoots IG. MRI in early prostate cancer detection: how to manage indeterminate or equivocal PI-RADS 3 lesions? *Translational andrology and urology*. 2018;7(1):70-82. <https://doi.org/10.21037/tau.2017.12.31>.
10. Giambelluca D, Cannella R, Vernuccio F, Comelli A, Pavone A, Salvaggio L, et al. PI-RADS 3 Lesions: Role of Prostate MRI Texture Analysis in the Identification of Prostate Cancer. *Current problems in diagnostic radiology*. 2021;50(2):175-85. <https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2019.10.009>.
11. EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress Milan 2023. ISBN 978-94-92671-19-6.
12. Byun J, Park KJ, Kim MH, Kim JK. Direct Comparison of PI-RADS Version 2 and 2.1 in Transition Zone Lesions for Detection of Prostate Cancer: Preliminary Experience. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2020;52(2):577-86. <https://doi.org/10.1002/jmri.27080>.
13. Purysko AS, Rosenkrantz AB, Turkbey IB, Macura KJ. RadioGraphics Update: PI-RADS Version 2.1-A Pictorial Update. *Radiographics*. 2020;40(7):E33-e7. <https://doi.org/10.1148/rg.2020190207>.
14. Tamada T, Kido A, Takeuchi M, Yamamoto A, Miyaji Y, Kanomata N, et al. Comparison of PI-RADS version 2 and PI-RADS version 2.1 for the detection of transition zone prostate cancer. *Eur J Radiol*. 2019;121:108704. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.108704>.
15. Muller BG, Shih JH, Sankineni S, Marko J, Rais-Bahrami S, George AK, et al. Prostate Cancer: Interobserver Agreement and Accuracy with the Revised Prostate Imaging Reporting and Data System at Multiparametric MR Imaging. *Radiology*. 2015;277(3):741-50. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015142818>.
16. Ke Z, Wang L, Min XD, Feng ZY, Kang Z, Zhang PP, et al. Diagnostic Performance and Interobserver Consistency of the Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2: A Study on Six Prostate Radiologists with Different Experiences from Half a Year to 17 Years. *Chinese medical journal*. 2018;131(14):1666-73. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.235872>.
17. Mussi TC, Yamauchi FI, Tridente CF, Tachibana A, Tonso VM, Recchimuzzi DZ, et al. Interobserver agreement of PI-RADS v. 2 lexicon among radiologists with different levels of experience. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2020;51(2):593-602. <https://doi.org/10.1002/jmri.26882>.
18. Mussi TC, Yamauchi FI, Tridente CF, Tachibana A, Tonso VM, Recchimuzzi DR, et al. Interobserver Agreement and Positivity of PI-RADS Version 2 Among Radiologists with Different Levels of Experience. *Academic radiology*. 2019;26(8):1017-22. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2018.08.013>.
19. Greer MD, Brown AM, Shih JH, Summers RM, Marko J, Law YM, et al. Accuracy and agreement of PIRADSv2 for prostate cancer mpMRI: A multireader study. *Journal of magnetic resonance imaging : JMRI*. 2017;45(2):579-85. <https://doi.org/10.1002/jmri.25372>.
20. Walker SM, Mehralivand S, Harmon SA, Sanford T, Merino MJ, Wood BJ, et al. Prospective Evaluation of PI-RADS Version 2.1 for Prostate Cancer Detection. *AJR American journal of roentgenology*. 2020;215(5):1098-103. <https://doi.org/10.2214/ajr.19.22679>.
21. Sun M, Xu L, Zhang X, Cao L, Chen W, Liu K, et al. PI-RADS v2.1 evaluation of prostate "nodule in nodule" variants: clinical, imaging, and pathological features. *Insights into imaging*. 2024;15(1):79. <https://doi.org/10.1186/s13244-024-01651-6>.
22. Turkbey B, Purysko AS. PI-RADS: Where Next? *Radiology*. 2023;307(5):e223128. <https://doi.org/10.1148/radiol.223128>.
23. Tamada T, Kido A, Yamamoto A, Takeuchi M, Miyaji Y, Moriya T, et al. Comparison of Biparametric and Multiparametric MRI for Clinically Significant Prostate Cancer Detection With PI-RADS Version 2.1. *J Magn Reson Imaging*. 2021;53(1):283-91. <https://doi.org/10.1002/jmri.27283>.
24. Talishinskii A.E., Kamyshanskaya I.G., Kryuchkova O.V., Bakhtiozin R.F., Pashkovskaya A.A. Application of deep learning for automated prostate contouring on magnetic resonance imaging data: preliminary results. *REJR*. 2024; 14(4):179-188. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-4-179-188 (in Russian).
25. Kossov F.A., Olimov B.P., Akhverdieva G.I., Kamolov B.Sh., Abdullin I.I., Panov V.O., Tarachkova E.V., Tyurin I.E., Buidenok Yu.V. Modern Possibilities of Radiation Diagnostics of Prostate Cancer. *Bulletin of Roentgenology and Radiology*. 2017; 98 (6): 327-36. DOI: 10.20862/0042-4676-2017-98-6-327-336 (in Russian).
26. Wibmer Andreas G., Vargas Hebert Alberto, Hricak Hedvig. Granulomatous prostatitis mimicking prostate cancer on magnetic resonance imaging: report of two cases. *REJR*. 2017; 7 (2):153-157. DOI:10.21569/2222-7415-2017-7-2-153-157.

ПАЛЛИАТИВНАЯ СЕЛЕКТИВНАЯ ЭМБОЛИЗАЦИЯ ПОЧЕЧНЫХ АРТЕРИЙ
ПРИ НЕРЕЗЕКТАБЕЛЬНЫХ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ ОПУХОЛЯХ ПОЧКИКондрашин С.А.¹, Кобликов В.В.¹, Сорокин Н.И.²

1 – ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский университет), г. Москва, Россия.

2 – МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет фундаментальной медицины, г. Москва, Россия.

Злокачественные новообразования почек являются актуальной проблемой современной онкоурологии. В РФ в 2023 году численность больных с раком почки на 100 тыс. населения составила 140,4. Пациенты с III-IV стадией заболевания выявлены в 26,7% случаев, летальность в течение года после установления диагноза достигает 12,5%. Паллиативная селективная эмболизация позволяет уменьшить объем опухоли, добиться облегчения боли и выраженности гематурии при невозможности выполнения хирургического вмешательства (неоперабельная опухоль или тяжелое состояние пациента).

Цель исследования. Оценка эффективности трансартериальной селективной эмболизации почечной артерии у пациентов с рецидивирующей макрогематурией при неоперабельной опухоли почки.

Материалы и методы. В 2003-2022 годах в рентгенодиагностическом отделении Первого МГМУ им. И.М. Сеченова селективная эмболизация по поводу неоперабельной опухоли почки выполнена 18 пациентам (14 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 54 до 95 лет ($M_{sp}=71,2\pm7,2$ лет). Все опухоли единичные, размеры их составили $8,9\pm1,7$ см. По классификации TNM 2017 стадия III была в 12 случаях (66,7%), IV стадия – у 6 пациентов (33,3%). В 8 случаях (44,4%) имелась анатомически единственная почка. Во всех случаях эмболизацию проводили по поводу гематурии различной степени тяжести. После вмешательства пациенты получали таргетную терапию.

Первичная диагностика злокачественной опухоли почки осуществлялась при УЗИ, далее для определения распространенности образования (наличие метастазов) применяли мультифазную КТ почек. После селективной эмболизации почечных артерий пациенты наблюдались у онкологов, состояние оперированных органов оценивали при помощи УЗИ и 4-х фазной КТ почек.

Результаты. При первичной эмболизации почечное кровотечение остановлено во всех случаях. У 12 (66,7%) пациентов повторно выполняли эмболизацию из-за рецидива кровотечения, в 6 (33,3%) – трижды в связи с прогрессированием процесса по данным контрольного лучевого обследования или возобновления макрогематурии. Всего проведено 42 эндоваскулярные операции. Уровень гемоглобина перед эмболизацией варьировал от 82 до 114 г/л ($M_{sp}=94,7\pm8,4$ г/л), в 5 случаях (27,8%) для стабилизации состояния проведено переливание крови. Сроки повторных вмешательств колебались от 2 до 63 месяцев. Постэмболизационный синдром наблюдался у 2 пациентов после тотальной эмболизации почечной артерии. Гематурия была у всех пациентов, болевой синдром наблюдался в 4 случаях (22,2%). Сохранить после селективной эмболизации более 30% неповрежденной паренхимы почек удалось у 16 пациентов (88,9%). Соматическое состояние пациентов с III-IV стадией злокачественной опухоли не позволило выполнить радикальную нефрэктомия у всех больных. 1-летняя выживаемость после селективной эмболизации опухоли почки составила 88,9%, 3-летняя – 55,6%, 5-летняя – 16,7%.

Обсуждение. При неоперабельных опухолях почек и жизнеугрожающей гематурии, по нашим данным, селективная окклюзия почечных артерий позволила в 100% наблюдений остановить кровотечение. Она показана в случаях прорастания в вены почечно-клеточной карциномы большого объема и неоперабельной опухоли с массивной гематурией, сильной локальной боли из-за опухоли. Наши результаты на небольшой когорте подобных пациентов подтверждают перспективность подобных вмешательств – 1-летняя выживаемость почки составила 88,9%, 3-летняя – 55,6%, 5-летняя – 16,7%. В 90,5% случаев при селективной эмболизации использование эмболов диаметром 500-700 мк и спиралей 0,035", эмболов диаметром 300-500 мк и микро-спиралей 0,018" позволяет надежно перекрыть кровоснабжение опухоли и сохранить максимальное количество функционирующей паренхимы.

Заключение. В случае невозможности выполнения органосохраняющей операции у больных неоперабельной опухолью почки, сопровождающейся выраженной клинической симптоматикой (боль, тотальная макрогематурия), по жизненным показаниям целесообразно проведение селективной эмболизации питающих опухоль ветвей почечной артерии с максимальным сохранением непораженной паренхимы почки.

Ключевые слова: нерезектабельный рак почки III-IV стадии, паллиативная эмболизация, селективная эмболизация, выживаемость.

Контактный автор: Кондрашин С.А. e-mail: kondrashin_s_a@staff.sechenov.ru

Для цитирования: Кондрашин С.А., Кобликов В.В., Сорокин Н.И. Паллиативная селективная эмболизация почечных артерий при нерезектабельных злокачественных опухолях почки. REJR 2026; 16(1):150-157. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-150-157.

Статья получена: 09.09.25

Статья принята: 12.10.25

PALLIATIVE SELECTIVE EMBOLIZATION OF THE RENAL ARTERIES IN MALIGNANT UNRESECTABLE RENAL TUMORS

Kondrashin S.A.¹, Koblikov V.V.¹, Sorokin N.I.²

1 – Sechenov University. Moscow, Russia.

2 – Faculty of Fundamental Medicine, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russia.

Purpose. To evaluate the effectiveness of transarterial selective embolization of the renal artery in patients with recurrent macrohematuria in inoperable kidney tumors.
Materials and methods. In 2003-2022, in the radiological diagnostic department of Sechenov University, selective embolization for an inoperable kidney tumor was performed in 18 patients (14 men and 4 women) aged from 54 to 95 years ($M=71.2\pm7.2$ years). All tumors were isolated, their size was 8.9 ± 1.7 cm. According to the TNM 2017 classification, stage III was in 12 cases (66.7%), stage IV in 6 patients (33.3%). In 8 cases, there was an anatomically single kidney. In all cases, embolization was performed for hematuria of varying severity. After the intervention, the patients received targeted therapy.

The primary diagnosis of a malignant kidney tumor was performed by ultrasound, and then MSCT of the kidneys was used to determine the process expansion (presence of metastases). After selective embolization of the renal arteries, patients were observed by oncologists, the condition of the operated organs was assessed using ultrasound and 4-phase CT of the kidneys.

Results. During primary embolization, renal bleeding was stopped in all cases. Repeat embolization was performed in 12 patients (66.7%) due to recurrent bleeding, and in 6 patients (33.3%), it was performed three times due to bleeding progression according to control radiographic examination or macrohematuria recurrence. A total of 42 endovascular procedures were performed. Hemoglobin levels before embolization ranged from 82 to 114 g/L ($M_{hg} = 94.7 \pm 8.4$ g/L), and blood transfusions were administered to stabilize the patient's condition in 5 cases (27.8%). The duration of repeat interventions ranged from 2 to 63 months. Post-embolization syndrome was observed in 2 patients after total renal artery embolization. Hematuria was present in all patients, and pain was observed in 4 cases (22.2%). After selective embolization, more than 30% of unaffected renal parenchyma was preserved in 16 patients (88.9%). The somatic condition of patients with stage III-IV malignant tumors did not allow radical nephrectomy to be performed in all patients. The 1-year survival rate after selective embolization of kidney tumors was 88.9%, 3-year – 55.6%, 5-year – 16.7%.

Discussion. In inoperable renal tumors with life-threatening hematuria, according to our data, selective renal artery occlusion allowed us to stop bleeding in 100% of cases. It is indicated in cases of large-volume renal cell carcinoma invading the veins and inoperable tumors with massive hematuria and severe local pain due to the tumor. Our results in a small cohort of similar patients confirm the perspectives of such interventions: 1-year kidney survival was 88.9%, 3-year – 55.6%, 5-year – 16.7%. In 90.5% of cases, during selective embolization, the use of emboli with a diameter of

500-700 μm and 0.035" coils, emboli with a diameter of 300-500 μm and 0.018" microcoils allows us to reliably block the blood supply to the tumor and preserve the maximum amount of functioning parenchyma.

Conclusion. If it is impossible to perform organ-preserving surgery in patients with an inoperable kidney tumor accompanied by pronounced clinical symptoms (pain, total macrohematuria), according to vital indications, it is advisable to perform selective embolization of the branches of the renal artery feeding the tumor with maximum preservation of the unaffected renal parenchyma.

Keywords: unresectable stage III-IV kidney cancer, palliative embolization, selective embolization, survival rate.

Corresponding author: Kondrashin S.A. e-mail: kondrashin_s_a@staff.sechenov.ru

For citation: Kondrashin S.A., Koblikov V.V., Sorokin N.I. Palliative selective embolization of the renal arteries in malignant unresectable renal tumors. REJR 2026; 16(1):150-157. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-150-157.

Received: 09.09.25

Accepted: 12.10.25

Злокачественные новообразования почек являются актуальной проблемой современной онкоурологии. В РФ в 2023 году численность больных с раком почки на 100 тыс. населения составила 140,4 [1], в 2024 году рак почки впервые выявлен у 15158 человек с ежегодным ростом 1,25% [2]. Пациенты с III-IV стадией заболевания выявлены в 26,7% случаев, летальность в течение года после установления диагноза достигает 12,5% [1]. Паллиативная селективная эмболизация позволяет уменьшить объем опухоли, добиться облегчения боли и выраженности гематурии при невозможности выполнения хирургического вмешательства (неоперабельная опухоль или тяжелое состояние пациента) [3-7].

Цель исследования.

Оценить результаты трансартериальной селективной эмболизации почечной артерии у пациентов с рецидивирующей макрогематурией при неоперабельной опухоли почки.

Материалы и методы.

В 2003-2022 годах в рентгенодиагностическом отделении Первого МГМУ им. И.М. Сеченова селективная эмболизация по поводу неоперабельной опухоли почки выполнена 18 пациентам (14 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 54 до 95 лет ($M_{cp}=71,2\pm7,2$ лет). Все опухоли единичные, размеры их составили $8,9\pm1,7$ см. По классификации TNM 2017 III стадия была в 12 случаях (66,7%), IV стадия – у 6 пациентов (33,3%). В 8 случаях (44,4%) имелась анатомически единственная почка.

Опухоли в 10 случаях располагались в правой почке, в 8 наблюдениях слева. Локализовались они в различных сегментах, в половине наблюдений распространялись на со-

седний сегмент. Для селективной эмболизации опухолей использовали феморальный или лучевой доступы, катетеры стандартной конфигурации 5-6 Ф, микрокатетеры 2,4-2,8 Ф. Всего 18 пациентам проведено 42 эндоваскулярные операции, в 12 случаях – дважды, в 6 наблюдениях – трижды. В качестве эмболизирующего материала в 4 случаях (9,5%) применяли эмболы диаметром 300-500 мк и 5-8 мл ультразвуждкого липиодола, в 20 наблюдениях (47,6%) эмболы диаметром 500-700 мк и спирали 0,035" и в 18 вмешательствах (42,9%) эмболы диаметром 300-500 мк и микроспираль 0,018". Во всех случаях эмболизацию проводили по поводу гематурии различной степени тяжести. После вмешательства пациенты получали таргетную терапию.

Первичная диагностика злокачественной опухоли почки осуществлялась при УЗИ, дальше для определения распространенности образования (наличие метастазов) применяли мультифазную КТ почек [8]. После селективной эмболизации почечных артерий пациенты наблюдались у онкологов, состояние оперированных органов оценивали при помощи УЗИ и 4-х фазной КТ почек.

Результаты.

При первичной эмболизации почечное кровотечение остановлено во всех 18 случаях. У 12 пациентов (66,7%) повторно выполняли эмболизацию из-за рецидива кровотечения, в 6 наблюдениях (33,3%) – трижды в связи с прогрессированием процесса по данным контрольного лучевого обследования или возобновления макрогематурии. По данным контрольного обследования через 2 месяца после операции объем первичной опухоли почки уменьшился на 18%. После повторной



Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Контрольная ангиография после эмболизации, спирали и микроспирали в сегментарных артериях (стрелки), питающих новообразование.

Пациент Г. 66 л., рак единственной левой почки. Третья селективная эмболизация через 16 месяцев после начала эндоваскулярного лечения рецидивирующего почечного кровотечения. Максимальное сохранение неповрежденной паренхимы почки.

Fig. 1. Control arteriography after embolization, coils and microcoils in the segmental arteries (arrows) feeding the tumor.

Patient G. 66 yr, cancer of the left kidney. Third selective embolization 16 months after the start of endovascular treatment for recurrent renal bleeding. Maximum preservation of the intact renal parenchyma.

селективной эмболизации размеры опухоли были стабильными. Уровень гемоглобина перед эмболизацией варьировал от 82 до 114 г/л ($M_{cp}=94,7 \pm 8,4$ г/л), в 5 случаях (27,8%) перед операцией проведено переливание крови. Сроки повторных вмешательств колебались от 2 до 63 месяцев. Постэмболизационный синдром наблюдался у 2 пациентов после субтотальной эмболизации почечной артерии. Сохранить после селективной эмболизации более 30% неповрежденной паренхимы почек удалось у 16 пациентов (88,9%). До операции выраженная гематурия была у всех пациентов, болевой синдром наблюдался в 4 случаях (22,2%). Соматическое состояние пациентов с III-IV стадией злокачественной опухоли не позволило выполнить радикальную нефрэктомия у всех больных.

В одном наблюдении одномоментно с эмболизацией опухоли правой почки выполнили стентирование левой почечной артерии при гемодинамически значимом стенозе (80%). В 2 наблюдениях после селективной эмболизации дополнительно провели радиочастотную абляцию опухоли. В 16 из 18 случаев (88,9%) удалось выполнить селективную эмболизацию питающих опухоль артерий и максимально сохранить неповрежденную паренхиму почки (рис. 1).

1-летняя выживаемость после селективной эмболизации опухоли почки составила 88,9%, 3-летняя – 55,6%, 5-летняя – 16,7%.

Клиническое наблюдение.

Пациент Р., 72 лет, поступил в клинику урологии ПМГМУ им. И.М. Сеченова в феврале 2011 года с жалобами на макрогематурию. При обследовании выявлена опухоль правой почки размерами 12x10 см, тромб в нижней полой вене. Решено выполнить суперселективную эмболизацию опухоли. 28.02.2011 г. операция – ангиография правой почки. Селективная эмболизация правой почки. Контрольная ангиография правой почки. Н-каваграфия. Результаты вмешательства представлены на рис. 2. В послеоперационном периоде макрогематурия прекратилась.

Через 6 месяцев пациент снова отметил появление макрогематурии. При КТ органов грудной полости в 6-м сегменте правого легкого определяется гиперденное образование неправильной формы – метастаз первичной опухоли (рис. 3), при МСКТ с контрастированием в нижней полой вене признаков опухолевого тромба нет, в нижнем и среднем сегментах образования округлой формы костной плотности (липидол), верхний сегмент почки функционирует.

01.09.2011 г. операция – ангиография правой почки. Селективная эмболизация правой почки. Контрольная ангиография правой почки. Результаты вмешательства представлены на рис. 4. В послеоперационном периоде макрогематурия прекратилась.

Послеоперационный протекал без особенностей. Пациент продолжал работать. Через 22 месяца после второй эмболизации пациент отметил эпизод тотальной гематурии, обратился в клинику для дообследования и лечения. После лучевого обследования принято решение о проведении ангиографии правой почки с возможной эмболизацией почечной артерии.

17.07.2013 г. операция – ангиография правой почки. Трансрадиальная селективная эмболизация правой почечной арте-

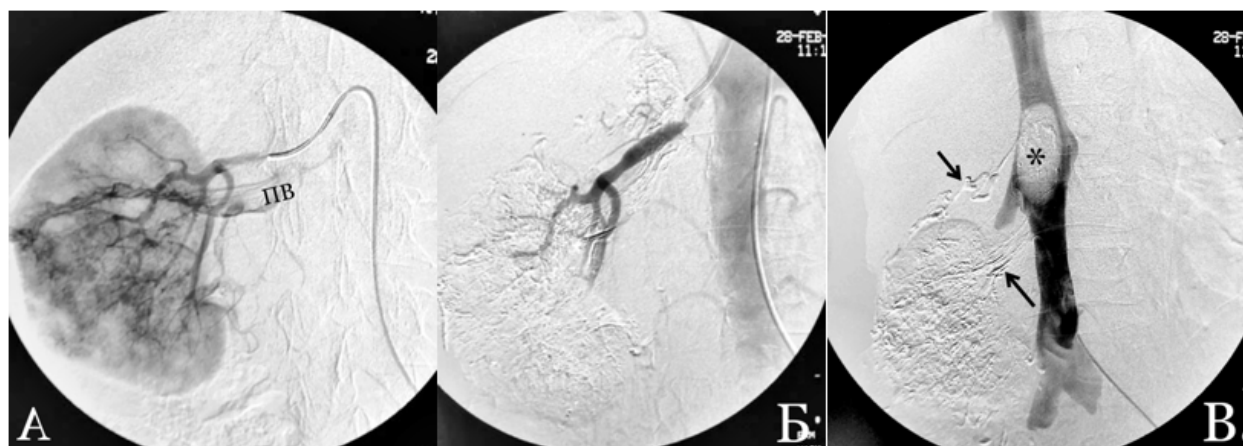


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Эмболизация правой почки.

А – селективная артериография правой почки, артериальная фаза. В нижнем и среднем полюсах определяется васкуляризированное объемное образование ~ 12х10 см, ранний сброс в почечную вену (ПВ). Б – артериография после эмболизации. Определяется заполнение опухолевых сосудов липиодолом и ПВА, заполняются только проксимальные отделы сегментарных артерий. В – нижняя каваграфия. В полую вену определяется дефект контрастирования овальной формы (*) – тромб. Видно накопление липиодола в почечной и надпочечниковой венах (стрелки), он также определяется в тромбе.

Fig. 2. Embolization of the right kidney.

A – selective arteriography of the right kidney: arterial phase. A vascularized mass ~ 12x10 cm, early discharge into the renal vein (PV) is determined in the lower and middle poles. B – arteriography after embolization, the filling of tumor vessels with lipiodol and PVA is determined, only the proximal sections of the segmental arteries are filled. C – inferior cavagraphy: an oval-shaped contrast defect (*) is detected in the vena cava – a blood clot. Accumulation of lipiodol in the renal and adrenal veins is visible (arrows), it is also detected within the blood clot.

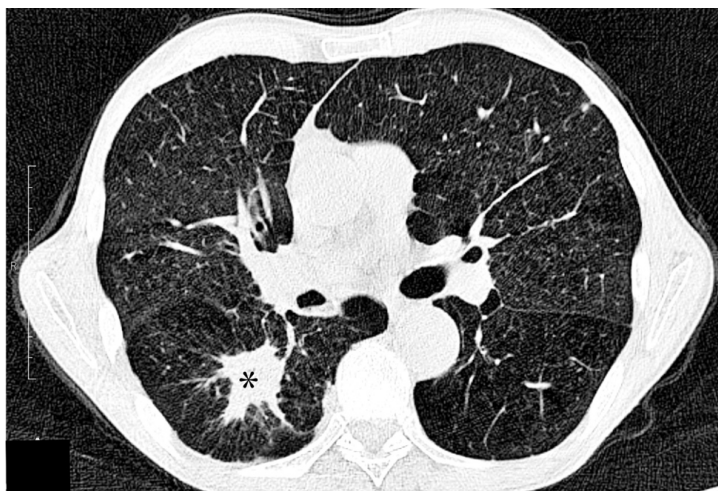


Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. КТ органов грудной полости.

Состояние через 6 месяцев после суперселективной эмболизации опухоли правой почки. В 6-м сегменте правого лёгкого образование повышенной плотности неправильной формы (*) – метастаз опухоли.

Fig. 3. CT scan, thoracic cavity.

Follow-up of 6 months after superselective embolization of the right kidney tumor. In the 6-th segment of the right lung, an irregularly shaped mass of increased density (*) is a tumor metastasis.

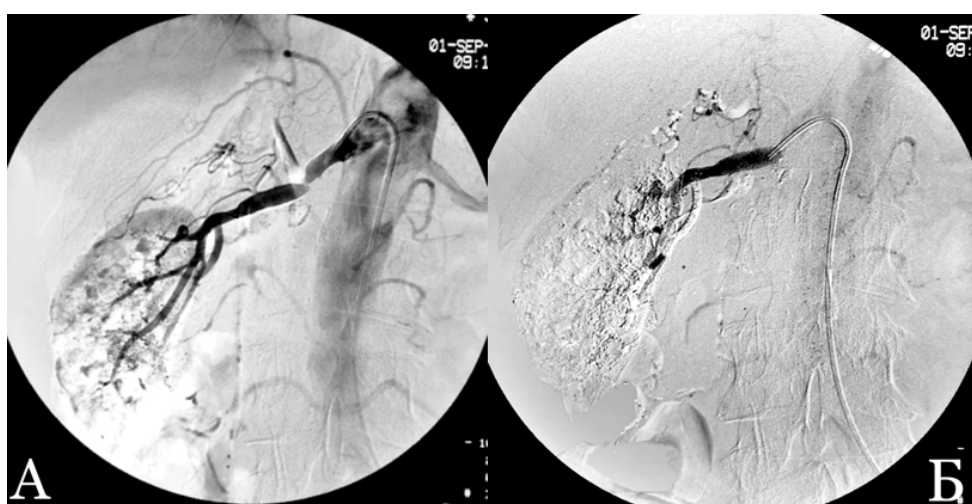


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. Эмболизация правой почки при рецидиве гематурии.

А – артериография правой почки. Определяется контрастирование сегментарных артерий. Б – контрольная артериография после эмболизации. Контрастируется преимущественно дистальный отдел почечной артерии.

Fig. 4. Embolization of the right kidney with recurrent hematuria.

A – arteriography of the right kidney. The contrast of the segmental arteries is determined. B – control arteriography after embolization. Mainly the distal part of the renal artery is contrasted.

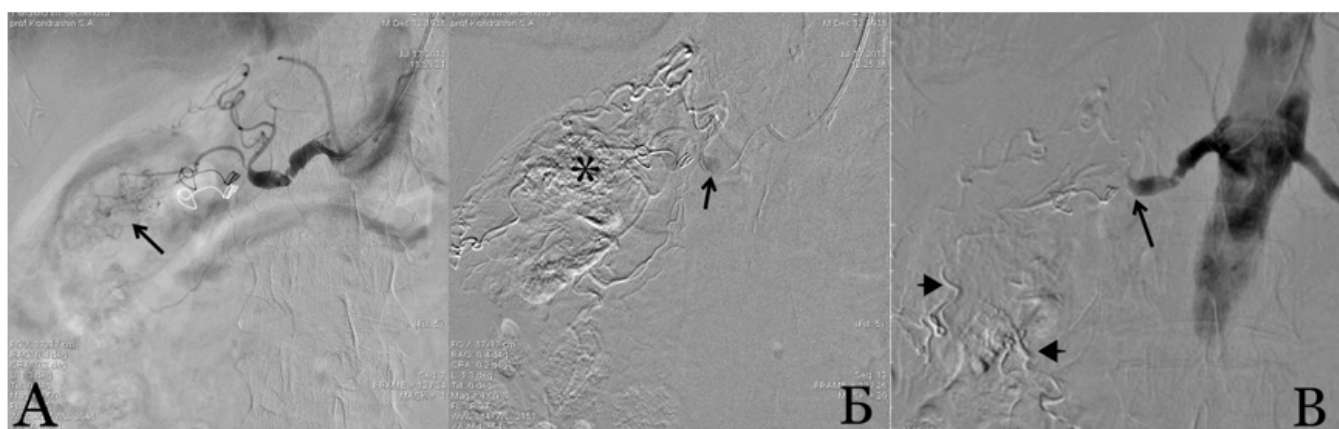


Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. Эмболизация правой почки при рецидиве гематурии.

А – артериография правой почки. Определяется контрастирование мелких сегментарных артерий и экстравазация контрастного вещества в верхнем сегменте почки (стрелка). Б – этап эмболизации питающих артерий (*) через микрокатетер (стрелка). В – контрольная аортография после эмболизации. Контрастируется только дистальный отдел почечной артерии (стрелка), эмболизат виден в капсулярных артериях (толстые стрелки).

Fig. 5. Embolization of the right kidney with recurrent hematuria.

A – arteriography of the right kidney. Contrast of small segmental arteries and extravasation of contrast agent in the upper segment of the kidney (arrow) is visualized. B – the step of embolization of the feeding arteries (*) through a microcatheter (arrow). C – control aortography after embolization. Only the distal renal artery is contrasted (arrow), embolizate is visible within the capsular arteries (thick arrows).

рии. Контрольная аортография. Результаты вмешательства представлены на рис. 5.

После операции больной выписан через 2 дня без гематурии. Пациент продолжал работать, в течение 4-х лет был жив.

Обсуждение.

При неоперабельных опухолях почек и жизнеугрожающей гематурии, по нашим данным, селективная окклюзия почечных артерий позволила в 100% наблюдений остановить кровотечение. Другие авторы не приводят точных данных об эффективности вмешательства [9]. В большом обзоре из 389 статей отмечается, что паллиативная эмболизация используется в случаях прорастания в вены почечно-клеточной карциномы большого объема и неоперабельной опухоли с массивной гематурией, сильной локальной боли из-за опухоли и опасной для жизни эндокринной опухолевой активности [10].

T. Onishi и соавт. [11] отметили после суперселективной эмболизации неоперабельного рака почки увеличение медианы выживаемости с 4,0 до 7,0 месяцев, а показателей 1-, 2- и 3-летней выживаемости с 13%, 7% и 3% до 29%, 15% и 10% соответственно. Наши результаты на небольшой когорте подобных пациентов подтверждают перспективность подобных вмешательств – 1-летняя выживаемость почки составила 88,9%, 3-летняя – 55,6%, 5-летняя – 16,7%.

Неоднозначными оказались результаты паллиативного лечения химиожировой эмболизацией IV стадии почечно-клеточного рака. Лучшими оказались результаты лечения в первом варианте IV стадии опухоли. Введенный суперселективно химиожировой эмболизат инфильтрирует первичный очаг. Этим обеспечивается местное продление лечебного эффекта на все компоненты опухоли, некротические изменения участков опухолевой

ткани [10].

Современные эмболизирующие вещества позволяют добиться высокой частоты технического успеха паллиативной селективной эмболизации. По нашим данным, в 90,5% случаев при селективной эмболизации использование эмболов диаметром 500-700 мк и спиралей 0,035", эмболов диаметром 300-500 мк и микроспиралей 0,018" позволяет надежно перекрыть кровоснабжение опухоли и сохранить максимальное количество функционирующей паренхимы. Подобные материалы при капиллярной и периферической эмболизации почки предлагают другие авторы [12].

При использовании эмболизации перед радиочастотной аблацией предпочтительна суперселективная эмболизация. Комбинация эмболизации и аблации может быть методом выбора у пациентов с I стадией почечно-клеточного рака, при невозможности хирургического вмешательства или наличии единственной функционирующей почки [6, 13].

Заключение.

В случае невозможности выполнения органосохраняющей операции у больных неоперабельной опухолью почки, сопровождающейся выраженной клинической симптоматикой (боль, тотальная макрогематурия), по жизненным показаниям целесообразно проведение селективной эмболизации питающих опухоль ветвей почечной артерии с максимальным сохранением непораженной паренхимы почки.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Состояние онкологической помощи населению России в 2023 году. Москва, МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 262 с. ISBN 978-5-85502-297-1.
2. Каприн А.Д. Злокачественные новообразования в России в 2024 году (заболеваемость). Москва, МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2025. 178 с. ISBN 978-5-85502-311-4.
3. Vaicekavicius E., Pranculis A. Transcatheter renal arterial embolization in malignant renal neoplasms: clinical results and indications for use of the method in multi-profile hospitals. *Medicina (Kaunas)*. 2002;38(9):888-91.
4. Lamb G.W., Bromwich E.J., Vasey P., Aitchison M. Management of renal masses in patients medically unsuitable for nephrectomy – natural history, complications, and outcome. *Urology*. 2004;64(5):909-13. doi: 10.1016/j.urol.2004.05.039.
5. Hallscheidt P., Besharati S., Noeldge G., Haferkamp A., Lopez R., Kauffmann G.W. Preoperative and palliative embolization of renal cell carcinomas: follow-up of 49 patients. *Rofo*. 2006;178(4):391-9. doi: 10.1055/s-2006-926538.
6. Maxwell N.J., Saleem Amer N., Rogers E., Kiely D., Sweeney P., Brady A.P. Renal artery embolisation in the palliative treatment of renal carcinoma. *Br J Radiol*. 2007;80(950):96-102. doi: 10.1259/bjr/31311739.
7. Bex A., Ghanem Y.A., Albiges L., Bonn S., Campi R., Capitanio U. et al. European Association of Urology Guidelines on Renal Cell Carcinoma: The 2025 Update. *Eur Urol*. 2025;87(6):683-696. doi: 10.1016/j.eururo.2025.02.020.

8. Крючков И.А., Чехонацкая М.А., Россоловский А.Н., Кондратьева О.А., Николенко В.Н., Чехонацкий А.А. и др. Сравнительный анализ данных компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии в выявлении метастатического поражения костей при почечно-клеточном раке. *REJR*. 2019; 9(2):130-132. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-130-132.
9. Somani B.K., Nabi G., Thorpe P., McClinton S. Endovascular control of haemorrhagic urological emergencies: an observational study. *BMC Urol*. 2006;6:27. doi: 10.1186/1471-2490-6-27.
10. Kalman D., Varenhorst E. The role of arterial embolization in renal cell carcinoma. *Scand J Urol Nephrol*. 1999;33(3):162-70. doi: 10.1080/003655999750015934.

References:

1. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Shakhzadova A.O. The state of oncological care for the population of Russia in 2023. Moscow, P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute, a branch of the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2024. 262 p. ISBN 978-5-85502-297-1 (in Russian).
2. Kaprin A.D. Malignant neoplasms in Russia in 2024 (incidence). Moscow, P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute, a branch of the National Medical Research Center of Radiology of the Ministry of Health of Russia, 2025. 178 p. ISBN 978-5-85502-311-4 (in Russian).
3. Vaicekavicius E., Pranculis A. Transcatheter renal arterial embolization in malignant renal neoplasms: clinical results and indications for use of the method in multi-profile hospitals. *Medicina (Kaunas)*. 2002;38(9):888-91.
4. Lamb G.W., Bromwich E.J., Vasey P., Aitchison M. Management of renal masses in patients medically unsuitable for nephrectomy – natural history, complications, and outcome. *Urology*. 2004;64(5):909-13. doi: 10.1016/j.urology.2004.05.039.
5. Hallscheidt P., Besharati S., Noeldge G., Haferkamp A., Lopez R., Kauffmann G.W. Preoperative and palliative embolization of renal cell carcinomas: follow-up of 49 patients. *Rofo*. 2006;178(4):391-9. doi: 10.1055/s-2006-926538.
6. Maxwell N.J., Saleem Amer N., Rogers E., Kiely D., Sweeney P., Brady A.P. Renal artery embolisation in the palliative treatment of renal carcinoma. *Br J Radiol*. 2007;80(950):96-102. doi: 10.1259/bjr/31311739.
7. Bex A., Ghanem Y.A., Albiges L., Bonn S., Campi R., Capi-

11. Onishi T., Oishi Y., Suzuki Y., Asano K. Prognostic evaluation of transcatheter arterial embolization for unresectable renal cell carcinoma with distant metastasis. *BJU Int*. 2001;87(4):312-5. doi: 10.1046/j.1464-410x.2001.00070.x.
12. Rassweiler J., Prager P., Haferkamp A., Alken P., Kauffmann G.W., Richter G. Transarterial nephrectomy: the current status of experimental and clinical studies. *J Endourol*. 2008;22(4):767-82. doi: 10.1089/end.2007.9826.
13. Mondshine R.T., Owens S., Mondschein J.I., Cizman B., Stavropoulos S.W., Clark T.W. Combination embolization and radiofrequency ablation therapy for renal cell carcinoma in the setting of coexisting arterial disease. *J Vasc Interv Radiol*. 2008;19(4):616-20. doi: 10.1016/j.jvir.2007.12.444.
- tanio U. et al. European Association of Urology Guidelines on Renal Cell Carcinoma: The 2025 Update. *Eur Urol*. 2025;87(6):683-696. doi: 10.1016/j.eururo.2025.02.020.
8. Kryuchkov I.A., Chekhonatskaya M.L., Rossolovsky A.N., Kondrat'eva O.A., Nikolenko V.N., Chekhonatskiy A.A. et al. Comparative analysis of computed tomography and magnetic resonance imaging in detecting metastatic bone lesions in renal cell carcinoma. *REJR*. 2019; 9(2):130-132. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-130-132 (in Russian).
9. Somani B.K., Nabi G., Thorpe P., McClinton S. Endovascular control of haemorrhagic urological emergencies: an observational study. *BMC Urol*. 2006;6:27. doi: 10.1186/1471-2490-6-27.
10. Kalman D., Varenhorst E. The role of arterial embolization in renal cell carcinoma. *Scand J Urol Nephrol*. 1999;33(3):162-70. doi: 10.1080/003655999750015934.
11. Onishi T., Oishi Y., Suzuki Y., Asano K. Prognostic evaluation of transcatheter arterial embolization for unresectable renal cell carcinoma with distant metastasis. *BJU Int*. 2001;87(4):312-5. doi: 10.1046/j.1464-410x.2001.00070.x.
12. Rassweiler J., Prager P., Haferkamp A., Alken P., Kauffmann G.W., Richter G. Transarterial nephrectomy: the current status of experimental and clinical studies. *J Endourol*. 2008;22(4):767-82. doi: 10.1089/end.2007.9826.
13. Mondshine R.T., Owens S., Mondschein J.I., Cizman B., Stavropoulos S.W., Clark T.W. Combination embolization and radiofrequency ablation therapy for renal cell carcinoma in the setting of coexisting arterial disease. *J Vasc Interv Radiol*. 2008;19(4):616-20. doi: 10.1016/j.jvir.2007.12.444.

LOW-DOSE CT MEDICAL IMAGE DENOISING: NLM AND SIMPLE CNN PERFORMANCE COMPARISON

Ismail^{1,2}, Susilo Widodo¹, Brazovskiy K.S.²

1 – Research Center for Safety, Metrology, and Nuclear Quality Technology, Research Organization for Nuclear Energy, National Research and Innovation Agency. South Tangerang, Indonesia.

2 – National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, Russia.

To reduce the noise level (denoising) of low-dose CT medical images using Non-Local Means (NLM) and Convolutional Neural Networks (CNN) and then compare the performance of both quantitatively and qualitatively.

Materials and Methods. A total of 856 image pairs (low-dose and full-dose) of DICOM images from patients with code L219, image size 512×512 pixels, and slice thickness of 1 mm, were downloaded from the American Association of Physicists in Medicine (AAPM) open dataset. The denoising methods used were NLM and CNN. The quantitative evaluation metrics used were Root Mean Square Error (RMSE), Peak-Signal to Noise Ratio (PSNR), Structural Similarity Index (SSIM), and Mahalanobis Distance. Qualitative evaluation is done by visual observation using IndoQCT software.

Results. The image quality resulting from the denoising process using CNN is better than NLM based on the results of calculating RMSE, PSNR, SSIM, and Mahalanobis Distance values.

Discussion. The denoising process using CNN provides better results. CNN is one of the deep learning models widely used for the denoising process. This model learns clear image patterns as ground truth and then applies the denoising process to noisy images. In carrying out the denoising process, patch-based NLM does not read the clear image pattern but replaces the pixel value with a weighted average of other pixels throughout the image itself. This weight is determined by the similarity of the patches so that detail and texture are still well maintained.

Conclusion. The CNN model successfully performed better on the denoising process, demonstrating the superiority of deep learning over classical denoising methods such as NLM. The simple CNN model proposed in this study also ran well on a standard-spec computer, opening up significant opportunities for researchers or students interested in pursuing this research topic.

Keywords: low-dose, computed tomography, medical image, denoising, NLM, CNN.

Corresponding author: Ismail, e-mail: ism22@tpu.ru, isma012@brin.go.id

For citation: Ismail, Susilo Widodo, Brazovskiy K.S. Low-dose CT medical image denoising: NLM and simple CNN performance comparison. REJR 2026; 16(1):158-164. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-158-164.

Received: 18.10.25

Accepted: 12.11.25

УСТРАНЕНИЕ ШУМА НА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ С НИЗКОЙ ДОЗОЙ ОБЛУЧЕНИЯ: СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НЕЛОКАЛЬНЫХ СРЕДНИХ (NLM) И СВЕРТОЧНЫХ (CNN) НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Исмаил^{1,2}, Сусило Видодо¹, Бразовский К.С.²

1 – Научно-исследовательский центр безопасности, метрологии и технологий качества ядерной энергии, Научно-исследовательская организация по атомной энергетике, Национальное агентство исследований и инноваций. Южный Тангеранг, Индонезия.

2 – Томский Национальный исследовательский политехнический университет. г. Томск, Россия.

Целью данного исследования является снижение уровня шума (шумоподавление) на медицинских КТ-изображениях с низкой дозой облучения с использованием нелокальных средних (NLM) и сверточных нейронных сетей (CNN), а затем сравнение производительности обоих методов в количественном и качественном плане.

Материалы и методы. Всего из открытого набора данных Американской ассоциации физиков-медиков (AAPM) было загружено 856 пар (с низкой и полной дозой) DICOM-изображений пациентов с кодом L219, размером изображения 512×512 пикселей и толщиной среза 1 мм. В качестве методов шумоподавления использовались нелокальные средние (NLM) и сверточные нейронные сети (CNN). В качестве количественных метрик оценки использовались: среднеквадратическая ошибка (RMSE), отношение пикового сигнала к шуму (PSNR), индекс структурного сходства (SSIM) и расстояние Махаланобиса. Качественная оценка проводилась путем визуального наблюдения с использованием программного обеспечения IndoQCT.

Результаты. Качество изображения, полученное в результате шумоподавления с использованием CNN, лучше, чем в случае NLM, судя по результатам расчета значений RMSE, PSNR, SSIM и расстояния Махаланобиса.

Обсуждение. Процесс шумоподавления с использованием CNN обеспечивает лучшие результаты. CNN – одна из моделей глубокого обучения, широко используемых для шумоподавления. Эта модель распознает четкие паттерны изображения как истинные данные, а затем применяет процесс шумоподавления к зашумленным изображениям. При выполнении процесса шумоподавления NLM на основе патчей не считывает четкий паттерн изображения, а заменяет значение пикселя средневзвешенным значением других пикселей по всему изображению. Этот вес определяется сходством участков, что позволяет сохранить детализацию и текстуру.

Заключение. Модель CNN успешно справилась с шумоподавлением, продемонстрировав превосходство глубокого обучения над такими классическими методами шумоподавления, как NLM. Простая модель CNN, предложенная в данном исследовании, также хорошо работала на стандартном компьютере, открывая значительные возможности для исследователей и студентов, заинтересованных в изучении данной темы.

Ключевые слова: низкая доза облучения, компьютерная томография, медицинское изображение, шумоподавление, NLM, CNN.

Контактный автор: Исмаил, e-mail: ism22@tpu.ru, isma012@brin.go.id

Для цитирования: Исмаил, Сусило Видодо, Бразовский К.С. Устранение шума на КТ-изображениях с низкой дозой облучения: сравнение производительности нелокальных средних (NLM) и сверточных (CNN) нейронных сетей. REJR 2026; 16(1):158-164. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-158-164.

Статья получена: 18.10.25

Статья принята: 12.11.25

Research on low-dose CT medical image denoising and reconstruction using deep learning has emerged as a critical area of inquiry due to the increasing demand for reducing radiation exposure while maintaining diagnostic image quality [1]. Since the inception of computed tomography, advancements have evolved from traditional filtered back-projection and iterative reconstruction methods to sophisticated deep-learning based approaches. These developments are significant given that CT scans contribute substantially to medical radiation exposure, with low-dose CT (LDCT) techniques reducing radiation by up to 25% but introducing noise and artifacts that degrade image quality [2, 3]. The practical implications include lowering cancer risk and improving patient safety without compromising diagnostic accuracy.

The specific problem addressed is the challenge of effectively denoising LDCT images and reconstructing high-quality images despite the complex noise patterns and artifacts introduced by dose reduction. Existing methods, including sinogram filtering, iterative reconstruction, and image-domain post-processing, have limitations such as computational cost, proprietary data dependency, and loss of fine structural details [4]. Deep learning methods have shown promise but face knowledge gaps related to generalizability across different dose levels, interpretability, and the preservation of subtle anatomical features. Controversies exist regarding the balance between noise suppression and detail preservation, with some approaches leading to over-smoothing or artificial artefacts [5, 6]. The consequences of these gaps include potential misdiagnosis and limited clinical adoption of deep learning denoising techniques.

The conceptual framework integrates key concepts of low-dose CT imaging, noise and artifact characteristics, and deep learning-based denoising and reconstruction models. LDCT imaging reduces radiation dose but increase noise, necessitating advanced denoising algorithm. Deep learning model, including CNN, Generative Adversarial Network (GAN), and hybrid architectures, learn mappings from noisy to clean images, aiming to suppress noise while preserving structural integrity [7].

In this study, we aim to perform the denoising process using the NLM method as a conventional image processor and CNN as a deep-learning-based image processor, and compare the performance of both in performing the denoising process based on quantitative calculations through evaluation metrics: RMSE, PSNR, SSIM, and Mahalanobis Distance

[8]. Meanwhile, qualitative image quality assessment is carried out by observation using IndoQCT [9].

Purpose.

This study aims to reduce the noise level (denoising) of low-dose CT medical images using Non-Local Means (NLM) and Convolutional Neural Networks (CNN) and then compare the performance of both quantitatively and qualitatively.

Materials and Methods.

A total of 856 image pairs (low dose and full dose) of DICOM image with a slice thickness of 1 mm and a size of 512×512 pixels were downloaded from the American Association of Physicists in Medicine (AAPM) open dataset [10]. The denoising methods used were NLM and CNN.

Mathematically, the NLM filter can be described as where the vector $\hat{u}$ represents the noisy image to be smoothed, k denoted the pixel index within the neighbouring window area of a target pixel for computational efficiency of pixel j , $w_{jk}(\hat{u})$ is the weighting coefficient and satisfies the condition $0 \leq w_{jk}(\hat{u}) \leq 1$ and $\sum_{k \in S_{W_j}} w_{jk}(\hat{u}) = 1$, and $NLM(\hat{u}_j)$ denotes the intensity of pixel j after the NLM denoising.

In this case, $w_{jk}(\hat{u})$ calculated as

$$w_{jk}(\hat{u}) = \frac{\exp(-\|P(\hat{u}_j) - P(\hat{u}_k)\|_{2,\sigma}^2/h^2)}{\sum_{k \in S_{W_j}} \exp(-\|P(\hat{u}_j) - P(\hat{u}_k)\|_{2,\sigma}^2/h^2)}$$

where $P(\hat{u}_j)$ and $P(\hat{u}_k)$ are patches around the pixel j and k , with $\|P(\hat{u}_j) - P(\hat{u}_k)\|$ is the distance between two patches with a Gaussian kernel to weight the contribution to each dimension. Where h is the filtering parameter that controls the exponential decay and the weighting coefficient. When h is small, the image tends to be weakly smoothed; when h is large, the image tends to be strongly smoothed [11]. This research has applied two parameters in NLM denoising, $h = 1.15$ and 2.3 to control the smoothing level, patch size (ps) of 5 and 7, and patch distance (pd) of 6 and 15.

The CNN algorithm consists of an input layer, an output layer and several hidden layers of neurons, which perform an alternating sequence of linear and non-linear transformations. The output of each hidden layer is called a feature map. Each convolution layer is multiplied by the output of the previous layer. The activation function further processes the input multiplied by the weights of the convolution layer. The l -th input is given by

$$x_{ij} = f\left(\sum_{i \in M_j} x_i^{l-1} * w_{ij}^l + b_j^l\right)$$

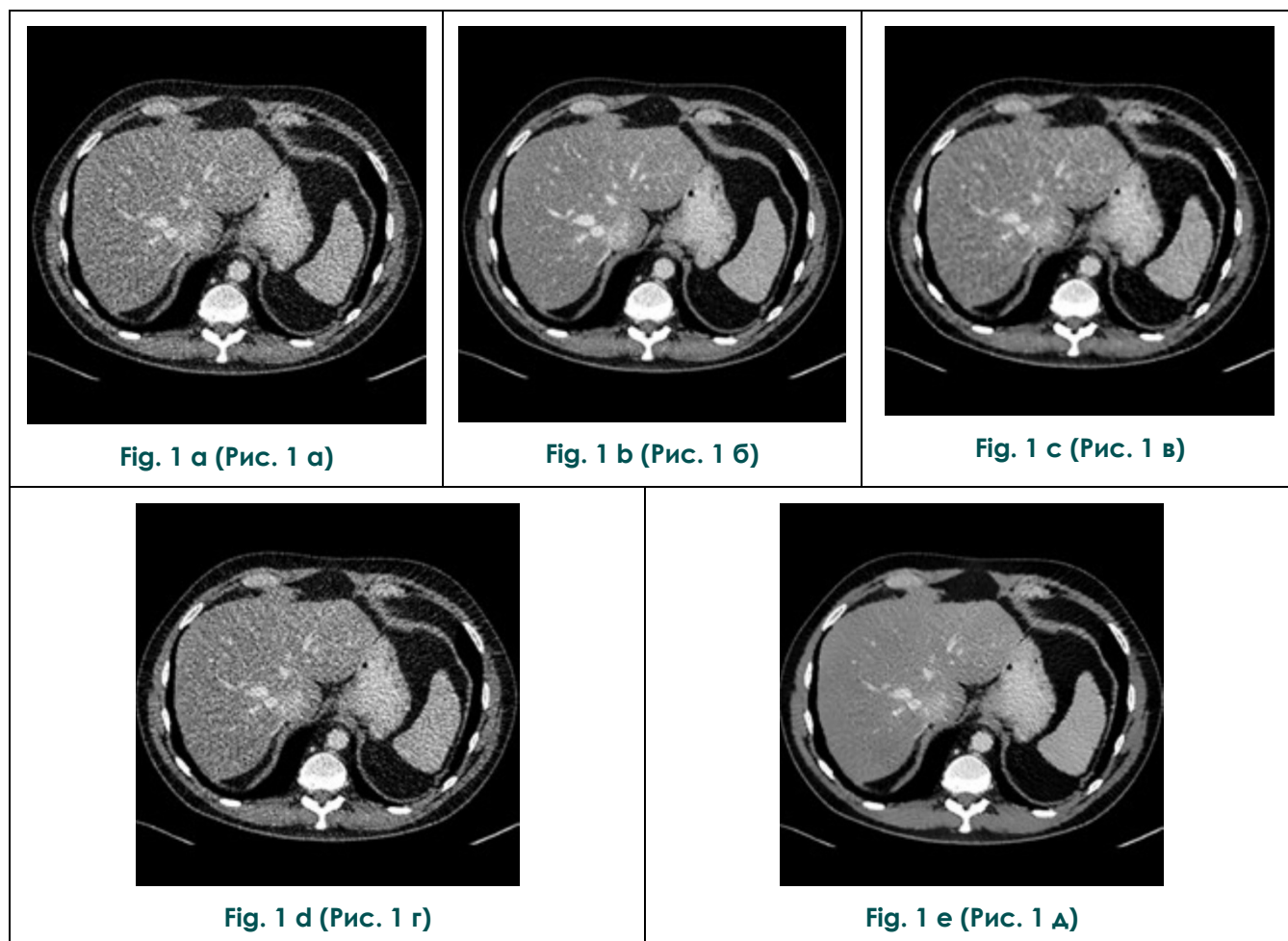


Fig. 1. CT scan image, abdomibal area, number 315 observed using IndoQCT software.

a – Low-dose irradiation result,

b – Full-dose irradiation result,

c – Denoising result using simple CNN,

d – Denoising result using NLM A, $h = 1.15$, patch size = 5, patch distance = 6,

e – Denoising result using NLM B, $h = 2.30$, patch size = 7, patch distance = 15.

Рис. 1. КТ, органы брюшной полости, изображение номер 315, полученное с помощью программного обеспечения IndoQCT.

a – Результат облучения низкой дозой,

b – Результат облучения полной дозой,

c – Результат шумоподавления с использованием простой сверточной нейронной сети,

d – Результат шумоподавления с использованием NLM: $h = 1,15$, размер области = 5, расстояние между областями = 6,

e – Результат шумоподавления с использованием NLM: $h = 2,3$, размер области = 7, расстояние между областями = 15.

with M_j represents the selection of the input feature map, $x_i^{(l-1)}$ is the output of the previous feature map, w_{ij}^l is the weight of the convolutional kernel of the l -th layer, f is the activation function which in this research used the leaky rectified linear unit (LeakyReLU), and b_j^l is the bias of the l -th layer [12]. In this research, simple CNN algorithm is built with an encoder section of two convolution layers, 16 and 32 filters, each followed by a LeakyReLU activation function, a bottleneck section that acts as a narrowing of the representation to extract the main features of the image, with Conv2D measuring 64 filters, and a decoder section that uses two Conv2DTranspose deconvolution layers with 32 and 16 filters to restore the image size. The model is trained using training data for 5 epochs and a batch size of 1, to adapting the computing capabilities of the available computer devices. We split the 80% dataset as training data and 20% as testing data, a random state of 42, using Adaptive Moment Estimation (Adam) optimizer, and Mean Square Error (MSE) as loss function. To build this model, we used Python 3.12 and TensorFlow 2.17 as the framework.

which lies in the range 0 to 1. It is better in line with human visual perception. A higher SSIM value close to 1 indicates better reconstruction quality, the more similar to the original [13].

This research also used quantitative analysis using Mahalanobis Distance. This distance indicates the difference between the two images being analysed. the smaller the distance value indicates that the two images are more similar [14].

Results and discussion.

A representative visual comparison of CT images for low dose, full dose, simple CNN denoised, and NLM denoised are shown in Figure 1. Visually, differences in noise levels were observed in the images. The low-dose irradiation images showed higher noise levels than the full-dose irradiation images. The denoising results using NLM and CNN also showed differences in noise levels. Compared to the low-dose irradiation images, a visual decrease in noise levels was observed, indicating successful denoising.

The NLM denoising images showed that the parameter values used significantly influenced the denoised images. Further quantita-

Table №1. The results of the average evaluation metrics calculation of 856 images.

RMSE				PSNR			
Noisy	NLM A	NLM B	CNN	Noisy	NLM A	NLM B	CNN
40.757	38.398	29.288	26.412	35.676	36.204	38.551	39.381
SSIM				Mahalanobis Distance			
Noisy	NLM A	NLM B	CNN	Noisy	NLM A	NLM B	CNN
0.845	0.868	0.917	0.931	247871.414	214600.146	130803.035	103544.510
NLM A = using parameters $h = 1.15$, patch size = 5, patch distance = 6							
NLM B = using parameters $h = 2.30$, patch size = 7, patch distance = 15							

The quantitative evaluation metrics used were RMSE, PSNR, SSIM, and Mahalanobis Distance. Qualitative evaluation is done by visual observation using IndoQCT software. RMSE is a common image quality evaluation metric, used to measure the degree of difference between the output image and the original image. The smaller RMSE value indicates the smaller difference between the output image and the original image, showing the better the processing effect. PSNR is an objective measure of the error between image pixels and is typically used for error-sensitive images. The higher the PSNR value, the smaller the distortion and the better the image effect. Structural Similarity Index (SSIM) stands for structural similarity. It is an index used to measure the similarity between the full-dose and the denoised image,

tive analysis will be conducted using evaluation metrics such as RMSE, PSNR, SSIM, and Mahalanobis Distance. The results of the average evaluation metrics calculation of 856 images are shown in Table 1.

The results of the evaluation metrics calculation indicate a decrease in the noise level in the denoised image. The parameter settings in the denoising method using NLM significantly affect the noise level. Larger parameters such as h , patch size, and patch distance result in better denoising. This is indicated by a smaller RMSE value, an increased PSNR value, an SSIM value closer to 1, and a smaller Mahalanobis Distance value. This supports the results of visual observations. But, tuning parameter values in NLM requires trial and error. Setting a larger h value improves smoothing

but risks losing detail, while larger patch sizes and search windows improve robustness to noise but increase computational costs. This makes it impractical to perform the denoising process automatically.

However, the best results from image denoising using NLM are not better than those from CNN. This is because the image denoising process of NLM and CNN is different. NLM performs patch-based denoising that replaces pixel values with a weighted average of other pixels across the image, where the weights are determined by the similarity of the patches so that detail and texture are better preserved. NLM takes advantage of pattern repetition in the image: similar patches may appear far from the target location, so averaging the values from similar patches will suppress random noise while preserving the actual structure.

CNN-based image denoising, on the other hand, learns an end-to-end mapping from a noisy image to a clean one using convolutional layers, often in a residual framework, to predict noise and then subtract it from the input. This approach preserves structural details better than classical techniques when trained with sufficient data, although it requires high computational effort and careful training setup. With low-dose-full-dose image pairs available, CNNs are able to predict better by learning patterns from the clean (full-dose) image as ground truth. Therefore, CNNs are able to provide better denoising results than classical denoising methods, despite using a

simpler architecture. Table 1 clearly shows the best denoising results using CNN. The RMSE value is the smallest, indicating a small difference between the denoised image and the full-dose image. An increase in the PSNR value indicates small image distortion. The SSIM value is closer to 1, indicating similarity to the ground truth image. Finally, the Mahalanobis Distance value is the smallest, indicating the closeness between the denoised image and the clean image.

Conclusions.

The CNN model successfully performed better on the denoising process, demonstrating the superiority of deep learning over classical denoising methods such as NLM. This is in accordance with the results of the evaluation metrics calculation, the image denoised using the simple CNN model shows the smallest RMSE value, the highest increase in PSNR value, the SSIM value closest to 1, and the smallest Mahalanobis Distance value. The simple CNN model proposed in this study also ran well on a standard-spec computer, opening up significant opportunities for researchers or students interested in pursuing this research topic.

Conflicts of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Funding.

This research received no external funding.

References:

1. Immonen E. et al. *The use of deep learning towards dose optimization in low-dose computed tomography: A scoping review.* 2022, W.B. Saunders Ltd. doi: 10.1016/j.radi.2021.07.010.
2. Jo G., Ahn C., Hong J.H. et al. *75% radiation dose reduction using deep learning reconstruction on low-dose chest CT.* *BMC Med Imaging.* 2023; 23: 121 <https://doi.org/10.1186/s12880-023-01081-8>.
3. Diwakar M. et al. *Low-Dose COVID-19 CT Image Denoising Using Batch Normalization and Convolution Neural Network.* *Electronics (Basel).* 2022; 11 (3375): 2-17 doi: 10.3390/electronics11203375.
4. Nagata, M., Ichikawa, Y., Domae, K. et al. *Application of Deep Learning-Based Denoising Technique for Radiation Dose Reduction in Dynamic Abdominal CT: Comparison with Standard-Dose CT Using Hybrid Iterative Reconstruction Method.* *J Digit Imaging.* 2023; 36: 1578-1587. <https://doi.org/10.1007/s10278-023-00808-x>
5. Wang H., L. L. Li, J. Shang, J. Song, and B. Liu. *Application of deep learning image reconstruction in low-dose chest CT scan.* *British Journal of Radiology.* 2022, 95: 1133 doi: 10.1259/bjr.20210380.
6. Kim J. H., H. J. Yoon, E. Lee, I. Kim, Y. K. Cha, and S. H. Bak. *Validation of deep-learning image reconstruction for low-dose chest computed tomography scan: Emphasis on image quality and noise.* *Korean J Radiol.* 2021; 22 (1): 131-138 doi: 10.3348/kjr.2020.0116.
7. Sadia R.T., J. Chen, and J. Zhang. *CT image denoising methods for image quality improvement and radiation dose reduction.* 2024, John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/acm2.14270.
8. Sara U., M. Akter, and M. S. Uddin. *Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR. A Comparative Study.* *Journal of Computer and Communications.* 2019; 07 (03): 8-18 doi: 10.4236/jcc.2019.73002.
9. Anam C. et al. *Assessment of patient dose and noise level of clinical CT images: Automated measurements.* *Journal of Radiological Protection.* 2019; 39 (3): 783-793 doi: 10.1088/1361-6498/ab23cc.
10. Wang F., R. Wang, and H. Qiu. *Low-dose CT reconstruction using datasetfree learning.* *PLoS One.* 2024; 19 (6): 10.1371/journal.pone.0304738.
11. Zhang H., D. Zeng, H. Zhang, J. Wang, Z. Liang, and J. Ma. *Applications of nonlocal means algorithm in low-dose X-ray CT image processing and reconstruction: a review.* *Med Phys.* 2017; 44 (3): 1168-1185 doi: 10.1002/MP.12097.

12. Thakur R. S., R. N. Yadav, and L. Gupta. *State-of-art analysis of image denoising methods using convolutional neural networks*. 2019; 14. *Institution of Engineering and Technology*. doi: 10.1049/iet-ipr.2019.0157.
13. Li Z., S. Zhou, J. Huang, L. Yu, and M. Jin. *Investigation of Low-Dose CT Image Denoising Using Unpaired Deep Learning Methods*. *IEEE Trans Radiat Plasma Med Sci*. 2021; 5 (2): 224-234 doi: 10.1109/TRPMS.2020.3007583.
14. César Pereira J. P., A. Monteiro, R. D. L. Ribeiro, A. C. Sobieranski, and A. Von Wangenheim. *Comparison of Supervised Classifiers and Image Features for Crop Rows Segmentation on Aerial Images*. *Applied Artificial Intelligence*. 2020; 34 (4): 271-291.

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ЭЛАСТОГРАФИЯ В ИЗУЧЕНИИ ИНТРАКРАНИАЛЬНЫХ ОПУХОЛЕЙ

Чехонин И.В.¹, Куприянов Д.А.^{2,3}, Фадеева Л.М.¹,
Ласунин Н.В.¹, Пронин И.Н.¹

1 – ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко» МЗ РФ, г. Москва, Россия.

2 – Медицинский центр ГУТА КЛИНИК, г. Москва, Россия.

3 – ФГБУ «НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева» МЗ РФ.

Представлен обзор магнитно-резонансной эластографии (МРЭ) для оценки механических свойств интракраниальных опухолей. Рассмотрены физические основы МРЭ, используемые параметры и технические аспекты проведения исследования, в том числе способы генерации тканевых колебаний и импульсные последовательности для их регистрации. Приведены данные о диагностических возможностях, включая неинвазивное предоперационное определение консистенции опухолевой ткани, что важно для планирования нейрохирургических вмешательств и представляет основную перспективу использования метода. Особое внимание уделено потенциалу МРЭ в дифференциальной диагностике. Анализ литературных данных проиллюстрирован тремя примерами менингиом с приведением карт сдвиговой жесткости. Выделены ограничения, связанные с минимальным размером исследуемых образований, техническими параметрами и необходимостью стандартизации. МРЭ рассматривается как перспективный инструмент специализированной диагностики, требующий дальнейших масштабных исследований для более широкого клинического применения.

Ключевые слова: МР-эластография, сдвиговая жесткость, менингиома, шваннома, глиома, метастаз.

Контактный автор: Чехонин И.В., e-mail: ichekhonin@nsi.ru, ivan-chekhonin@yandex.ru

Для цитирования: Чехонин И.В., Куприянов Д.А., Фадеева Л.М., Ласунин Н.В., Пронин И.Н. Магнитно-резонансная эластография в изучении интракраниальных опухолей. REJR 2026; 16(1):165-179. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-165-179.

Статья получена: 12.03.26

Статья принята: 14.04.26

MAGNETIC RESONANCE ELASTOGRAPHY OF INTRACRANIAL TUMORS

Chekhonin I.V.¹, Kupriyanov D.A.^{2,3}, Fadeeva L.M.¹, Lasunin N.V.¹, Pronin I.N.¹

1 - N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery.

2 - Medical Center GUTA CLINIC.

3 - Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology. Moscow, Russia.

This review examines the application of magnetic resonance elastography (MRE) for evaluation of the mechanical properties of intracranial tumors. The discussion encompasses the underlying physical principles, essential parameters, and technical aspects of the methodology, such as generation of shear waves and specialized pulse sequences for detection of their propagation in tissues. The article emphasizes the diagnostic capabilities of MRE, particularly its role in noninvasive preoperative prediction of tumor consistency, a critical factor for neurosurgical planning, which is one of the key advantages of the technique. Further attention is given to differen-

tial diagnosis. We supply our analysis with own illustrative case examples of three meningioma patients including shear stiffness maps. Finally, we outline the limitations of the technology, including constraints related to the minimum lesion size for reliable measurements, technical specifications, and the necessity for standardized protocols. Overall, MRE is presented as a promising highly specialized diagnostic tool, although extensive research will be required for broader clinical adoption.

Keywords: MR elastography, shear stiffness, meningioma, schwannoma, glioma, metastasis.

Corresponding author: Chekhonin I.V., e-mail: ichekhonin@nsi.ru, ivan-chekhonin@yandex.ru

For citation: Chekhonin I.V., Kupriyanov D.A., Fadeeva L.M., Lasunin N.V., Pronin I.N. Magnetic resonance elastography of intracranial tumors. REJR 2026; 16(1):165-179. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-165-179.

Received: 12.03.26

Accepted: 14.04.26

Механические свойства ткани интракраниальных объемных образований являются важной характеристикой, которая не только может оказывать влияние на подходы к планированию хирургических вмешательств, но и имеет фундаментальное значение для разработки новых подходов к диагностике и лечению. Изучение данных свойств в контексте медицинской визуализации составляет предмет эластографии – совокупности методов, при которых механическая деформация ткани (сжатие, сдвиг) используется для оценки её вязкоупругих качеств с последующим их отображением. Она может основываться на принципах ультразвуковой диагностики [1-3], оптической когерентной [4] или магнитно-резонансной эла-

стографии (МРЭ). Основными недостатками первых двух методов в нейроонкологии является их исключительно интраоперационная применимость в силу невозможности преодоления интактных костей черепа для оптической когерентной эластографии и необходимости поиска окна визуализации (не всегда доступного) для ультразвуковой эластографии. Таким образом, на этапе предоперационной диагностики преимущества МРЭ неоспоримы. При МРЭ механическая жесткость ткани, определяемая вязкоупругими её свойствами, становится новым типом контрастности наряду с релаксационными параметрами, сохраняя преимущества МРТ, что обеспечивает существенно меньшую зависимость результатов от оператора, хорошую их воспроизводимость и возмож-

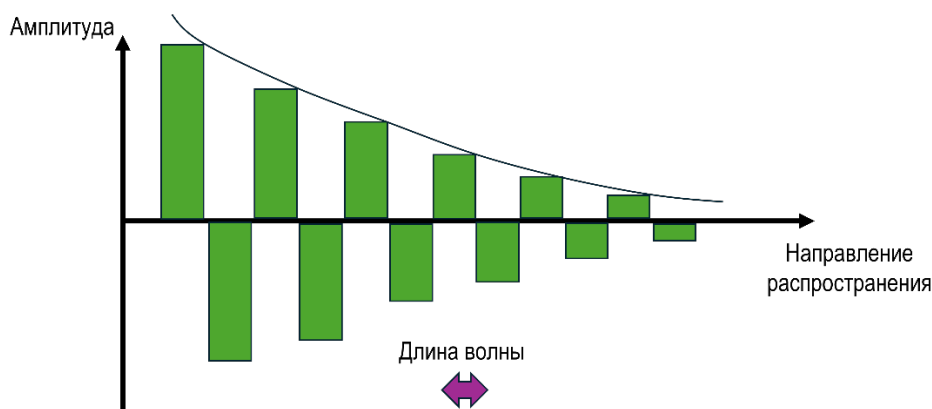


Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. Схема распространения механической волны в ткани с однородной жесткостью.

Снижение амплитуды, связанное с вязкостью среды. Длина распространяющейся в ткани волны является мерой степени смещения, трансформируемой в показатели жесткости.

Fig. 1. Diagram illustrating the propagation of mechanical wave in a tissue with homogenic stiffness.

Notably, the amplitude decreases due to the viscosity of the medium. The wavelength reflects the extent of tissue displacement, which is then translated into measures of stiffness.

ность более широкого объема визуализации.

Основы методики МРЭ.

Ключевым параметром, оцениваемым при МРЭ, является модуль сдвига (shear modulus, G) – физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться изменению его формы при сохранении объема, то есть стремление тела вернуться в первоначальную форму, отдав приложенную энергию. Биологические ткани не отвечают требованиям модели идеально упругого тела и характеризуются не только упругими свойствами, но также и необходимостью преодоления внутреннего трения, при котором происходит рассеивание энергии, то есть вязкостью (рис. 1).

Для описания данной более сложной, но более реалистичной модели применяется комплексный модуль сдвига (G^*), являющийся по определению комплексным числом и складывающийся из модуля упругости (G'), или накопления (storage modulus), и модуля вязкости (G''), или потерь [5]. При распространении колебаний в гетерогенной ткани увеличение модуля упругости проявляется в увеличении длины волны. Вязкость приводит к затуханию волн при прохождении через ткань. Будучи комплексным числом, G^* выражается следующей формулой:

$$G^* = G' + iG''$$

G' в данном уравнении является вещественной частью, G'' – мнимой частью (i – соответствует мнимой единице). В расчетах также может использоваться тригонометрическая форма числа:

$$G^* = |G^*|(\cos \varphi + i \sin \varphi)$$

В приведенной формуле $|G^*|$ – модуль комплексного числа (также известен как величина (magnitude) комплексного модуля сдвига), φ – аргумент, связанный с модулями

упругости и вязкости отношением:

$$\tan \varphi = \frac{G''}{G'}$$

Таким образом, возможна и геометрическая форма:

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

Аргумент φ также называют фазовым углом. Чем более вязкой является ткань, тем больше фазовый угол. Наоборот, при преобладании упругих свойств угол φ имеет минимальные значения (рис. 2) [6].

Основные термины в эластографии имеют определенную широту трактовки. Под термином «жесткость» (stiffness) подразумевается способность тела сопротивляться деформации под действием приложенной силы. В МРЭ используется понятие «сдвиговая жесткость» (shear stiffness), под которой часто понимают величину комплексного модуля сдвига $|G^*|$. Однако при пренебрежении вязкостными свойствами изучаемого объекта в качестве «сдвиговой жесткости» может использоваться и модуль сдвига (G). Упругость (эластичность, elasticity) – это способность ткани возвращаться к исходным форме и размеру после исчезновения деформирующих сил. В МРЭ для описания упругих свойств ткани могут быть применены модуль упругости (G') или скорость распространения волны. Таким образом, при изложении результатов исследований целесообразно уточнение общих понятий [7].

Для проведения МРЭ необходим источник (драйвер, актуатор) гармонических колебаний, вызывающих сдвиговую волну в тканях. Наиболее часто используемыми в клинической практике и в исследованиях являются источники пневматического типа, располагающиеся в машинном зале [8]. Генерируемые ими колебания передаются через

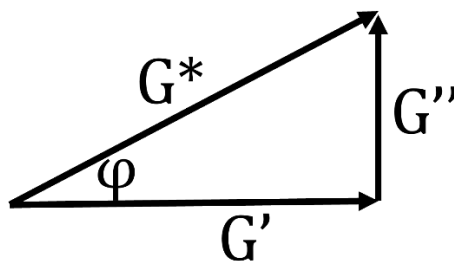


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Схема.

Взаимосвязь компонентов комплексного модуля сдвига (по Lee et al., 2023 [6]).

Fig. 2. Scheme.

Relationship between the components of the complex shear modulus (according to Lee et al., 2023 [6]).

пневмотрубки в томограф, где создаваемые вибрации подводятся непосредственно к изучаемой части тела при помощи пассивного передающего устройства, имеющего вид подушечки с вибрирующей мембраной (рис. 3).

Также в литературе описываются менее распространенные акустические, электромагнитные, а также пьезоэлектрические источники механического воздействия [9]. К преимуществам пневмодрайверов относят высокую МР-совместимость, удовлетворительную амплитуду генерируемых волн, а также наибольшую коммерческую доступность. Частоты колебаний, способные вызвать микросмещения мозговых структур, соответствуют диапазону от 10 до 100 Гц. Более низкочастотные колебания проникают глубже, но не могут обеспечить приемлемый сигнал в силу высокой длины волны. Волны с большей частотой обеспечивают более высокое пространственное разрешение, однако с ними связаны погрешности регистрации. Чаще используются частоты 50-60 Гц [9]. Также применялась и комбинация частот [10].

Для МР-регистрации сдвиговых смещений в тканях применяются импульсные последовательности с градиентным магнитным полем, кодирующим движение (motion-

encoding gradient, MEG) для выявления на сырых фазовых изображениях изменений, связанных с дислокацией тканей под влиянием распространения гармонических волн. При этом фаза МР-сигнала меняется в зависимости от амплитуды движения тканей. Принципиальной является необходимость синхронизации драйвера колебаний и включения импульсной последовательности МРТ. Протоны ткани, которые приходят в движение под воздействием внешних вибраций, получают дополнительную фазу к той, которую приобретают при воздействии радиочастотного импульса неподвижные протоны (аккумуляция фазы). Разность фаз между движущимися и неподвижными протонами пропорциональна их смещению. Неподвижные протоны и протоны, движение которых не связано с индуцирующими механическими колебаниями, не будут накапливать фазу. Для получения информации о распространении сдвиговой волны в ткани используются несколько интервалов регистрации, в связи с чем между внешним стимулом и импульсной последовательностью задаются различные временные промежутки (фазовый сдвиг, phase offset), а также разные направления МEG. В связи с синусоидальной природой распространяющихся волн фазовый сдвиг удобно измерять в градусах [9].

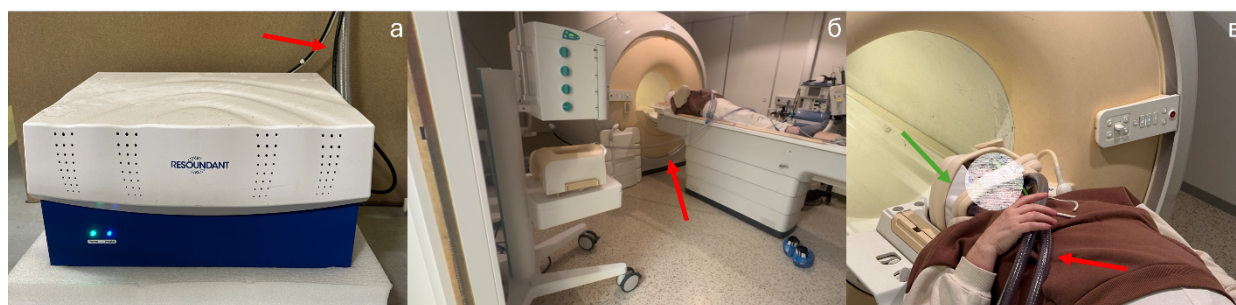


Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. Фотографии.

Общий вид проведения МРЭ. А – пневмодрайвер RESOUNDANT (генерируемая частота колебаний – 60 Гц). Б – МР-томограф Philips INGENIA, 3 Т. В – более крупное изображение пациента перед проведением исследования. Красные стрелки указывают на трубки для проведения колебаний воздуха, следующие от пневмодрайвера к пациенту (пассивное передающее устройство, прилегающее к правой лобно-теменно-височной области, указано зеленой стрелкой; с противоположной стороны имеется аналогичное устройство).

Fig. 3. Photos.

R General overview of MRE procedure. A – RESOUNDANT pneumatic actuator (generated oscillation frequency: 60 Hz). B – Philips INGENIA MRI scanner, 3 T. C – enlarged image of the patient prior to the examination. The red arrows indicate the tubes for transmission of air oscillations from the actuator to the patient, while the pillow driver, adjacent to the right fronto-parieto-temporal region, is marked with a green arrow; a similar device is positioned on the opposite side.

Для целей МРЭ могут быть модифицированы различные импульсные последовательности, в том числе на основе спинного эха (SE), градиентного эха (GRE), а также наиболее быстрая комбинация спинного эха с эхопланарным считыванием (SE-EPI), позволяющая выполнить регистрацию данных k-пространства целиком для одного среза за одно время повторения (TR) – методика «single-shot» [5, 9, 11]. Однако, наряду с высокой скоростью сбора данных, для этой импульсной последовательности характерна и существенная восприимчивость к неоднородностям магнитного поля, что часто приводит к пространственным искажениям полученных изображений. Добиться большего качества позволяет применение регистрации сигнала от среза за несколько TR, а сохранить высокую производительность – за счет мультислабовой технологии и спирального заполнения k-пространства (multi-shot multislab spiral EPI) [9]. Нами применяется импульсная последовательность FFE (fast field echo) на основе градиентного эха.

Накапливаемый при применении MEG фазовый сдвиг (ϕ) (в МРЭ обозначение ϕ также используется для обозначения угла, тангенс которого равен отношению компонентов комплексного модуля сдвига (рис. 2), что может приводить к ошибкам в интерпретации) определяется по формуле, где γ – гиромагнитное отношение (константа для определенного типа ядер – для протонов 42,58 МГц/Тл), $r_{\vec{t}}(t)$ – траектория спинов, а $G_{\vec{r}}(t)$ – градиент (MEG) как функция времени [7, 9, 12]:

При этом τ – полное время действия градиента MEG – является произведением длительности одного периода градиента (T) и числу градиентных циклов (повторов) – N. Получив распределение смещений протонов, возможно измерить длину распространяющейся в ткани волны (λ) и вычислить величину модуля сдвига по формуле, также включающей известную частоту колебаний (частоту драйвера) и плотность ткани, которая для упрощения расчетов принимается равной плотности воды (1000 кг/м³) [7, 9]:

Единицей измерения модуля сдвига является кг/м·с² или Па. В медико-биологических исследованиях чаще используется кПа.

Одной из основополагающих фундаментальных работ в области МРЭ является исследование Muthupillai et al., использовавших генератор акустических колебаний и модифицированную импульсную последовательность «градиентное эхо» для визуализации упругих свойств фантомов из агарозного

геля. Значения модуля сдвига, полученные при помощи МРЭ, согласовались с соответствующими величинами, измеренными механически, и различались для фантомов с разными упругими свойствами. В эксперименте ex vivo структура свиной почки характеризовалась гетерогенностью с большей жесткостью коркового вещества по отношению к медуллярному. Таким образом, были заложены и обоснованы принципы количественного картирования жесткости биологических тканей [12].

Исследования диагностических возможностей МРЭ.

Актуальной задачей является предоперационное неинвазивное предсказание вязкоупругих свойств опухолевой ткани. Для нейрохирургии поиск методик такой оценки имеет принципиальное значение в силу влияния на выбор доступа, прогнозирование резектабельности опухоли и исходов оперативного лечения, в особенности в связи с широким распространением малоинвазивных, в т.ч. эндоскопических, доступов, а также с необходимостью удаления образований глубокой локализации, в частности, менингиом, шванном и аденом гипофиза, часто включающих в свой объем критически значимые анатомические структуры или воздействующие на них. Little et al. на выборке пациентов с петрокливальными менингиомами продемонстрировали, что выбор в пользу селективной субтотальной резекции по сравнению со стремлением к тотальному удалению в случае прилегания опухолей к невральным и сосудистым структурам и близкой к фиброзной консистенции опухолевой ткани предсказуемо снижал вероятность послеоперационных неврологических осложнений [13]. Sauvigny et al. выявили влияние гетерогенности ткани менингиом на неполноту резекции, в том числе среди конвексимальных менингиом и менингиом основания черепа (которая является более значимым фактором в последней группе, включавшей переднюю и среднюю черепные ямки), но не в подгруппе менингиом задней черепной ямки. Также высокая жесткость опухолевой ткани, субъективно определяемая интраоперационно, отрицательно влияла на объем резекции в группе менингиом основания черепа. Возможное отсутствие связи консистенции опухолевой ткани со степенью резекции в общей выборке может объясняться наличием в ней конвексимальных менингиом, при удалении которых консистенция опухоли не так важна, как наличие границ между опухолью и прилежащими областями коры головного мозга. В свою очередь, образования базаль-

ной локализации чаще обрастают критически значимые сосуды и невральные структуры или прилежат к таковым, вследствие чего опухоль более жесткой консистенции с меньшей вероятностью будет удалена тотально [14]. Для целей сопоставления данных разных работ и коллективов, придания интраоперационной характеристике большей объективности предлагаются классификации консистенции опухолей. Существует 5-балльная классификация консистенции менингиом, представленная Zada et al., которая включает общее описание, оценку капсулы и характеристику инструментов, использованных для удаления опухоли. Помимо принятия во внимание гетерогенности ткани образования и создания базы для совершенствования клинических алгоритмов принятия решений, классификация позволяет решить задачу облегчения проведения исследований, включающих сопоставление интраоперационных характеристик с данными методов нейрорентгенологии [15]. Классификация Murphy et al. имеет сходную 5-балльную структуру, однако представляется более простой, содержит меньше определяющих признаков [16]. Попытки предсказания консистенции интракраниальных опухолей по МР-данным предпринимались не только до появления МРЭ, но и параллельно с эластографическими исследованиями [14]. Так, например, Pierallini et al. в исследовании макроаденом гипофиза выявили наибольшие значения измеряемого коэффициента диффузии в группе с более жесткими опухолями и, наоборот, наименьшие его значения в группе с опухолями мягкой структуры. Согласно патоморфологическим данным, менее жесткие аденомы имели наибольшую плотноклеточность и наименьшее содержание коллагена, а более жесткие аденомы имели противоположные характеристики [17]. Данный результат подтверждает, что не всегда понятие «плотный» по отношению к ткани образования является синонимом понятия «жесткий». В связи с этим, необходимость изучения МРЭ в оценке консистенции интракраниальных образований не вызывает сомнений.

Визуализация менингиом, шванном, аденом гипофиза.

Преимуществом МРЭ является визуализация не косвенных параметров, зависящих от свойств ткани, но собственно биомеханических характеристик и предоставление информации, недоступной при применении других методик МРТ. В одной из первых работ, выполненных Xu et al., в небольшой (6) группе пациентов показано качественное (без приведения статистических расчетов)

соответствие жесткости интракраниальных опухолей (менингиом, гемангиоперицитомы, шванномы) консистенции, определенной интраоперационно [18]. Murphy et al. выявили значимые прямые корреляции рассчитанной по данным МРЭ и определенной интраоперационно жесткости интракраниальных менингиом ($R_s=0,65$, $p=0,023$), при этом нормированные на мозговое вещество показатели жесткости характеризовались более значимым и высоким коэффициентом корреляции ($R_s=0,77$, $p=0,0032$). Корреляция интраоперационных данных с данными МРЭ была более выражена, чем с предположениями о жесткости опухоли на основе интенсивности МР-сигнала по T1- и T2-ВИ. Авторы обращают внимание, что сигнальные характеристики структурных МРТ имеют большую диагностическую ценность в нечастых случаях менингиом либо очень мягкой, либо очень жесткой структуры, но утрачивают диагностическую силу в группе опухолей «промежуточной» жесткости, в то время как МРЭ сохраняет её [16]. Наиболее крупное по объему выборки исследование, включавшее только пациентов с менингиомами ($n=88$, число опухолей – 89), было опубликовано Shi et al. в 2022 году. Продемонстрированы корреляции ($p<0,001$) между сдвиговой жесткостью (величиной комплексного модуля сдвига) и выявленной интраоперационно консистенцией опухоли ($R_s=0,748$), плотноклеточностью ($R_s=0,618$), содержанием коллагена ($R_s=0,768$). Методика позволяла дифференцировать мягкие и жесткие опухоли, а также мягкие и жесткие участки в пределах опухоли (AUC 0,879, пороговое значение 5,1 кПа, чувствительность – 83,6%, специфичность – 85,7%). Выявлены значимые различия жесткости между менингиомами grade 1 и 2 (выше при grade 2), но не между grade 1 и 3 или grade 2 и 3. Жесткость менинготелиоматозных менингиом была ниже по сравнению с переходными или фибробластическими. Жесткость единичных ангиоматозных менингиом была невысокой. Авторы отмечали недооценку жесткости в группе менингиом <2 см, при размере 2-2,5 мм недооценивалась периферическая часть [19].

На рисунках 4-6 приведены примеры наших собственных наблюдений менингиом супра- и инфратенториальной локализации с результатами МРЭ (картами сдвиговой жесткости).

В исследовании Sakai et al. средняя и максимальная сдвиговая жесткости менингиом были выше, чем сдвиговая жесткость аденом гипофиза. Следует отметить, что в исследование были включены менингиомы

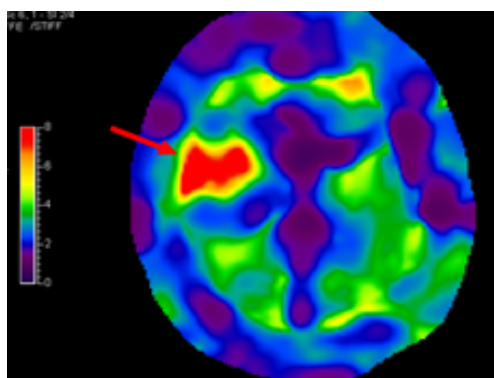


Рис. 4 а (Fig. 4 а)

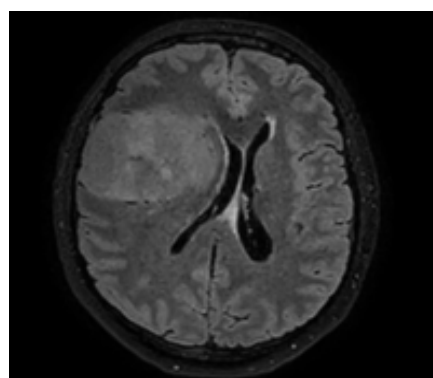


Рис. 4 б (Fig. 4 б)

Рис. 4. А – карта сдвиговой жёсткости (эластограмма), шкала приведена в кПа. Б – режим T2-FLAIR, аксиальная плоскость.

Пациент 24 лет, мужчина. Атипичическая менингиома, grade 2, правой лобно-височной области. Отмечается повышение жесткости в центральных и конвексительных отделах опухоли (красная стрелка). Интраоперационно опухоль была кровотоочивой, разнородной с петрификатами, тяжистой консистенции. Выполнено уменьшение внутреннего объема гигантской опухоли с помощью ультразвукового деструктора-аспиратора, опухолевых кусачек с поэтапной коагуляцией. По данным морфологического исследования отмечается присутствие участков выраженного фиброза стромы.

Fig. 4. А – shear stiffness map (elastogram), scale presented in kPa. Б –T2-FLAIR, axial plane.

Male patient, 24 years old. Atypical meningioma (WHO grade 2) of the right frontotemporal region. Notably, central and convexital parts (red arrow) of the tumor show increased stiffness. Intraoperatively, the tumor was hemorrhagic and heterogeneous, with calcifications and a dense, fibrous consistency. Reduction of the internal volume of this giant tumor was performed using an ultrasonic cavitation device, tumor forceps, and stepwise coagulation. Morphological examination revealed areas of pronounced stromal fibrosis..

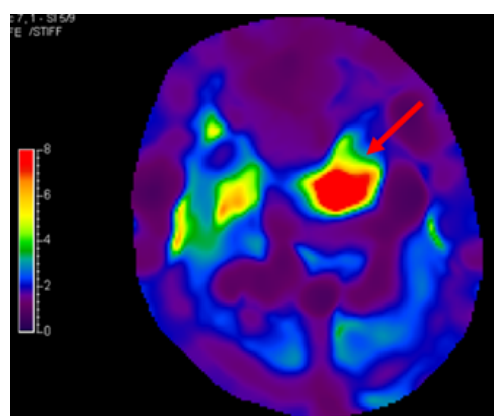


Рис. 5 а (Fig. 5 а)

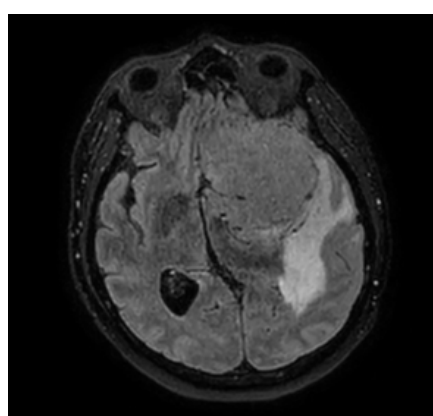


Рис. 5 б (Fig. 5 б)

Рис. 5. А – карта сдвиговой жёсткости (эластограмма), шкала приведена в кПа. Б – режим T2-FLAIR, аксиальная плоскость.

Пациент 61 года, мужчина. Менингиома смешанного типа, grade 1, крыльев основной кости слева с прорастанием в левый кавернозный синус, селлярную область, заднюю черепную ямку слева. Определяется участок повышенной жесткости в медиальных отделах образования (красная стрелка), интраоперационно была получена плотная тяжистая ткань.

Fig. 5. А – shear stiffness map (elastogram), scale presented in kPa. Б –T2-FLAIR, axial plane.

Male patient, 61 years old. Mixed left sphenoid wing meningioma (WHO grade 1) with invasion into the left cavernous sinus, sellar region, and left posterior cranial fossa. Remarkably, there is a region of increased stiffness in the medial part of the lesion (red arrow); intraoperatively, dense fibrous tissue was obtained.

множественных локализаций, среди которых анте- и параселлярные были единичными. Данные о корреляции с интраоперационными данными были противоречивыми – средняя жесткость не показала значимой корреляции с консистенцией опухоли, определенной хирургом по 5-балльной шкале Murphy et al. [16], однако была выявлена слабая корреляция ($R_s=0,25$) для максимальной жесткости. Исследовались также вестибулярные шванномы и глиомы. При анализе всей выборки корреляции с консистенцией опухолевой ткани были выявлены как для средней ($R_s=0,31$), так и для максимальной ($R_s=0,34$) сдвиговой жесткости, а значения данного эластографического показателя различались при сравнении группы «мягких» (1-3 по шкале) и «жестких» (4-5 по шкале) опухолей [20]. Hughes et al. выявили различие средней сдвиговой жесткости между макроаденомами гипофиза мягкой и средней консистенции (опухолей с высокой жесткостью в выборке не было). На этапе набора пациентов

была выявлена опухоль хиазмально-селлярной области с повышением жесткости – впоследствии была подтверждена метастатическая её природа [21].

Различия в жесткости на границе сред имеют перспективы для оценки степени опухолевой инвазии (визуализация смещаемости тканевых границ или «границы проскальзывания» – slip interface imaging). Граница проскальзывания отражается как резкое изменение амплитуды волны в зоне контакта опухоли и мозга. Образования без признаков инвазии, имеющие четкий контур, формируют выраженную границу проскальзывания, где слои тканей могут свободно смещаться друг относительно друга. Прорастая в прилежащую ткань, опухоли создают жесткую механическую связь, подавляя данное проскальзывание. Обеспечить визуализацию границ проскальзывания позволяет измерение октаэдрической деформации сдвига (octahedral shear strain, OSS), которая максимально проявляется именно на механиче-

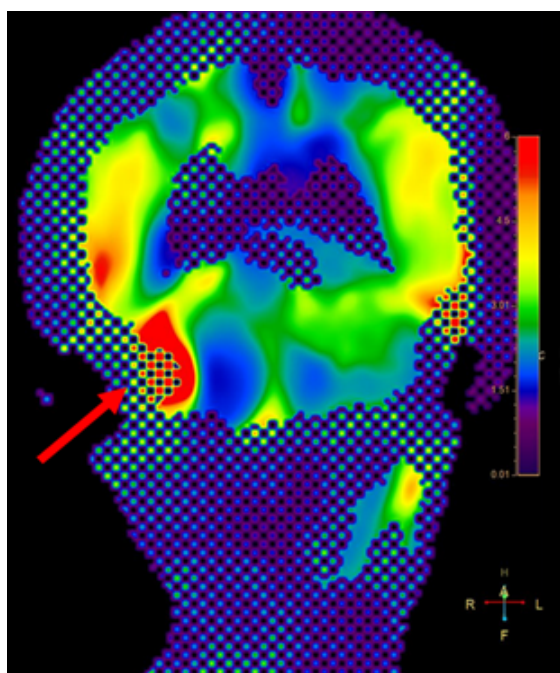


Рис. 6 а (Fig. 6 a)

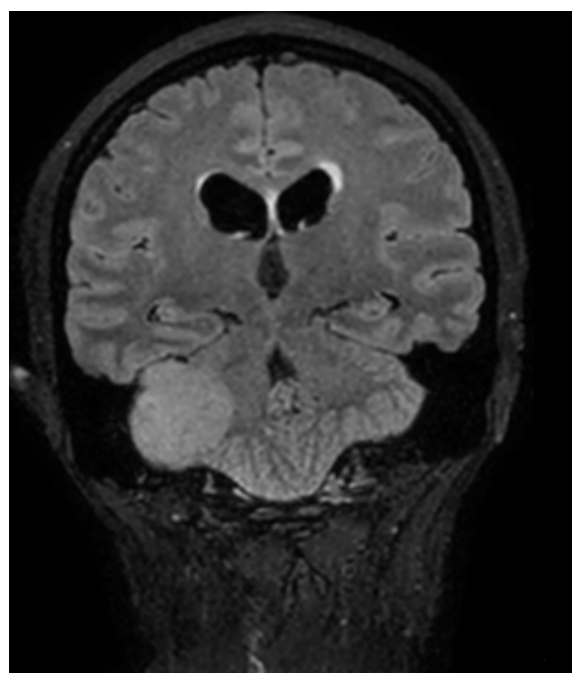


Рис. 6 б (Fig. 6 b)

Рис. 6. А – карта сдвиговой жёсткости (эластограмма), шкала приведена в кПа. Б – режим T2-FLAIR, корональная плоскость.

Пациент 49 года, женщина. Менингиома смешанного типа, grade 1, задней поверхности пирамиды правой височной кости. Обращает внимание участок повышенной жесткости (красная стрелка), при сопоставлении с интраоперационными данными соответствует наиболее плотному участку опухоли.

Fig. 6. А – shear stiffness map (elastogram), scale presented in kPa. Б – T2-FLAIR, coronal plane.

Female patient, 49 years old. Mixed meningioma (WHO grade 1) located on the posterior surface of the petrous part of the right temporal bone. The region of increased stiffness (red arrow) intraoperatively corresponded to the densest part of the tumor.

ски неоднородных границах. OSS позволяет прогнозировать инвазивность менингиом и адгезии вестибулярных шванном к прилежащим мозговым структурам [22, 23].

Вышеописанные работы, давая представление о возможностях предоперационной оценки экстрааксиальных опухолей при помощи МРЭ, тем не менее, не учитывали результаты проведенных оперативных вмешательств. Duhon et al. проследили исходы хирургического лечения вестибулярных шванном (16) и менингиом (4) мостомозжечкового угла в зависимости от жесткости опухолевой ткани. 9 шванном были макрокистозными, остальные шванномы и менингиомы были солидными. Жесткость ткани образования, определенная по данным МРЭ, коррелировала с жесткостью, оцененной хирургом интраоперационно в соответствии с настройками ультразвукового деструктора-аспиратора. Большая жесткость опухолей коррелировала с более частой дисфункцией черепных нервов каудальной группы (IX-XII) в послеоперационном периоде. Также более выраженная дисфункция лицевого нерва в отсроченном периоде после оперативного вмешательства отмечалась при удалении более жестких опухолей. При этом было исключено влияние на вероятность послеоперационной дисфункции лицевого нерва таких факторов, как объем опухоли и операционный доступ. В подгруппе опухолей с субтотальным объемом резекции жесткость ткани была выше (по сравнению с тотальной или и практически тотальной резекцией). Менингиомы имели тенденцию к более жесткой консистенции по сравнению с шванномами (различия не были статистически значимыми). В более жестких шванномах выявлялся больший уровень коллагена, гиалуронана, альфа-мышечного актина, что свидетельствует о более выраженной активности фибробластов, а также инфильтрации иммуносупрессивными M2-макрофагами [24]. На основании результатов исследования можно предположить, что использование данных МРЭ при планировании объема оперативного лечения может снизить вероятность интра- и послеоперационных осложнений.

Визуализация внутримозговых опухолей. Сравнительные исследования.

Ряд исследований МРЭ касается интракраниальных опухолей внутримозговой локализации. В данной области высокую актуальность сохраняет поиск дифференциально-диагностических маркеров глиальных опухолей, метастазов и лимфом, а также исследование инфильтративного роста глиом, невидимого на стандартных МРТ. В одной из

первых работ по теме Streitberger et al. использовали многочастотную (30-60 Гц) МРЭ с двухкомпонентной инверсией вязкоупругих свойств тканей (3D multifrequency MR-elastography with dual elasto-visco inversion) с определением не только величины комплексного модуля сдвига, но и фазового угла ϕ , пропорционального вязкостным свойствам ткани [25]. Было выявлено, что ткань глиобластом, как правило, характеризуется снижением величины комплексного модуля сдвига (за небольшим исключением) и повышением ϕ (вязкостных свойств). В пределах наиболее гомогенной по данным структурных МРТ части опухоли значения жесткости не характеризовались значимым снижением, однако определялось снижение ϕ , что делает вязкостные свойства глиальных опухолей более чувствительным биомаркером. В исследовании также выделялась «перифокальная зона», которая, вероятно, отражала ближайшее к опухолевой ткани измененное вещество, но не затрагивало зону отека-инфильтрации (по мнению нашего коллектива, вся зона T2-FLAIR-гиперинтенсивности вне контрастируемой части опухоли трактуется как перифокальная зона или зона отека-инфильтрации [26], в то время как в указанной работе перифокальная зона и зона отека разделяются). Перифокальная зона характеризовалась более высокими значениями ϕ , чем ядро опухоли, однако значения жесткости не различались. Зона отека характеризовалась большей жесткостью, чем ядро опухоли, но не отличалась по показателю ϕ [25]. В дальнейшем Reiss-Zimmermann et al. сопоставили вязкоупругие свойства различных образований, большая часть которых в выборке были внутримозговыми (11 пациентов с глиобластомами, 4 пациента с анапластическими астроцитомами, 5 пациентов с метастазами), в то время как менингиомы составляли меньшую часть выборки (7 пациентов). Несмотря на существенное перекрытие размаха данных, менингиомы имели тенденцию к более жесткой консистенции по сравнению с белым веществом, а глиомы и метастазы – к более мягкой. По мере повышения степени злокачественности жесткость глиом снижалась. Менингиомы имели большие нормированные на белое вещество значения фазового угла ϕ (во всех случаях данное отношение было больше 1), то есть были более вязкими. Глиомы и метастазы имели значения отношения ϕ к веществу мозга меньше 1 [27]. В целом, сходные закономерности были показаны Simon et al. [28]. Reiss-Zimmermann et al. приводят единичный пример абсцесса мозга, который характери-

зовался низким показателем жесткости и вязкостью, едва заметно большей по сравнению с веществом мозга [27]. В противоположность этому, Sakai et al. описывают в кистозной части глиальной опухоли наибольшие значения сдвиговой жесткости, связывая природу этого феномена с имеющимся за счет содержимого напряжением или артефактом [20]. Аналогичный феномен был описан и при кистозной опухоли хиазмально-селлярной области [21]. В единичном описанном случае МРЭ лимфомы ткань образования практически не отличалась по величине комплексного модуля сдвига от визуально интактного белого вещества мозга, несмотря на типично высокую плотноклеточность. Данный факт в очередной раз подтверждает различие вязкоупругих свойств и плотности ткани. Низкое значение фазового угла ϕ может говорить о невыраженных связях между клетками.

К вышеописанным изменениям вязкоупругих свойств глиальных опухолей могут приводить клеточная пролиферация, ангиогенез, фиброз и некроз, а также формирование кист. Уменьшение жесткости ткани при развитии глиом может быть связано с уменьшением связей между тканевыми компонентами в строме. Perin et al. выявили снижение величины комплексного модуля сдвига в глиомах высокой степени злокачественности по сравнению с глиомами низкой степени злокачественности, а также в глиомах grade 4 по сравнению с grade 2. Различий между опухолями grade 2 и grade 3, а также grade 3 и grade 4 выявлено не было. IDH1-мутантные глиомы имели более жесткую консистенцию, чем опухоли дикого типа [29]. Причины различия оцененной по МРЭ консистенции глиом разного IDH1-статуса представляются не до конца ясными и в некоторой степени не согласуются с данными иммуногистохимического и молекулярного исследований, вследствие чего требуют более детального изучения [30]. Хаотический и быстрый рост опухоли уменьшает анизотропию и снижает вязкоупругие свойства ткани. Развитие некротических изменений приводит к более жидкой структуре опухоли, снижению как вязкости, так и упругости [31].

Фундаментальный и прикладной интерес имеет исследование таких важных процессов патогенеза глиом, как неопластический и инфильтрация визуально интактного мозгового вещества [32–34]. Сложность и многогранность лежащих в их основе факторов диктует необходимость одновременного изучения данных разных методик. Svensson et

al. при совместном изучении эластографических, диффузионных и перфузионных данных, помимо согласующихся с ранее выявленными закономерностями о снижении упругости и вязкости в глиомах, выявили ассоциацию относительно низких показателей жесткости с высоким кровотоком по данным перфузии, взвешенной по магнитной восприимчивости с динамическим контрастным усилением. Добавление эластографических параметров повышало способность модели на основе диффузионных изображений предсказывать перфузию. Одним из механизмов повышения кровотока в участках со сниженными вязкоупругими показателями может быть уменьшение компрессии сосудистых структур. В свою очередь, строение сосудистой сети также может оказывать влияние на консистенцию опухолевой ткани [35].

Для повышения надежности суждений данные множественных исследований были суммированы в систематических обзорах и мета-анализах. Bunevicius et al., объединив данные по 5 исследованиям (107 пациентов), определили, что наименьшее перекрытие наблюдалось между менингиомами и глиобластомами (фазовый угол ϕ и G'' соответственно), а также между менингиомами и метастазами (G''). У 63 пациентов из общего пула было возможно вычлест данные для белого вещества из данных для опухолей (Δ). $\Delta|G^*|$ были значимо выше в менингиомах по сравнению с глиомами низкой степени злокачественности и метастазами. Более высокие значения $\Delta\phi$ и $\Delta G''$ отмечались в менингиомах по сравнению с глиобластомами, анапластическими астроцитомами, глиомами низкой степени злокачественности и метастазами [5]. Kumarapuram et al. представили мета-анализ и систематический обзор 8 исследований опухолей высокой (92 пациента) и низкой (84 пациента) степеней злокачественности на основе МРЭ и ультразвуковой эластографии сдвиговой волной (часть выборки была представлена пациентами с менингиомами, однако их количество не упоминается). Нормирование показателей на визуально интактное вещество мозга не проводилось, что снижает достоверность результатов в силу различия методик, в том числе частот стимуляции. Глиомы высокой степени злокачественности были менее жесткими, чем глиомы низкой степени злокачественности, что подтверждает данные отдельных исследований. Разница жесткости между опухолями различной степени злокачественности снижалась с возрастом, что, предположительно, может быть связано со снижением жесткости ткани головного мозга в це-

лом. В более современных публикациях продемонстрированы различия большей выраженности, что, вероятно, связано с совершенствованием методик [36]. Менее вязкая консистенция глиом высокой степени злокачественности и глиом в целом по сравнению с менингиомами может быть связана с доминированием во внеклеточном матриксе гликозаминогликанов, повышающих инфильтративный потенциал, в то время как матрикс менингиом представлен преимущественно коллагеном, стабилизирующим структуру опухоли [37].

Заключение.

Область возможного будущего применения МРЭ представляется достаточно специализированной. Наиболее подтвержденной в настоящее время является способность метода предполагать консистенцию опухолей, преимущественно немозговых, для лучшего планирования тактики лечения, в первую очередь, резектабельности глубинно расположенных опухолей основания черепа, а также изучения инвазии прилежащих структур. Перекрывающиеся значения жесткости между внутримозговыми опухолями препятствуют дифференциальной диагностике, в то время как различия эластографических признаков между менингиомами и внутримозговыми опухолями (глиомами и метастазами) не представляются широко востребованными в клинической практике (вместе с тем, сравнение менингиом с дуральными метастазами или лимфомами не проводилось). Перспективным является поиск комбинаций МРЭ с другими методами и модальностями нейровизуализации [38]. Имеет смысл изучение изменения характеристик опухолей на фоне лечения, в том числе лучевого [39], однако необходимо принимать во внимание факт, что консистенция внутримозговых опухолей может изменяться в динамике и без влияния внешних факторов [40].

Следует также суммировать недостатки метода МРЭ. Возможно снижение точности

определения значений жесткости опухолей небольшого размера. Измеряемые показатели зависят от параметров сканирования (напряженность магнитного поля, различные импульсные последовательности), типов драйверов и частоты колебаний, методик регистрации и постобработки данных [5, 25]. Одним из наиболее очевидных решений является нормирование показателей на визуально интактно вещество мозга или вычитание показателей интактно вещества. Для большей согласованности интраоперационных данных имеет смысл использовать более распространенные, но также и объективизированные шкалы [15, 16].

Таким образом, МРЭ является перспективным инструментом «нишевой» диагностики, который требует дополнительных исследований и стандартизации.

Список сокращений.

МРЭ – магнитно-резонансная эластография

ФА – фракционная анизотропия

AUC – area under curve – площадь под ROC-кривой

GRE – gradient echo – градиентное эхо

MEG – motion-encoding gradient – градиент кодирования движения

OSS – octahedral shear strain – октаэдрическая деформация сдвига

SE – spin echo – спиновое эхо

SE-EPI – spin echo echo planar imaging – спиновое эхо с эхопланарным считыванием

TR – repetition time – время повторения

Источник финансирования и конфликт интересов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-559 от 11 июня 2025 г.).

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Toman R.A., Abdulsattar O.A., Kadhim S.H. Role of ultrasound elastography in classification of thyroid nodule in comparison with histopathology. *REJR*. 2024; 14(3): 32-44. DOI:10.21569/2222-7415-2024-14-3-32-44.
2. Гаждонова В.Е., Зубарев А.В., Пулатова И.З. Инновационные подходы в диагностике очаговых образований молочной железы категории BI-RADS 3-4: роль и перспективы интеграции ультразвукового исследования с контрастированием и эластографией. *REJR*. 2025; 15(1): 107-118. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-1-107-118.
3. Марущак Е.А., Фисенко Е.П., Зубарева Е.А. Анализ ре-

зультатов стратификации новообразований молочных желез по данным ультразвукового исследования с применения искусственного интеллекта: стоит ли полагаться на «мнение машины»? *REJR*. 2025; 15(3): 126-141. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-3-126-141.

4. Burhan S., Detrez N., Rewerts K., Strenge P., Buschschlütter S., Kren J., et al. Phase unwrapping for MHz optical coherence elastography and application to brain tumor tissue. *Biomed Opt Express*. 2024; 15(2): 1038-1058. DOI:10.1364/boe.510020.

5. Bunevicius A., Schregel K., Sinkus R., Golby A., Patz S.

- REVIEW: MR elastography of brain tumors. *Neuroimage Clin.* 2020; 25(102109). DOI:10.1016/j.nicl.2019.102109.
6. Lee S., Joo B., Park M., Ahn S.J., Suh S.H. Magnetic Resonance Elastography for Clinicians and Researchers Unfamiliar With the Field. *Investig Magn Reson Imaging.* 2023; 27(4): 182-195.
 7. Manduca A., Bayly P.J., Ehman R.L., Kolipaka A., Royston T.J., Sack I., et al. MR elastography: Principles, guidelines, and terminology. *Magn Reson Med.* 2021; 85(5): 2377-2390. DOI:10.1002/mrm.28627.
 8. Chaze C.A., McIlvain G., Smith D.R., Villiermaux G.M., Delgado P.L., Wright H.G., et al. Altered brain tissue viscoelasticity in pediatric cerebral palsy measured by magnetic resonance elastography. *Neuroimage Clin.* 2019; 22(101750). DOI:10.1016/j.nicl.2019.101750.
 9. Hiscox L.V., Johnson C.L., Barnhill E., McGarry M.D., Huston J., van Beek E.J., et al. Magnetic resonance elastography (MRE) of the human brain: technique, findings and clinical applications. *Phys Med Biol.* 2016; 61(24): R401-r437. DOI:10.1088/0031-9155/61/24/r401.
 10. Fehner A., Papazoglou S., McGarry M.D., Paulsen K.D., Guo J., Streitberger K.J., et al. Cerebral multifrequency MR elastography by remote excitation of intracranial shear waves. *NMR Biomed.* 2015; 28(11): 1426-1432. DOI:10.1002/nbm.3388.
 11. Fattahi N., Arani A., Perry A., Meyer F., Manduca A., Glaser K., et al. MR Elastography Demonstrates Increased Brain Stiffness in Normal Pressure Hydrocephalus. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2016; 37(3): 462-467. DOI:10.3174/ajnr.A4560.
 12. Muthupillai R., Lomas D.J., Rossman P.J., Greenleaf J.F., Manduca A., Ehman R.L. Magnetic resonance elastography by direct visualization of propagating acoustic strain waves. *Science.* 1995; 269(5232): 1854-1857. DOI:10.1126/science.7569924.
 13. Little K.M., Friedman A.H., Sampson J.H., Wanibuchi M., Fukushima T. Surgical management of petroclival meningiomas: defining resection goals based on risk of neurological morbidity and tumor recurrence rates in 137 patients. *Neurosurgery.* 2005; 56(3): 546-559; discussion 546-559. DOI:10.1227/01.neu.0000153906.12640.62.
 14. Sauvigny T., Rieckels F.L., Hoffmann L., Schwarz R., Westphal M., Schmidt N.O. Features of tumor texture influence surgery and outcome in intracranial meningioma. *Neurooncol Adv.* 2020; 2(1): vdaa113. DOI:10.1093/oaajnl/vdaa113.
 15. Zada G., Yashar P., Robison A., Winer J., Khalessi A., Mack W.J., et al. A proposed grading system for standardizing tumor consistency of intracranial meningiomas. *Neurosurg Focus.* 2013; 35(6): E1. DOI:10.3171/2013.8.Focus13274.
 16. Murphy M.C., Huston J., 3rd, Glaser K.J., Manduca A., Meyer F.B., Lanzino G., et al. Preoperative assessment of meningioma stiffness using magnetic resonance elastography. *J Neurosurg.* 2013; 118(3): 643-648. DOI:10.3171/2012.9.Jns12519.
 17. Pierallini A., Caramia F., Falcone C., Tinelli E., Paonessa A., Ciddio A.B., et al. Pituitary macroadenomas: preoperative evaluation of consistency with diffusion-weighted MR imaging-initial experience. *Radiology.* 2006; 239(1): 223-231. DOI:10.1148/radiol.2383042204.
 18. Xu L., Lin Y., Han J.C., Xi Z.N., Shen H., Gao P.Y. Magnetic resonance elastography of brain tumors: preliminary results. *Acta Radiol.* 2007; 48(3): 327-330. DOI:10.1080/02841850701199967.
 19. Shi Y., Huo Y., Pan C., Qi Y., Yin Z., Ehman R.L., et al. Use of magnetic resonance elastography to gauge meningioma intratumoral consistency and histotype. *Neuroimage Clin.* 2022; 36(103173). DOI:10.1016/j.nicl.2022.103173.
 20. Sakai N., Takehara Y., Yamashita S., Ohishi N., Kawaji H., Sameshima T., et al. Shear Stiffness of 4 Common Intracranial Tumors Measured Using MR Elastography: Comparison with Intraoperative Consistency Grading. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2016; 37(10): 1851-1859. DOI:10.3174/ajnr.A4832.
 21. Hughes J.D., Fattahi N., Van Gompel J., Arani A., Ehman R., Huston J., 3rd. Magnetic resonance elastography detects tumoral consistency in pituitary macroadenomas. *Pituitary.* 2016; 19(3): 286-292. DOI:10.1007/s11102-016-0706-5.
 22. Huang R.Y., Bi W.L., Griffith B., Kaufmann T.J., la Fougère C., Schmidt N.O., et al. Imaging and diagnostic advances for intracranial meningiomas. *Neuro Oncol.* 2019; 21(Suppl 1): i44-i61. DOI:10.1093/neuonc/noy143.
 23. Yin Z., Glaser K.J., Manduca A., Van Gompel J.J., Link M.J., Hughes J.D., et al. Slip Interface Imaging Predicts Tumor-Brain Adhesion in Vestibular Schwannomas. *Radiology.* 2015; 277(2): 507-517. DOI:10.1148/radiol.2015151075.
 24. Duhon B.H., Thompson K., Fisher M., Kaul V.F., Nguyen H.T.N., Harris M.S., et al. Tumor biomechanical stiffness by magnetic resonance elastography predicts surgical outcomes and identifies biomarkers in vestibular schwannoma and meningioma. *Scientific Reports.* 2024; 14(1): 14561. DOI:10.1038/s41598-024-64597-1.
 25. Streitberger K.J., Reiss-Zimmermann M., Freimann F.B., Bayerl S., Guo J., Arlt F., et al. High-resolution mechanical imaging of glioblastoma by multifrequency magnetic resonance elastography. *PLoS One.* 2014; 9(10): e110588. DOI:10.1371/journal.pone.0110588.
 26. Zakharaeva N.E., Batalov A.I., Pogosbekian E.L., Chekhonin I.V., Goryaynov S.A., Bykanov A.E., et al. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers (Basel).* 2023; 15(10): DOI:10.3390/cancers15102760.
 27. Reiss-Zimmermann M., Streitberger K.J., Sack I., Braun J., Arlt F., Fritzsche D., et al. High Resolution Imaging of Viscoelastic Properties of Intracranial Tumours by Multi-Frequency Magnetic Resonance Elastography. *Clin Neuroradiol.* 2015; 25(4): 371-378. DOI:10.1007/s00062-014-0311-9.
 28. Simon M., Guo J., Papazoglou S., Scholand-Engler H., Erdmann C., Melchert U., et al. Non-invasive characterization of intracranial tumors by magnetic resonance elastography. *New J. Phys.* 2013; 15: 085024.
 29. Pepin K.M., McGee K.P., Arani A., Lake D.S., Glaser K.J., Manduca A., et al. MR Elastography Analysis of Glioma Stiffness and IDH1-Mutation Status. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2018; 39(1): 31-36. DOI:10.3174/ajnr.A5415.
 30. Miroshnikova Y.A., Mouw J.K., Barnes J.M., Pickup M.W., Lakins J.N., Kim Y., et al. Tissue mechanics promote IDH1-dependent HIF1a-tenascin C feedback to regulate glioblastoma aggression. *Nat Cell Biol.* 2016; 18(12): 1336-1345. DOI:10.1038/ncb3429.

31. Hangel G., Schmitz-Abecassis B., Sollmann N., Pinto J., Arzanforoosh F., Barkhof F., et al. Advanced MR Techniques for Preoperative Glioma Characterization: Part 2. *J Magn Reson Imaging*. 2023; 57(6): 1676-1695. DOI:10.1002/jmri.28663.

32. Постнов А.А., Баталов А.И., Калаева Д.Б., Тюрина А.Н., Захарова Н.Е., Пронин И.Н. Новый подход к оценке кровотока глиом по данным ПЭТ-КТ с 11С-метионином. Сравнение с КТ и ASL МР-перфузионными исследованиями. *REJR*. 2023; 13(4): 36-43. DOI:10.21569/2222-7415-2023-13-4-36-43.

33. Чехонин И.В., Баталов А.И., Погосбемян Э.А., Тюрина А.Н., Галстян С.А., Быканов А.Е. и др. Исследование не-контрастируемых диффузных глиом головного мозга по данным МР-релаксометрии, диффузионно-куртозисных изображений и ASL-перфузии с применением интраоперационной нейронавигации: оценка гетерогенности опухолевой структуры и поиск визуализационных предикторов пролиферативной активности. *REJR*. 2025; 15(2): 109-119. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-2-109-119.

34. Garcia-Lezama M., Teran-Davila E., Moreno-Jimenez S., Roldan-Valadez E., Ternovoy S.K. Quantitative MRI biomarkers in glioblastoma: an updated review about physiopathology, WHO CNS5 classification and clinical applications. *REJR*. 2025; 15(3): 6-21. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-3-6-21.

35. Fløgstad Svensson S., Fuster-Garcia E., Latysheva A., Fraser-Green J., Nordhøy W., Isam Darwish O., et al. De-

creased tissue stiffness in glioblastoma by MR elastography is associated with increased cerebral blood flow. *Eur J Radiol*. 2022; 147(110136). DOI:10.1016/j.ejrad.2021.110136.

36. Kumarapuram S., Yu R., Manchiraju P., Attard C., Escamilla J., Navin A., et al. Applying Shear Wave and Magnetic Resonance Elastography to Grade Brain Tumors: Systematic Review and Meta-Analysis. *World Neurosurg*. 2023; 178(e147-e155). DOI:10.1016/j.wneu.2023.07.014.

37. Streitberger K.J., Lilaj L., Schrank F., Braun J., Hoffmann K.T., Reiss-Zimmermann M., et al. How tissue fluidity influences brain tumor progression. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020; 117(1): 128-134. DOI:10.1073/pnas.1913511116.

38. Takamura T., Motosugi U., Ogiwara M., Sasaki Y., Glaser K.J., Ehman R.L., et al. Relationship between Shear Stiffness Measured by MR Elastography and Perfusion Metrics Measured by Perfusion CT of Meningiomas. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2021; 42(7): 1216-1222. DOI:10.3174/ajnr.A7117.

39. Pepin K.M., Chen J., Glaser K.J., Mariappan Y.K., Reuland B., Ziesmer S., et al. MR elastography derived shear stiffness—a new imaging biomarker for the assessment of early tumor response to chemotherapy. *Magn Reson Med*. 2014; 71(5): 1834-1840. DOI:10.1002/mrm.24825.

40. Feng Y., Clayton E.H., Okamoto R.J., Engelbach J., Bayly P.V., Garbow J.R. A longitudinal magnetic resonance elastography study of murine brain tumors following radiation therapy. *Phys Med Biol*. 2016; 61(16): 6121-6131. DOI:10.1088/0031-9155/61/16/6121.

References:

1. Toman R.A., Abdulsattar O.A., Kadhim S.H. Role of ultrasound elastography in classification of thyroid nodule in comparison with histopathology. *REJR*. 2024; 14(3): 32-44. DOI:10.21569/2222-7415-2024-14-3-32-44.
2. Gazonova V.E., Zubarev A.V., Pulatova I.Z. Innovative approaches in the diagnosis of focal breast lesions BI-RADS 3-4: role and prospects of integrating contrast-enhanced ultrasound and elastography. *REJR*. 2025; 15(1): 107-118. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-1-107-118 (in Russian).
3. Marushchak E.A., Fisenko E.P., Zubareva E.A. Analysis of the results of breast neoplasm stratification based on ultrasound data using artificial intelligence: is it worth relying on the "machine opinion"? *REJR*. 2025; 15(3): 126-141. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-3-126-141 (in Russian).
4. Burhan S., Detrez N., Rewerts K., Strenge P., Buschschlüter S., Kren J., et al. Phase unwrapping for MHz optical coherence elastography and application to brain tumor tissue. *Biomed Opt Express*. 2024; 15(2): 1038-1058. DOI:10.1364/boe.510020.
5. Bunevicius A., Schregel K., Sinkus R., Golby A., Patz S. REVIEW: MR elastography of brain tumors. *Neuroimage Clin*. 2020; 25(102109). DOI:10.1016/j.nicl.2019.102109.
6. Lee S., Joo B., Park M., Ahn S.J., Suh S.H. Magnetic Resonance Elastography for Clinicians and Researchers Unfamiliar With the Field. *Investig Magn Reson Imaging*. 2023; 27(4): 182-195.
7. Manduca A., Bayly P.J., Ehman R.L., Kolipaka A., Royston T.J., Sack I., et al. MR elastography: Principles, guidelines, and terminology. *Magn Reson Med*. 2021; 85(5): 2377-2390. DOI:10.1002/mrm.28627.
8. Chaze C.A., McIlvain G., Smith D.R., Villiermaux G.M., Delgorio P.L., Wright H.G., et al. Altered brain tissue viscoelasticity in pediatric cerebral palsy measured by magnetic resonance elastography. *Neuroimage Clin*. 2019; 22(101750). DOI:10.1016/j.nicl.2019.101750.
9. Hiscox L.V., Johnson C.L., Barnhill E., McGarry M.D., Huston J., van Beek E.J., et al. Magnetic resonance elastography (MRE) of the human brain: technique, findings and clinical applications. *Phys Med Biol*. 2016; 61(24): R401-r437. DOI:10.1088/0031-9155/61/24/r401.
10. Fehlnner A., Papazoglou S., McGarry M.D., Paulsen K.D., Guo J., Streitberger K.J., et al. Cerebral multifrequency MR elastography by remote excitation of intracranial shear waves. *NMR Biomed*. 2015; 28(11): 1426-1432. DOI:10.1002/nbm.3388.
11. Fattahi N., Arani A., Perry A., Meyer F., Manduca A., Glaser K., et al. MR Elastography Demonstrates Increased Brain Stiffness in Normal Pressure Hydrocephalus. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2016; 37(3): 462-467. DOI:10.3174/ajnr.A4560.
12. Muthupillai R., Lomas D.J., Rossman P.J., Greenleaf J.F., Manduca A., Ehman R.L. Magnetic resonance elastography by direct visualization of propagating acoustic strain waves. *Science*. 1995; 269(5232): 1854-1857. DOI:10.1126/science.7569924.
13. Little K.M., Friedman A.H., Sampson J.H., Wanibuchi M., Fukushima T. Surgical management of petroclival meningiomas: defining resection goals based on risk of neurological morbidity and tumor recurrence rates in 137 patients. *Neurosurgery*. 2005; 56(3): 546-559; discussion 546-559. DOI:10.1227/01.neu.0000153906.12640.62.

14. Sauvigny T., Ricklefs F.L., Hoffmann L., Schwarz R., Westphal M., Schmidt N.O. Features of tumor texture influence surgery and outcome in intracranial meningioma. *Neurooncol Adv.* 2020; 2(1): vdaa113. DOI:10.1093/noonl/vdaa113.
15. Zada G., Yashar P., Robison A., Winer J., Khalessi A., Mack W.J., et al. A proposed grading system for standardizing tumor consistency of intracranial meningiomas. *Neurosurg Focus.* 2013; 35(6): E1. DOI:10.3171/2013.8.Focus13274.
16. Murphy M.C., Huston J., 3rd, Glaser K.J., Manduca A., Meyer F.B., Lanzino G., et al. Preoperative assessment of meningioma stiffness using magnetic resonance elastography. *J Neurosurg.* 2013; 118(3): 643-648. DOI:10.3171/2012.9.Jns12519.
17. Pierallini A., Caramia F., Falcone C., Tinelli E., Paonessa A., Ciddio A.B., et al. Pituitary macroadenomas: preoperative evaluation of consistency with diffusion-weighted MR imaging-initial experience. *Radiology.* 2006; 239(1): 223-231. DOI:10.1148/radiol.2383042204.
18. Xu L., Lin Y., Han J.C., Xi Z.N., Shen H., Gao P.Y. Magnetic resonance elastography of brain tumors: preliminary results. *Acta Radiol.* 2007; 48(3): 327-330. DOI:10.1080/02841850701199967.
19. Shi Y., Huo Y., Pan C., Qi Y., Yin Z., Ehman R.L., et al. Use of magnetic resonance elastography to gauge meningioma intratumoral consistency and histotype. *Neuroimage Clin.* 2022; 36(103173). DOI:10.1016/j.nicl.2022.103173.
20. Sakai N., Takehara Y., Yamashita S., Ohishi N., Kawaji H., Sameshima T., et al. Shear Stiffness of 4 Common Intracranial Tumors Measured Using MR Elastography: Comparison with Intraoperative Consistency Grading. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2016; 37(10): 1851-1859. DOI:10.3174/ajnr.A4832.
21. Hughes J.D., Fattahi N., Van Gompel J., Arani A., Ehman R., Huston J., 3rd. Magnetic resonance elastography detects tumoral consistency in pituitary macroadenomas. *Pituitary.* 2016; 19(3): 286-292. DOI:10.1007/s11102-016-0706-5.
22. Huang R.Y., Bi W.L., Griffith B., Kaufmann T.J., la Fougère C., Schmidt N.O., et al. Imaging and diagnostic advances for intracranial meningiomas. *Neuro Oncol.* 2019; 21(Suppl 1): i44-i61. DOI:10.1093/neuonc/noy143.
23. Yin Z., Glaser K.J., Manduca A., Van Gompel J.J., Link M.J., Hughes J.D., et al. Slip Interface Imaging Predicts Tumor-Brain Adhesion in Vestibular Schwannomas. *Radiology.* 2015; 277(2): 507-517. DOI:10.1148/radiol.2015151075.
24. Duhon B.H., Thompson K., Fisher M., Kaul V.F., Nguyen H.T.N., Harris M.S., et al. Tumor biomechanical stiffness by magnetic resonance elastography predicts surgical outcomes and identifies biomarkers in vestibular schwannoma and meningioma. *Scientific Reports.* 2024; 14(1): 14561. DOI:10.1038/s41598-024-64597-1.
25. Streitberger K.J., Reiss-Zimmermann M., Freimann F.B., Bayerl S., Guo J., Arlt F., et al. High-resolution mechanical imaging of glioblastoma by multifrequency magnetic resonance elastography. *PLoS One.* 2014; 9(10): e110588. DOI:10.1371/journal.pone.0110588.
26. Zakharova N.E., Batalov A.I., Pogosbekian E.L., Chekhonin I.V., Goryaynov S.A., Bykanov A.E., et al. Perifocal Zone of Brain Gliomas: Application of Diffusion Kurtosis and Perfusion MRI Values for Tumor Invasion Border Determination. *Cancers (Basel).* 2023; 15(10): DOI:10.3390/cancers15102760.
27. Reiss-Zimmermann M., Streitberger K.J., Sack I., Braun J., Arlt F., Fritzsche D., et al. High Resolution Imaging of Viscoelastic Properties of Intracranial Tumours by Multi-Frequency Magnetic Resonance Elastography. *Clin Neuroradiol.* 2015; 25(4): 371-378. DOI:10.1007/s00062-014-0311-9.
28. Simon M., Guo J., Papazoglou S., Scholand-Engler H., Erdmann C., Melchert U., et al. Non-invasive characterization of intracranial tumors by magnetic resonance elastography. *New J. Phys.* 2013; 15(10): 085024.
29. Pepin K.M., McGee K.P., Arani A., Lake D.S., Glaser K.J., Manduca A., et al. MR Elastography Analysis of Glioma Stiffness and IDH1-Mutation Status. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2018; 39(1): 31-36. DOI:10.3174/ajnr.A5415.
30. Miroshnikova Y.A., Mouw J.K., Barnes J.M., Pickup M.W., Lakins J.N., Kim Y., et al. Tissue mechanics promote IDH1-dependent HIF1a-tenascin C feedback to regulate glioblastoma aggression. *Nat Cell Biol.* 2016; 18(12): 1336-1345. DOI:10.1038/ncb3429.
31. Hangel G., Schmitz-Abecassis B., Sollmann N., Pinto J., Arzanforoush F., Barkhof F., et al. Advanced MR Techniques for Preoperative Glioma Characterization: Part 2. *J Magn Reson Imaging.* 2023; 57(6): 1676-1695. DOI:10.1002/jmri.28663.
32. Postnov A.A., Batalov A.I., Kalaeva D.B., Tyurina A.N., Zakharova N.E., Pronin I.N. Novel approach for assessing the blood flow of gliomas based on 11C-methionine PET-CT compared to CT perfusion and ALS MR-perfusion studies. *REJR.* 2023; 13(4): 36-43. DOI:10.21569/2222-7415-2023-13-4-36-43.
33. Chekhonin I.V., Batalov A.I., Pogosbekian E.L., Tyurina A.N., Galstyan S.A., Bykanov A.E., Pitskhelauri D.I., Zakharova N.E., Pronin I.N. A study of magnetic resonance relaxometry, diffusion kurtosis and perfusion imaging in non-enhancing diffuse brain gliomas with intraoperative neuronavigation: analysis of tumor heterogeneity and searching for neuroimaging predictors of proliferative activity. *REJR.* 2025; 15(2): 109-119. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-2-109-119 (in Russian).
34. Garcia-Lezama M., Teran-Davila E., Moreno-Jimenez S., Roldan-Valadez E., Ternovoy S.K. Quantitative MRI biomarkers in glioblastoma: an updated review about physiopathology, who CNS5 classification and clinical applications. *REJR.* 2025; 15(3): 6-21. DOI:10.21569/2222-7415-2025-15-3-6-21.
35. Fløgstad Svensson S., Fuster-Garcia E., Latysheva A., Fraser-Green J., Nordhøy W., Isam Darwish O., et al. Decreased tissue stiffness in glioblastoma by MR elastography is associated with increased cerebral blood flow. *Eur J Radiol.* 2022; 147(110136). DOI:10.1016/j.ejrad.2021.110136.
36. Kumarapuram S., Yu R., Manchiraju P., Attard C., Escamilla J., Navin A., et al. Applying Shear Wave and Magnetic Resonance Elastography to Grade Brain Tumors: Systematic Review and Meta-Analysis. *World Neurosurg.* 2023; 178(e147-e155). DOI:10.1016/j.wneu.2023.07.014.
37. Streitberger K.J., Lilaj L., Schrank F., Braun J., Hoffmann K.T., Reiss-Zimmermann M., et al. How tissue fluidity influ-

- ences brain tumor progression. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2020; 117(1): 128-134. DOI:10.1073/pnas.1913511116.
38. Takamura T., Motosugi U., Ogiwara M., Sasaki Y., Glaser K.J., Ehman R.L., et al. Relationship between Shear Stiffness Measured by MR Elastography and Perfusion Metrics Measured by Perfusion CT of Meningiomas. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2021; 42(7): 1216-1222. DOI:10.3174/ajnr.A7117.
39. Pepin K.M., Chen J., Glaser K.J., Mariappan Y.K., Reuland B., Ziesmer S., et al. MR elastography derived shear stiffness—a new imaging biomarker for the assessment of early tumor response to chemotherapy. *Magn Reson Med*. 2014; 71(5): 1834-1840. DOI:10.1002/mrm.24825.
40. Feng Y., Clayton E.H., Okamoto R.J., Engelbach J., Bayly P.V., Garbow J.R. A longitudinal magnetic resonance elastography study of murine brain tumors following radiation therapy. *Phys Med Biol*. 2016; 61(16): 6121-6131. DOI:10.1088/0031-9155/61/16/6121.)

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ В МЕДИЦИНЕ

Хомутова Е.Ю.¹, Григорович Э.Ш.¹, Пахневич А.В.², Евтюхина Н.С.¹

1 – ФГБОУ ВО «Омский государственный медицинский университет» МЗ РФ. г. Омск, Россия.

2 – ФГБУН «Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка» РАН. г. Москва, Россия.

В настоящее время микро-КТ – один из достаточно новых, универсальных и представительных методов для не инвазивного изучения объемного строения практически любых материалов и мини-объектов *in vitro*, с очень высоким разрешением. В обзоре представлены актуальные возможности технологии в исследовании различных материалов, прежде всего биологического происхождения, но также и синтетических материалов, используемых в различных областях медицины. Были выделены возможности использования микро-КТ для стоматологии, онкологии, оториноларингологии, пульмонологии, кардиологии. Среди основных представленных сведений в панораме обзора нами рассмотрены ограничения метода микро-КТ и оценены его перспективы, среди которых возможность проводить исследования не только мелких животных, но и человека – *in vivo*, неуклонная тенденция сокращения времени на проведение и обработку исследований, использование изображений и других данных при микро-КТ в качестве субстратов для количественного анализа характеристик текстурного анализа, активное использование контрастных препаратов при микрокомпьютерной томографии.

Ключевые слова: рентгеновская микротомография, компьютерная томография, КТ с высоким пространственным разрешением, нанотомография, неразрушающий контроль.

Контактный автор: Хомутова Елена Юрьевна, e-mail: elenahomutova68@gmail.com

Для цитирования: Хомутова Е.Ю., Григорович Э.Ш., Пахневич А.В., Евтюхина Н.С. Современные аспекты использования микрокомпьютерной томографии в медицине. REJR 2026; 16(1):180-190. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-180-190.

Статья получена: 13.03.26

Статья принята: 14.04.26

MODERN ASPECTS OF THE MICROCOMPUTER TOMOGRAPHY APPLICATION IN MEDICINE

Khomutova E.Yu.¹, Grigorovich E.Sh.¹, Pakhnevich A.V.², Evtyukhina N.S.¹

1 - Omsk State Medical University. Omsk, Russia.

2 - A.A. Borisyak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia.

Micro-CT is currently a relatively new, versatile, and representative method for non-invasively studying the three-dimensional structure of virtually any material and miniature objects *in vitro*, with very high resolution. This review presents the current capabilities of this technology in the study of various materials, primarily those of biological origin, but also synthetic materials used in various fields of medicine. Micro-CT applications in dentistry, oncology, otolaryngology, pulmonology, and cardiology are highlighted. Among the key findings presented in this overview, we examine the limitations of the micro-CT method and assess its potential, including the ability to conduct *in vivo* studies not only on small animals but also on humans; the steady trend toward reducing the time required to conduct and process studies; the use of images and other micro-CT data as substrates for quantitative analysis of texture characteristics; and the widespread use of contrast agents in micro-CT.

Keywords: X-ray microtomography, micro-computed tomography, computed tomography, CT high spatial resolution, nanotomografiya, non-destructive control.

Corresponding author: Khomutova E.Yu., e-mail: elenahomutova68@gmail.com

For citation: Khomutova E.Yu., Grigorovich E.Sh., Pakhnevich A.V., Evtukhina N.S. Modern aspects of the microcomputer tomography application in medicine. REJR 2026; 16(1):180-190. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-180-190.

Received: 13.03.26

Accepted: 14.04.26

Технология микрокомпьютерной томографии (микро-КТ) была разработана в начале 80-х годов XX века и представлена как возможность исследовать структуры на микроуровне. По сравнению с традиционной компьютерной томографией (КТ), микро-КТ сканирование (также являясь неинвазивным рентгенологическим методом диагностики) позволяет получать достоверные диагностические данные с лучшим пространственным разрешением – от десятков нанометров до миллиметров, изучая области исследовательского интереса в миллион раз меньшего размера, чем при МСКТ [1–3].

Аппараты микрокомпьютерной томографии, в большей степени схожие по структуре и принципу работы с конусно-лучевой и мультиспиральной компьютерной томографией (КЛКТ, МСКТ), используют микрофокусный источник рентгеновского излучения и детекторы высокого разрешения для создания трехмерных реконструкций образцов. Основные части микро-КТ включают рентгеновскую трубку, шаговый двигатель с компьютерным управлением (для вращения с определенными интервалами или с фиксацией закрепленного образца), усилитель изображения (концентрирует рентгеновские лучи из окружающей среды на датчике камеры), ПЗС-камеры (преобразуют падающие на них рентгеновские лучи в изображения), устройства сбора изображений в компьютере. Возможно совмещение микро-КТ с любым компьютером. Установленное программное обеспечение (ПО) имеет среди прочих инструментов, позволяющих выполнять пространственную реконструкцию, 2D/3D качественный анализ и 3D-визуализацию. При исследовании различных по способности ослабления рентгеновских лучей биологических тканей и веществ небиологического происхождения используются разные диапазоны рабочих энергий и разные эффекты взаимодействия с веществом, с импульсным или не-

прерывным режимом исследования разных площадей сканирования.

Исследователь (или оператор) может просматривать сечение за сечением, получая их под любым углом, и анализировать числовые характеристики трехмерной внутренней микроструктуры по всему объему исследуемого объекта или выделенной области, в частности при создании реалистичных трехмерных моделей микроструктуры для виртуального перемещения внутри объекта исследования [3].

В настоящее время микро-КТ – один из достаточно новых, универсальных и представительных методов для не инвазивного изучения объемного строения практически любых материалов и мини-объектов *in vitro* [2, 3]. С помощью микрокомпьютерной томографии можно напрямую исследовать керамику, полимеры, такие минерализованные ткани, как зубы и кости или другие различные биоматериалы. Варьируя напряжение на источнике излучения и различные фильтры можно изучать объекты самых разных плотностей [1, 3]. Развитие микрокомпьютерной томографии нового поколения позволило проводить исследования мелких животных *in vivo*.

В зависимости от основной технологии и набора дополнительных программ аппараты микро-КТ имеют различные габариты, от настольного до крупноформатного (с охлаждением рентгеновской камеры), что позволяет достигать высокого пространственного разрешения, не сильно ограничивая размеры образцов, сохраняя высокую скорость обработки данных и поддержку возможной реконструкции виртуальных сечений размером до 8000x8000 пикселей [2, 4].

Контрастность мягких тканей при микро-КТ в среднем достаточно низкая, но эта проблема была преодолена благодаря использованию таких контрастных препаратов, как йод, осмий, золото, серебро и др. [5].

Для получения представления об акту-

альных нормативных аспектах и перспективах использования метода информационный поиск нами был проведен в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, CORE, ScienceDirect и Google Scholar с использованием дескрипторов (терминов в разных словосочетаниях): «micro-computed tomography» (микрокомпьютерная томография), X-Ray microtomography (рентгеновская микротомография), CT high spatial resolution (КТ с высоким пространственным разрешением) – на английском языке, за последние 5 лет и без ограничений по стране происхождения. Поиск был дополнен статьями из российской научной поисковой базы eLibrary.ru, которые по названию и аннотации имели отношения к предложенной теме. В итоге для подготовки этого краткого обзора было отобрано 98 статей.

В результате поиска нами было отмечено, что за последние пять лет по сравнению с ему предшествующим пятилетним периодом, количество соответствующих публикаций экспоненциально выросло, при этом чаще всего речь идет об актуальности использования микро-КТ для решения вопросов в таких медицинских клинических специальностях, как стоматология, онкология, кардиология и сердечно-сосудистая хирургия, отоларингология, пульмонология. Такие тенденции, вероятно, отражают растущее признание этого нового метода визуализации в качестве полезного инструмента для клинической медицины.

Цель исследования.

Анализ панорамы использования актуальных возможностей микро-КТ по ряду медицинских направлений, с оценкой перспектив и текущих ограничений использования метода.

Микро-КТ в стоматологии.

Благодаря постоянному совершенствованию систем микро-КТ, в последние годы, использование метода в научном и клиническом аспектах разных стоматологических направлений и в челюстно-лицевой хирургии постоянно нарастает. Метод используют для оценки анализа морфологии, формы и проходности корневых каналов, для оценки пломбирования и при перепломбировании корневых каналов, в исследовании пломбировочных материалов, микроструктуры имплантата и окружающей трабекулярной кости, для оценки развития черепно-лицевых костей, для измерения толщины эмали и многих других вопросов тканевой биоинженерии [1–4, 6–9].

Самое современное усовершенствование

систем микро-КТ позволяет определить концентрацию минералов в костях и зубах с точностью менее 1%, при разрешении в 5 и 30 микрометров. Микро-КТ (в основном процедура *in vitro*) способна не инвазивно исследовать среды постоянной толщины (что позволяет избежать диспропорций, возникающих при физическом разрезании образцов) и изучать объект в очень высоком пространственном разрешении [1, 6, 7].

Проблемы углубленного изучения патогенеза и ранней диагностики кариеса зубов в детском (подростковом) возрасте продолжают оставаться одними из актуальных задач современной детской стоматологии, так как незавершенность процессов минерализации твердых тканей после прорезывания значительно повышает риск возникновения кариозных поражений [6, 8]. Доказано наличие прямой корреляционной зависимости между риском возникновения фиссурного кариеса и исходной степенью минерализации зубной эмали. К числу востребованных и требующих своего разрешения относятся вопросы, касающиеся разработки и совершенствования методов диагностики фиссурного кариеса постоянных зубов после прорезывания у детей, при несогласованности стандартизированных оценочных критериев морфологических исследований [1, 6, 8].

В исследовании Доменюка Д.В. и соавторов (Россия), представленном в 2018 году, целью была оценка возможности метода микро-КТ с последующим анализом изображения и определением минеральной оптической плотности деминерализованных участков, для совершенствования ранней диагностики фиссурного кариеса постоянных моляров после прорезывания [6]. Использовался высокоразрешающий рентгеновский микротомограф «Skyscan 1176» («Bruker», Бельгия), с последующей постобработкой и анализом полученных томограмм. Были исследованы 75 моляров, удаленных по ортодонтическим показаниям, у детей 8–11 лет. Из общего числа удаленных зубов сформированы группы образцов для исследования. В группы были выделены: 1 – зубы без признаков деминерализации, 2 – зубы с кариозными поражениями в стадии белого пятна, 3 – зубы с кариозными поражениями в стадии светло-коричневого пятна, 4 – зубы с кариозными поражениями в стадии коричневого пятна, 5 – зубы с кариозными поражениями в стадии черного пятна. На реконструированных 2D- и 3D-изображениях идентифицированы зоны во внешней (0,05–0,5 мм), средней (0,75–1,25 мм) и внутренней (1,5–2,0 мм) трети толщины эмалевого слоя с последующим вы-

числением в программе ПО CTvox (Bruker, Бельгия) усреднённых показателей рентгенологической (минеральной) плотности. Результатами в исследуемых группах стали представленные установленными усреднёнными показателями минеральной оптической плотности эмали интактных зубов, а также зубов, имеющих различные виды кариозных поражений в пределах эмали. В порядке убывания параметров оптической плотности выявлена следующая последовательность: здоровая эмаль ($2,47 \pm 0,12$ г/см³), кариес в стадии белого пятна ($2,41 \pm 0,11$ г/см³), кариес в стадии светло-коричневого пятна ($2,32 \pm 0,07$ г/см³), кариес в стадии коричневого пятна ($2,18 \pm 0,12$ г/см³), кариес в стадии чёрного пятна ($1,81 \pm 0,12$ г/см³). Выявление корреляционных связей между цветом кариозного поражения и минеральной плотностью зубной эмали расширяет понимание механизмов развития патогенеза кариеса и способствует совершенствованию лечебно-профилактических мероприятий, направленных на повышение кариес-резистентности [6]. Применение метода микрокомпьютерной томографии, в комплексе с другими специальными методами, характеризует фиссурный кариес как последовательный, постепенно прогрессирующий деструктивный процесс твёрдых тканей зуба (от очаговой деминерализации до формирования полости), устанавливающий зависимость между интенсивностью внутренних нарушений и внешними разрушениями [6].

В дополнение к вышеизложенному следует отметить, что с помощью 3D-изображений при микро-КТ оценивается краевая адаптация реставраций, степень пористости применяемого цемента. Можно исследовать объёмные изменения при полимеризационной усадке композита, провести биомеханическую оценку с использованием конечно-элементного анализа, а также определить зоны микроподтеканий установленных ортодонтических конструкций (брекетов) [1, 3, 8].

С помощью 3D-данных микро-КТ можно определить множество изменений корневых каналов до подготовки к лечению и после него [4, 9]. Одним из ключевых факторов успеха лечения корневых каналов является их оптимальная форма. Правильное формирование корневых каналов зависит от способности врача оценить их анатомию с помощью традиционных рентгеновских методов (внутриротовая рентгенография, КЛКТ). Эффективность инструментов, используемых для определения состояния корневых каналов, является ещё одним фактором успеха. С

этой целью были проведены многочисленные исследования, изучающие эффективность инструментов, помогающие смоделировать обработку корневых каналов в трёх измерениях [10]. При изучении полученных данных в исследованиях было установлено, что оценка таких изменений корневых каналов (до и после лечения), как изменения поверхности и объема корневого канала, объем удаленной дентина, диаметр канала, транспортировка канала, индекс структурной модели, возможна с помощью микро-КТ [1, 9, 10]. В этих исследованиях было показано, что микро-КТ в трехмерном режиме эффективна для количественной оценки удаления пломбировочных материалов из корневого канала, эффективности инструментов, используемых для удаления пломб, количества удаленной дентина до и после удаления, а также объема канала. С этой целью Хаммид Ф. и соавторы, еще в 2015 году, в исследовании с использованием микро-КТ, продемонстрировали, что ручные инструменты более эффективны при удалении пломб из корневых каналов, чем роторные системы [1].

Механические испытания после лечения, конечно, можно проводить с помощью элементного анализа трехмерных реконструкций, полученных с помощью микро-КТ. Кроме того, микро-КТ может использоваться в качестве эффективного инструмента для анализа взаимосвязи между трехмерными анатомическими структурами, и впоследствии данные будущих оценок могут быть сохранены. В исследовании микро-КТ использовалась для проверки изображения пульпы и корневых каналов в зубах, полученных с помощью ламинарной оптической томографии, для изучения поражения зуба, расположенного в пульпе. Мёллер и соавторы в 2013 году использовали микро-КТ для оценки связи пустот с пломбами корневых каналов [1, 9]. В клиническом исследовании корневых каналов 20 верхних центральных резцов, запломбированных гуттаперчей и силером, микро-КТ использовалась для динамического наблюдения [9]. В исследовании удаленных нижних моляров микро-КТ использовалась для расчета эффективности дезинфекции и формирования в трех инструментальных системах, различающихся по методам подготовки. Объемы коронок зубов и объема дентина 41 молочных резцов измерялись с помощью микро-КТ. Качество пломб в каналах 60 однокорневых зубов исследовалось при микро-КТ, где учитывались эффекты методов пломбирования и условий после установки. В исследовании 90 нижних моляров с верхушечными пломбами корней

для пред- и послеоперационных расчётов также использовались микро-КТ. С помощью этих сканов удалось успешно измерить объём пломбировочного материала, а также степень удаления дентина [9].

При микро-КТ возможно оценить состояние костной ткани вокруг имплантата, включая объём и плотность костной ткани, ширину трабекул, трабекулярный зазор и сращение имплантата с костью [10]. Методика 3D-анализа при микро-КТ позволяет оценивать изменения формы и объема, а также структурные детали образца, что впоследствии помогает улучшить качество зубного протеза [10, 11]. Изображения при микро-КТ с высоким разрешением наилучшим образом различают различные, даже самые мелкие внутренние части зуба, обеспечивая неразрушающий процесс визуализации (образец остается доступным для дальнейших биологических и механических испытаний).

Современные технологии микро-КТ позволяют исследовать структуру материалов и изделий для зубной имплантации и протезирования, используя 3D-объем с пространственным разрешением, с определенными размерами фокусного пятна источника рентгеновского излучения [10, 12]. Указанный метод успешно применен для качественного и количественного анализа характеристик изделий из наноструктурированного титана на примере зубных имплантатов, отличающихся высокой прочностью и хорошей биологической совместимостью с костной тканью человека. В ряде исследований показаны точные подсчеты при микро-КТ для наилучшего контакта и успешной остеоинтеграции поверхности имплантата с костью [12]. Также определены качественные и количественные показатели для трабекулярной и кортикальной кости в оценке первичной стабилизации имплантата. Несмотря на то, что именно количественные и качественные показатели кортикальной кости влияют на первичную стабилизацию имплантата, роль трабекулярной кости в успехе имплантации значительна, поскольку большая часть имплантата, установленного в кость, остается внутри губчатой кости и находится в непосредственном контакте с имплантатом.

Оценка развития черепно-лицевых костей при микро-КТ, в том числе количественные измерения таких параметров, как толщина кости, количество трабекул, расстояние между трабекулярными костными балками, объем кости, общий объем ткани, соотношение трабекулярной ткани, индекс структурной модели (SMI) – представляет собой количественную характеристику распо-

ложения трабекул в 3D-пространстве, трабекулярные костные соединения, количество трабекулярных узлов на объем ткани и плотность кости, определяемую количеством гидроксиапатита, необходимы в планировании хирургического лечения и в оценке рисков осложнений хирургических вмешательств [12]. Целью исследования Kivovics M. с соавторами (Будапешт, Венгрия), опубликованного в 2020 году, было сравнение микроморфометрических данных, полученных с помощью конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) и микро-КТ увеличенной пазухи при атрофии альвеолярного отростка верхней челюсти (дно пазухи) [12]. Оценивалась также долговременная стабильность прироста костной ткани после проведения аугментации с помощью остеосклеротического материала (BoneAlbumin). В исследовании авторами была описана последовательность действий: проведение синус-лифтинга, через 6 месяцев установка имплантатов (после биопсии кости на этапе заживления). Образцы биоптатов исследовали при микро-КТ. Всего было собрано 16 образцов у девяти взрослых пациентов (средний возраст 54,7±6,5 лет). Данные контрольной КЛКТ (проводимые трижды – до операции, сразу после и через 3 года после операции) регистрировались для определения места забора биопсийных образцов. Микроморфометрические переменные рассчитывали по данным микро-КТ и КЛКТ, с оценкой корреляции по тесту Спирмена. Объем аугментированной кости рассчитывали на момент установки имплантата и через 3 года. В результате исследования отмечалась положительная корреляция между объемной долей кости, трабекулярной сепарацией, открытой и общей пористостью. Была обнаружена и отрицательная корреляция между трабекулярной толщиной, полученной по данным КЛКТ и микро-КТ ($p < 0,05$). Наблюдалось среднее уменьшение объема кости на 39,28% (11,88-60,02%). Корреляция данных КЛКТ и микрокомпьютерной томографии показала, что микроморфометрический анализ реконструкций микро-КТ оперированных пазух позволил получить более достоверную информацию о микроархитектуре измененной кости, но КЛКТ была важна для определения тактики и объема планируемого лечения [12].

Возможности использования метода микро-КТ совсем не ограничиваются описанными примерами. Данный метод также имеет большой потенциал в тканевой инженерии для анализа полимерных композиционных материалов, используемых в стоматологии, наряду с традиционными показателя-

ми оценки.

Микро-КТ в онкологии.

Ряд прорывных научных исследований представил возможности микро-КТ (особенно в комбинированной диагностике с гистопатологическим исследованием) в детальном анализе тканей мелких животных и человека, что дает расширенную высокоточную оценку и трехмерное представление об инвазии и метастазировании рака [13–16].

В исследовании группы российских ученых (2025 г.) была использована микро-КТ с контрастным усилением в изучении прогрессирования рака, с использованием ортотопической модели плоскоклеточного рака пищевода, полученной от мыши [13]. Был определен ряд паттернов инвазии во время прогрессирования рака пищевода, включая экспансивный рост, многоклеточный поток и формирование нитей и пальцевидных выступов, которые были представлены в 3D-изображениях, в трех сечениях. Проанализированы структурные взаимосвязи вторичных метастатических поражений с окружающими тканями, что имеет важную составляющую для перитонеального канциноматоза, где микро-КТ с 3D-визуализацией показала сложные механизмы коллективной миграции раковых клеточных комплексов, выходящие за рамки традиционных концепций пассивного распространения. Исследование подчеркивало значительные возможности применения микро-КТ в выявлении сложности инвазии и диссеминации опухоли, открывая перспективу определения сложных стратегий ремоделирования тканей [13].

До настоящего времени микро-КТ использовалась ограниченно для визуализации образцов опухолей и лишь в единичных небольших исследованиях микро-КТ применялась для оценки структуры иссеченных тканей молочной железы [14]. В исследовании Schrup S. с соавторами (США), опубликованном в 2025 году, сообщалось, что микро-КТ позволяет отличить злокачественные опухоли молочной железы от фиброзной ткани молочной железы, а также доброкачественные кальцификации от злокачественных [15].

Другим важным направлением в аспекте возможностей микро-КТ в онкологии является определение показателей точности и достоверности метода для интраоперационной оценки края резекции, например, при органосохраняющих реконструктивных операциях молочных желез (ОРОМЖ) по поводу инвазивного рака или протоковой карциномы (in situ). До 15-30% пациенток, перенесших ОРОМЖ, нуждаются в повторной

операции из-за наличия опухолевых клеток в краях резекции (определяемых при последующем гистопатологическом исследовании). До настоящего времени все доступные методы интраоперационной оценки хирургического края опухоли имеют ограничения [14]. В исследовании Qiu Si-Qi с соавторами (2018 г.) изучалась достоверность результатов микро-КТ в сравнении с гистопатологическими данными – с оценкой краев резекции и других сопутствующих факторов (в том числе сравнивалось время проведения обоих исследований, что при микро-КТ составляло менее 15 минут на 1 случай) [16]. По результатам исследования показатели при микро-КТ точности, чувствительности, специфичности, положительной прогностической ценности и отрицательной прогностической ценности в прогнозировании состояния края резекции составили 86%, 56%, 100%, 100% и 83% соответственно [16]. Было определено, что показатель определения частоты положительного края резекции при микро-КТ в ближайшей перспективе может быть снижен с 31% до 14%, что свидетельствует о том, что быстрая интраоперационная обратная связь о состоянии края резекции потенциально способна снизить риск повторных операций.

В кардиологии и сердечно-сосудистой хирургии.

По результатам исследования Briana A. Santo с соавторами (США, 2024 г.) была представлена оценка состава сгустка крови с помощью микро-КТ перед тромбэктомией для планирования лечения инсульта [17]. Успех механической тромбэктомии (МТ), независимо от используемого устройства для процедуры, во многом зависит от свойств сгустка крови. Биологический состав ткани сгустка может создавать значительные трудности во время МТ, приводя к дополнительным попыткам реваскуляризации и последующим неблагоприятным исходам. Клинические данные показали, что сгустки с такими определёнными биологическими свойствами, как повышенное содержание фибрин-тромбоцитарных тактоидов (ФТ), более жёсткие и могут проявлять различную степень сопротивления устройствам для тромбэктомии по сравнению с более мягкими сгустками, богатыми эритроцитами. Новые парадигмы в этой области предполагают, что определение состава сгустка перед вмешательством способно помочь выбрать наиболее подходящий подход к МТ. В исследовании с помощью микро-КТ исследовались сгустки крови (N-10), полученные с помощью МТ, и сгустки с различным составом эритроцитов

(N-6). Был проведен парный анализ микро-КТ изображений (с разрешением 4,9 мкм) и гистологических изображений со стандартным окрашиванием гематоксилином и эозином (изображение получено с увеличением в 40 раз) всех 16 сгустков. Из всех типов данных был произведен расчет радиомических показателей первого порядка статистики из микро-КТ, а процентный состав эритроцитов был рассчитан при гистопатологическом исследовании. Еще одно направление в изучении возможностей микро-КТ представлено в нескольких работах Karagiannidis E и его коллег (Греция, 2021 г.) и также касается изучения состава тромбов, с оценкой потенциальных осложнений, при проведении аспирационной тромбэктомии пациентам с инфарктом миокарда, с подъемом сегмента ST и высокой тромботической нагрузкой, без выявленного существенного риска [18, 19].

Полученные результаты позволили сделать вывод, что подобные наблюдения и расчеты в ближайшем будущем могут быть использованы для более точного определения состава сгустка и прогнозирования тромбэктомии на основе данных микро-КТ, полученных до лечения [17–19].

Микро-КТ в оториноларингологии.

Исследования при микро-КТ при оценке ЛОР-патологии в основном направлены на морфометрическую визуализацию и оценку патологии и анатомии среднего и внутреннего уха [20–22]. Группа исследователей из Турции в 2021 году создала и представила базу данных нормальных анатомических значений костного лабиринта и других мелких структур внутреннего уха, измеренных с высокой точностью при микро-КТ, чтобы оценить потенциальный клинический вклад этих данных в лечение патологий внутреннего уха [20].

Для четкого определения диапазона нормальных показателей анатомических структур внутреннего уха (костного лабиринта, латерального полукружного канала и улитки) авторы провели сканирование с высоким разрешением с помощью микро-КТ сухих морфологических препаратов височных костей. Все измерения проводились авторами на срезах в аксиальной плоскости с использованием инструментов программного обеспечения микро-КТ. Результаты исследования позволили продемонстрировать ранее невидимые анатомические детали внутреннего уха, без разрушения или внесения артефактов в структуру костного образца (как при гистопатологических исследованиях), дополнительно обеспечив возможность создание 3D-объема для визуализации. В каче-

стве референсного метода использовали КЛАКТ. При сравнении изображений было отмечено, что визуализация при микро-КТ была значительно четче. В исследовании не было ни одной анатомической структуры, которую нельзя было не увидеть, поскольку разрешение микро-КТ составляло 10 микрометров. Чувствительность измерений в исследовании составила 0,001 мм, с интервалом в 0,001 мм нижних и верхних значений. Однако следует обсуждать ограничение рамок исследования, так как при микро-КТ были исследованы только сухие морфологические препараты височных костей [20].

Группой европейских ученых (из разных стран) в 2022 году были представлены результаты исследования с помощью микро-КТ оценки внутриулиткового повреждения [21]. Отоспонгиозитические бляшки возможно заподозрить при обычной компьютерной томографии (КТ) как очаговые поражения вокруг улитки. Однако разрешение остаётся недостаточным для оценки внутриулиткового повреждения. Технология микро-КТ, обеспечивая разрешение на уровне микрон, предоставляет исключительно расширенное изображение отосклеротической улитки. В данном исследовании впервые была проанализирована и реконструирована в трёх измерениях недекальцинированная отосклеротическая улитка с использованием технологии микро-КТ. Доклиническая значимость данного исследования заключалась в демонстрации обширного провоспалительного изменения внутри улитки, которое невозможно увидеть при конусно-лучевой или мультисрезовой компьютерной томографии (КЛАКТ, МСКТ). Эти результаты показали возможности большого влияния на успешное дальнейшее лечение пациентов с сенсоневральной тугоухостью, так как при стандартной КТ височных костей заболевание может не выявляться даже на стадии клинических изменений, когда в улитке уже происходит интенсивное ремоделирование тканей [21].

Gabriela O'Toole Bom Braga с соавторами (Берн, Швейцария) в период 2022-2025 гг. представила ряд статей, продолжив изучение внутренней костной структуры улитки (костную спиральную пластинку, КСП) [21, 22]. Изучение пористости КСП в последнее время привлекает внимание учёных из-за её потенциального влияния на общий звукопереход. Костные столбики между вестибулярной и барабанной пластинками КСП улитки не всегда видны при традиционных гистопатологических исследованиях, поэтому визуализация таких структур обычно отсутствует или ограничена.

В своем исследовании авторы впервые стремились анатомически изучить и представить КСП улитки четко, в мельчайших деталях, для чего, используя номинальное разрешение микро-КТ до размера вокселя в 2,5 мкм, проводили измерение ширины, толщины и пористости КСП улитки [21]. На основе данных микро-КТ были созданы 3D-модели отдельных пластин в базальном и среднем изгибах, а также в области верхушки. В результате была обнаружена постоянная пористость структуры, как в барабанной, так и в вестибулярной пластинках – от базального завитка до верхушки. Исследователи сделали вывод, что барабанная пластинка более пористая, чем вестибулярная, особенно в базальном и среднем завитках, тогда как в верхушке улитки она менее пористая. Более того, 3D-реконструкция позволила детально рассмотреть костные столбики, расположенные между КСП-пластинками, что суммарно улучшает понимание механизмов слуха для повышения точности и эффективности при создании кохлеарных моделей, будет полезно при планировании тактики клинических вмешательств для максимального сохранения слуха [22].

Микро-КТ в пульмонологии.

В опубликованном в 2021 году группой европейских и североамериканских ученых ревью были проанализированы 37 исследований, посвященных возможностям микро-КТ успешно выявлять ряд заболеваний лёгких, исследуя трёхмерные изображения с большей детализацией и на порядок большим разрешением, чем обычная оптическая микроскопия на предметных стеклах [23].

Кроме того, был описан опыт совместной диагностики микро-КТ с микрооптической когерентной томографией (микро-ОКТ), МСКТ-визуализацией и микроскопией срезов для всесторонней оценки патологических изменений при идиопатическом легочном фиброзе (ИЛФ). В исследовании микро-КТ продемонстрировала возможности в обнаружении легочного фиброза даже в тех областях легких, где МСКТ представляла нормальные показатели [23, 24]. В образцах легких с минимальным легочным фиброзом, полученных с помощью микро-КТ, было обнаружено значительно меньшее количество терминальных бронхиол по сравнению с нормальными контрольными образцами. Была высказана уверенность, что микро-КТ-визуализация может способствовать лучшему и раннему пониманию патологического процесса фиброза легких, определяя такие

структуры, как очаги фибробластов, и, таким образом, обнаруживая новые целевые участки для терапевтического воздействия [24, 25]. В обзоре авторами был выделен ряд исследований, когда микро-КТ использовалась для определения тяжести заболевания в различных участках легких, в том числе при ИЛФ. Известно, что при этом заболевании фиброз поражает легкие гетерогенно, поэтому при микро-КТ может быть определена значительная диагностическая информация, касающаяся различий в экспрессии генов в неразрушенных хирургических образцах легких (без окрашивания и других видов воздействия), на разных стадиях фиброза. Исследовательский опыт последних лет подтвердил возможности микро-КТ в предоставлении ценной информации об объёмных измерениях при рестриктивных и обструктивных заболеваниях лёгких, оценке изменений для отбора кандидатов на проведение трансплантации и в посттрансплантационный период, что может быть использовано для более эффективной клинической тактики на всех этапах лечения различных заболеваний лёгких. В исследованиях было выражено убеждение, что с ростом доступности устройств для микро-КТ данная технология может в перспективе обеспечить комплексную гистопатологическую и рентгенологическую оценку рака лёгких и других легочных заболеваний [23-25].

Перспективные направления микро-КТ.

К краткосрочным перспективам следует отнести развитие технологий микро КТ в оценке таргетной терапии, более активного использования в исследованиях контрастных веществ, использование в качестве субстратов данных при микро-КТ для формирования датасетов для радиомики (текстурного анализа) – что уже сейчас существенно повышает специфичность метода и сокращает время исследования [5, 17, 26, 27].

Новые технологии микрокомпьютерной томографии могут быть использованы, например, как анатомические модели для изучения сложной трехмерной анатомии сердца (в норме и при патологии). Использование подобных инновационных технологий с высоким разрешением смогут быть лучшими инструментами для медицинского образования, потенциально улучшая диагностику заболеваний и, как следствие, обеспечивая наилучший эффект лечения [22].

Несомненно, гибридная синергия медицинских технологий, в частности микро-КТ и КАКТ или микро-КТ и ПЭТ-КТ также убедительно поспособствует вышеописанным

клиническим результатам, а также научным достижениям.

Потенциальное будущее использования микро-КТ *in vivo* – на людях – может позволить значительно более раннюю диагностику различных заболеваний, например, онкологического ряда или выявления ряда системных заболеваний на доклинической стадии. Возможно, этому способствует революционная технология, представленная Valton S., с соавторами (2022 г.) – новая конструкция и технологии томографа для микро-КТ с размером вокселей от 4 мкм до нескольких сотен микрон, с одновременным или последовательным напряжением на трубке (в 300 кВ) – вокруг одной оси вращения, для двух (или одной) высоких энергий [28, 29]. Согласно заявлению разработчиков микро-КТ исследования можно будет проводить с идентичным или разным разрешением, с дистанционным запросом и контролем. Заявленная цель представленной разработки –

широко открыть возможности для исследований и разработок на образцах большого размера.

Заключение.

Современные устройства микрокомпьютерной томографии позволяют проводить точные объемные измерения в оценке тканей и целых биообразцов с высоким микроскопическим разрешением, для широкого спектра клинического применения в медицине, могут быть существенным дополнением массива данных к существующим традиционным показателям, так и поставщиком новейшей, не доступной ранее информации..

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Shahid F., Alam M., Khamis M. Application of micro-CT in various discipline of clinical and research dentistry. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*. 2015. 6:1194-1206.
2. Elfrink M., Kalin K., van Ruijven L. et al. MicroCT study on the enamel mineral density of primary molars. *European Journal of Pediatric Dentistry*. 2016. 17:60-64.
3. Rühli FJ, Kuhn G, Evison R, Müller R, Schultz M. Diagnostic value of micro-CT in comparison with histology in the qualitative assessment of historical human skull bone pathologies. *Am J Phys Anthropol*. 2007. 133(4):1099-111. doi: 10.1002/ajpa.20611. PMID: 17530700.
4. Zainuddin MZ, Mohamad NS, Su Keng T, Mohd Yusof MYP. The applications of MicroCT in studying age-related tooth morphological change and dental age estimation: A scoping review. *J Forensic Sci*. 2023; 68: 2048-2056. doi: 10.1111/1556-4029.15352
5. Glancy Spencer, Morris H., Ho Vincent, Klarmann George. Visualizing Collagen Tissue Microarchitecture Using Contrast-Enhanced Micro-CT. *Encyclopedia Journal*. 2024. – 54718. doi: encyclopedia.pub/entry/54718
6. Доменюк С.З., Чуков О.И., Анфиногенова О.И. Применение компьютерной микротомографии в изучении морфоструктурных особенностей твёрдых тканей зубов при ранних формах кариозных поражений. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2018 :25(6): 57-67 doi: 10.25207/1608-6228-2018-25-6-57-67
7. Freitas S., Panzarella F., Karia R. et al. Effect of Pseudocolor Filter in Micro-computed Tomography Images for Detection of Proximal and Occlusal Caries Lesions in Primary Molars. *The Journal of Contemporary Dental Practice*. 2019. 20:279-284. doi: 10.5005/jp-journals-10024-2510.
8. Shetty R., Walia T., Muthu MS et al. Enamel thickness and density of primary teeth with and without early childhood caries: a micro-computer tomography assessment. *European Archives of Paediatric Dentistry*. 2025. doi: 10.1007/s40368-025-01098-3.
9. Lokhande P., Sethuraman B., Deenadayalan G. A Review of Contemporary Fatigue Analysis and Biomaterials Studies in Endodontics. *Materials Science Forum*. 2019; 969: 193-198. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.969.193.
10. Yajvinder and V Gulati. Implementation of Micro CT in CAD/CAM dentistry for image processing and soft computing: a review. 2020. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1432 012079. doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012079
11. Irie M., Rabelo G., Spin-Neto R. et al. Use of Micro-Computed Tomography for Bone Evaluation in Dentistry. *Brazilian dental journal*. 2018; 29: 227-238. doi:10.1590/0103-6440201801979.
12. Kivovics M, Szabo B, Németh O, et al. Comparison between Micro-Computed Tomography and Cone-Beam Computed Tomography in the Assessment of Bone Quality and a Long-Term Volumetric Study of the Augmented Sinus Grafted with an Albumin Impregnated Allograft. *Journal of Clinical Medicine*. 2020; 9: 303 doi: 10.3390/jcm9020303.
13. Tkachev S, Brosalov V, Kit O, Maksimov A, Goncharova A, Sadyrin E, Dalina A, Popova E, Osipenko A, Voloshin M, et al. Unveiling Another Dimension: Advanced Visualization of Cancer Invasion and Metastasis via Micro-CT Imaging. *Cancers*. 2025; 17(7):1139. doi: 10.3390/cancers17071139
14. Tang R, Buckley JM, Fernandez L, Coopey S, Aftreth O, et al. Micro-computed tomography (Micro-CT): a novel approach for intraoperative breast cancer specimen imaging. *Breast Cancer Res Treat*. 2013;139 (2):311-6. doi: 10.1007/s10549-013-2554-6.
15. Schrup S, Maimone S, Villalba M., et al. High-resolution

micro-CT to assess breast microcalcification morphometry by histologic lesion subtype and radiologic classification. *Breast Cancer Research and Treatment*. 2025. 214: 49-58. doi:10.1007/s10549-025-07792-6.

16. Qiu Si-Qi et al. Micro-computed tomography (micro-CT) for intraoperative surgical margin assessment of breast cancer: A feasibility study in breast conserving surgery *European Journal of Surgical Oncology*. 2018; 44 (11): 1708-1713 doi:10.1016/j.ejso.2018.06.022

17. Santo BA, Jenkins TD, Ciecierska SS.K., et al. MicroCT and Histological Analysis of Clot Composition in Acute Ischemic Stroke. *Clin Neuroradiol* 2024; 34:431-439 doi: 10.1007/s00062-023-01380-1

18. Karagiannidis E, Papazoglou AS, Sofidis G, et al. Micro-CT-Based Quantification of Extracted Thrombus Burden Characteristics and Association With Angiographic Outcomes in Patients With ST-Elevation Myocardial Infarction: The QUEST-STEMI Study. *Front. Cardiovasc. Med*. 2021;8:646064. doi: 10.3389/fcvm.2021.646064

19. Karagiannidis E, Papazoglou AS, Stalikas N, et al. Serum Ceramides as Prognostic Biomarkers of Large Thrombus Burden in Patients with STEMI: A Micro-Computed Tomography Study. *J. Pers. Med*. 2021;11:89. doi:10.20944/preprints202101.0093.v1

20. Geneci F., Uzun M. B., Bilecenoglu B., et al. Examination of inner ear structures: a micro-CT study. *Acta Otolaryngologica* 2022;142(1): 1-5. doi: 10.1080/00016489.2021.2015078

21. O'Toole Bom Braga G, Zboray R, Parrilli A, Bulatović M, Caversaccio MD, Wagner F. Otosclerosis under micro-CT: New insights into the disease and its anatomy. *Front Radiol*. 2022;2:965474. doi: 10.3389/fradi.2022.965474. PMID: 37492684; PMCID: PMC1036528

22. Bom Braga, G.O., Parrilli, A., Zboray, R. et al. Quantitative Evaluation of the 3D Anatomy of the Human Osseous Spiral Lamina Using MicroCT. *JARO*. 2023;24:441-452 doi:

10.1007/s10162-023-00904-3

23. Bompoti A, Papazoglou AS, Moysidis DV, Otountzidis N, Karagiannidis E, Stalikas N, Panteris E, Ganesh V, Sanctuary T, Arvanitidis C, et al. Volumetric Imaging of Lung Tissue at Micrometer Resolution: Clinical Applications of Micro-CT for the Diagnosis of Pulmonary Diseases. *Diagnostics*. 2021; 11(11):2075 doi:10.3390/diagnostics11112075

24. Verleden S., Braubach P., Werlein Ch., et al. From Macroscopy to Ultrastructure: An Integrative Approach to Pulmonary Pathology. *Frontiers in Medicine*. 2022;9:859337. doi:10.3389/fmed.2022.859337

25. Redente EF, Kopf KW, Bahadur AN, Robichaud A, Lundblad LK, et al. Application-specific approaches to MicroCT for evaluation of mouse models of pulmonary disease. *PLOS ONE*. 2023;18(2): e0281452. doi: 10.1371/journal.pone.0281452

26. Ausk, B.J., Tucker, A.N., Huber, P. et al. A microCT-based platform to quantify drug targeting. *Eur Radiol Exp*. 2023;7:38. doi:10.1186/s41747-023-00355-8

27. Хомутова Е.Ю., Уралбаев А.А., Хомутова А.Д. Возможности радиомики (текстурного анализа) при компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии в стоматологии (обзор литературы). *Диагностическая и интервенционная радиология*. 2025. 19 (2):22-29.

28. Чибисова М.А., Ермолаева Л.А., Ильин Ф.Ю., Павлов А.В., Машур МД Ислам, Бинсумат Хашем М.А. Применение искусственных нейронных сетей в распознавании данных рентгенологических изображений в амбулаторной стоматологии. *REJR*. 2025; 15(1):41- 61. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-41-61.

29. Valton S, Maire E, Lachambre J. et al. DTHE: Dual Tomograph for High Energy, a unique micro-CT platform. *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2022; 27 (3) doi: 10.58286/26628..

References:

1. Shahid F., Alam M., Khamis M. Application of micro-CT in various discipline of clinical and research dentistry. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*. 2015. 6:1194-1206.

2. Elfrink M., Kalin K., van Ruijven L. et al. MicroCT study on the enamel mineral density of primary molars. *European Journal of Pediatric Dentistry*. 2016. 17:60-64.

3. Rühli FJ, Kuhn G, Evison R, Müller R, Schultz M. Diagnostic value of micro-CT in comparison with histology in the qualitative assessment of historical human skull bone pathologies. *Am J Phys Anthropol*. 2007. 133(4):1099-111. doi: 10.1002/ajpa.20611. PMID: 17530700.

4. Zainuddin MZ, Mohamad NS, Su Keng T, Mohd Yusof MYP. The applications of MicroCT in studying age-related tooth morphological change and dental age estimation: A scoping review. *J Forensic Sci*. 2023; 68: 2048-2056. doi: 10.1111/1556-4029.15352

5. Glancy Spencer, Morris H., Ho Vincent, Klarmann George. Visualizing Collagen Tissue Microarchitecture Using Contrast-Enhanced Micro-CT. *Encyclopedia Journal*. 2024. – 54718. doi: encyclopedia.pub/entry/54718

6. Domenyuk D.A., Chukov S.Z., Anfinogenova O.I. et al. Ap-

plication of computer microtomography in the study of morphostructural peculiarities of hard tissues of teeth in early forms of carious lesions. doi: 10.25207/1608-6228-2018-25-6-57-67 (in Russian).

7. Freitas S., Panzarella F., Karia R. et al. Effect of Pseudocolor Filter in Micro-computed Tomography Images for Detection of Proximal and Occlusal Caries Lesions in Primary Molars. *The Journal of Contemporary Dental Practice*. 2019. 20:279-284. doi: 10.5005/jp-journals-10024-2510.

8. Shetty R., Walia T., Muthu MS et al. Enamel thickness and density of primary teeth with and without early childhood caries: a micro-computer tomography assessment. *European Archives of Paediatric Dentistry*. 2025. doi: 10.1007/s40368-025-01098-3.

9. Lokhande P., Sethuraman B., Deenadayalan G. A Review of Contemporary Fatigue Analysis and Biomaterials Studies in Endodontics. *Materials Science Forum*. 2019; 969: 193-198. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.969.193.

10. Yajvinder and V Gulati. Implementation of Micro CT in CAD/CAM dentistry for image processing and soft computing: a review. 2020. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1432 012079. doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012079

11. Irie M., Rabelo G., Spin-Neto R. et al. Use of Micro-Computed Tomography for Bone Evaluation in Dentistry. *Brazilian dental journal*. 2018; 29: 227-238. doi:10.1590/0103-6440201801979.
12. Kivovics M, Szabo B, Németh O, et al. Comparison between Micro-Computed Tomography and Cone-Beam Computed Tomography in the Assessment of Bone Quality and a Long-Term Volumetric Study of the Augmented Sinus Grafted with an Albumin Impregnated Allograft. *Journal of Clinical Medicine*. 2020; 9: 303 doi: 10.3390/jcm9020303.
13. Tkachev S, Brosalov V, Kit O, Maksimov A, Goncharova A, Sadyrin E, Dalina A, Popova E, Osipenko A, Voloshin M, et al. Unveiling Another Dimension: Advanced Visualization of Cancer Invasion and Metastasis via Micro-CT Imaging. *Cancers*. 2025; 17(7):1139. doi: 10.3390/cancers17071139
14. Tang R, Buckley JM, Fernandez L, Coopey S, Aftreth O, et al. Micro-computed tomography (Micro-CT): a novel approach for intraoperative breast cancer specimen imaging. *Breast Cancer Res Treat*. 2013;139 (2):311-6. doi: 10.1007/s10549-013-2554-6.
15. Schrup S, Maimone S, Villalba M., et al. High-resolution micro-CT to assess breast microcalcification morphometry by histologic lesion subtype and radiologic classification. *Breast Cancer Research and Treatment*. 2025. 214: 49-58. doi:10.1007/s10549-025-07792-6.
16. Qiu Si-Qi et al. Micro-computed tomography (micro-CT) for intraoperative surgical margin assessment of breast cancer: A feasibility study in breast conserving surgery *European Journal of Surgical Oncology*. 2018; 44 (11): 1708-1713 doi:10.1016/j.ejso.2018.06.022
17. Santo BA, Jenkins TD, Ciecierska SS.K., et al. MicroCT and Histological Analysis of Clot Composition in Acute Ischemic Stroke. *Clin Neuroradiol* 2024; 34:431-439 doi: 10.1007/s00062-023-01380-1
18. Karagiannidis E, Papazoglou AS, Sofidis G, et al. Micro-CT-Based Quantification of Extracted Thrombus Burden Characteristics and Association With Angiographic Outcomes in Patients With ST-Elevation Myocardial Infarction: The QUEST-STEMI Study. *Front. Cardiovasc. Med*. 2021;8:646064. doi: 10.3389/fcvm.2021.646064
19. Karagiannidis E, Papazoglou AS, Stalikas N, et al. Serum Ceramides as Prognostic Biomarkers of Large Thrombus Burden in Patients with STEMI: A Micro-Computed Tomography Study. *J. Pers. Med*. 2021;11:89. doi:10.20944/preprints202101.0093.v1
20. Geneci F., Uzuner M. B., Bilecenoglu B., et al. Examination of inner ear structures: a micro-CT study. *Acta Otolaryngologica* 2022;142(1): 1-5. doi: 10.1080/00016489.2021.2015078
21. O'Toole Bom Braga G, Zboray R, Parrilli A, Bulatović M, Caversaccio MD, Wagner F. Otosclerosis under micro-CT: New insights into the disease and its anatomy. *Front Radiol*. 2022;2:965474. doi: 10.3389/fradi.2022.965474. PMID: 37492684; PMCID: PMC1036528
22. Bom Braga, G.O., Parrilli, A., Zboray, R. et al. Quantitative Evaluation of the 3D Anatomy of the Human Osseous Spiral Lamina Using MicroCT. *JARO*. 2023;24:441-452 doi: 10.1007/s10162-023-00904-3
23. Bompoti A, Papazoglou AS, Moysidis DV, Otountzidis N, Karagiannidis E, Stalikas N, Panteris E, Ganesh V, Sanctuary T, Arvanitidis C, et al. Volumetric Imaging of Lung Tissue at Micrometer Resolution: Clinical Applications of Micro-CT for the Diagnosis of Pulmonary Diseases. *Diagnostics*. 2021; 11(11):2075 doi:10.3390/diagnostics11112075
24. Verleden S., Braubach P., Werlein Ch., et al. From Macroscopy to Ultrastructure: An Integrative Approach to Pulmonary Pathology. *Frontiers in Medicine*. 2022;9:859337. doi:10.3389/fmed.2022.859337
25. Redente EF, Kopf KW, Bahadur AN, Robichaud A, Lundblad LK, et al. Application-specific approaches to MicroCT for evaluation of mouse models of pulmonary disease. *PLOS ONE*. 2023;18(2): e0281452. doi: 10.1371/journal.pone.0281452
26. Ausk, B.J., Tucker, A.N., Huber, P. et al. A microCT-based platform to quantify drug targeting. *Eur Radiol Exp*. 2023;7:38. doi:10.1186/s41747-023-00355-8
27. Khomutova EYu, Uralbaev AA, Khomutov AD. Possibilities of radiomics (texture analysis) in computed tomography and magnetic resonance imaging in dentistry (literature review). *Diagnostic and interventional radiology*. 2025; 19 (2): 22-29 (in Russian).
28. Chibisova M.A., Ermolaeva L.A., Ilyin F.Yu., Pavlov A.V., Mashrou MD Islam, Binsumait Hashem M.A. The use of artificial neural networks in the recognition of X-ray image data in outpatient dentistry. *REJR*. 2025; 15(1):41-61. DOI: 10.21569/2222-7415-2025-15-1-41-61 (in Russian).
29. Valton S, Maire E, Lachambre J. et al. DTHE: Dual Tomograph for High Energy, a unique micro-CT platform. *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2022; 27 (3) doi: 10.58286/26628.

**КИСТОЗНЫЕ ОПУХОЛИ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ:
ЛУЧЕВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА**

Степанова Ю.А., Паклина О.В., Ревишвили А.Ш.

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии им. А.В. Вишневского» МЗ РФ. г. Москва, Россия.

Кистозные опухоли поджелудочной железы (КОПЖ) – это опухоли, содержащие кистозные компоненты с различным биологическим поведением, клиническими проявлениями и особенностями визуализации, различаются и их злокачественный потенциал. Наиболее распространенными КОПЖ являются серозные и муцинозные цистаденомы, внутрипротоковые папиллярные муцинозные опухоли и солидно-псевдопапиллярные опухоли.

В последние годы осведомленность специалистов об этих новообразованиях возросла, отчасти из-за применения современных методов визуализации, совершенствуются подходы к лечению различных типов кистозных поражений. Однако в целом, диагностика и лечение КОПЖ, по-прежнему, остаются сложными. КОПЖ состоят из различных тканевых компонентов и каждый из них демонстрирует различное биологическое поведение от доброкачественного до пограничного или даже злокачественного. Из-за частичного совпадения доброкачественных и злокачественных признаков визуализации дифференциальная диагностика доброкачественных и злокачественных КОПЖ затруднительна.

Лучевые методы визуализации эффективны в дифференциальной диагностике КОПЖ, облегчая получение характеристик, оценку наличия агрессивного поведения и оценку резектабельности у пациентов с очевидной малигнизацией. Хотя доступны различные методы визуализации, различение подтипов КОПЖ может оказаться сложным. Первым шагом при оценке КОПЖ является МРТ/МРХПГ, которая дифференцирует большую часть КОПЖ. При сложностях дифференциации по данным МСКТ/МРТ проводится ЭУЗИ (ЭУЗИ с контрастным усилением). Радиомические признаки имеют широкие перспективы применения в дифференциальной диагностике и прогнозирования тактики ведения пациентов с КОПЖ. В сочетании с клиническими проявлениями и признаками визуализации радиомика дает возможность для точной предоперационной диагностики КОПЖ.

Ключевые слова: кистозные опухоли поджелудочной железы, серозная цистаденома, муцинозная цистаденома, внутрипротоковая папиллярно-муцинозная опухоль, солидно-псевдопапиллярная опухоль, диагностика, лучевая диагностика, УЗИ, МСКТ, МРТ.

Контактный автор: Степанова Ю.А., e-mail: stepanovaua@mail.ru

Для цитирования: Степанова Ю.А., Паклина О.В., Ревишвили А.Ш. Кистозные опухоли поджелудочной железы: лучевая дифференциальная диагностика. REJR 2026; 16(1):191-209. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-191-209.

Статья получена: 10.10.25

Статья принята: 12.11.25

PANCREATIC CYSTIC NEOPLASMS: RADIOLOGY DIFFERENTIAL DIAGNOSIS

Stepanova Yu.A., Paklina O.V., Revishvili A.Sh.

A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery. Moscow, Russia.

Pancreatic cystic neoplasms (PCNs) are tumors containing cystic components with different biological behavior, clinical manifestations, and imaging features, and their malignant potential varies. The most common PCNs are serous and mucinous cystadenomas, intraductal papillary mucinous tumors, and solid pseudopapillary tumors.

In recent years, awareness of these neoplasms has increased, partly due to the use of modern imaging techniques, and improved approaches to the treatment of different types of cystic lesions. However, overall, the diagnosis and treatment of PCNs remain challenging. PCNs are composed of different tissue components, and each of them exhibits different biological behavior, ranging from benign to borderline or even malignant. Due to the overlap between benign and malignant imaging features, differential diagnosis of benign and malignant PCNs is difficult.

Radiology imaging is useful in the differential diagnosis of PCNs, facilitating characterization, assessment of aggressive behavior, and evaluation of resectability in patients with obvious malignancy. Although various imaging techniques are available, distinguishing between PCNs subtypes can be challenging. The first step in the evaluation of PCNs is MRI/MRCP, which differentiates most PCNs. When differentiation is difficult with MSCT/MRI, EUS (contrast-enhanced EUS) is performed. Radiomics features have broad application potential in the differential diagnosis and prognosis of PCNs management. When combined with clinical manifestations and imaging features, radiomics enables accurate preoperative diagnosis of PCNs.

Keywords: pancreatic cystic neoplasm, serous cystadenoma, mucinous cystadenoma, intraductal papillary mucinous tumor, solid pseudopapillary tumor, diagnostics, radiology diagnostics, ultrasound, MSCT, MRI.

Corresponding author: Stepanova Yu.A., e-mail: stepanovaua@mail.ru

For citation: Stepanova Yu.A., Paklina O.V., Revishvili A.Sh. Pancreatic cystic neoplasms: radiology differential diagnosis. REJR 2026; 16(1):191-209. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-191-209.

Received: 10.10.25

Accepted: 12.11.25

В Национальном медицинском исследовательском центре (Институте) хирургии им. А.В. Вишневского накоплен один из самых крупных в стране материалов по диагностике и хирургическому лечению кистозных опухолей поджелудочной железы (КОПЖ) [1, 2]. Первое обобщение материала под руководством академика В.Д. Федорова было сделано в 1994 г. С.В. Ширяевой, в диссертационном исследовании на соискание ученой степени кандидата медицинских наук «Оценка эффективности различных методов хирургического лечения кистозных поражений поджелудочной железы» [3]. В начале 2000-х годов по инициативе и под руководством академика РАН Г.Г. Кармазановского были начаты исследования редких форм КОПЖ. Первые в стране публикации по диагностике и лечению этих образований на основании собственного опыта были сделаны сотрудниками НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского [4, 5]. В настоящий момент Г.Г. Кармазановский является признанным лидером в диагностике КОПЖ как в России, так и за рубежом и данная статья написана, в частности, на основании большого числа его исследова-

ний или исследований под его руководством.

В последние годы частота диагностики КОПЖ возросла и, по-прежнему, сохраняет тенденцию к росту. Исследования на основе данных лучевых методов исследований сообщают о распространенности КОПЖ в диапазоне 1,2-19,6% [6-8]. Поскольку этиология и злокачественный потенциал КОПЖ часто не очень ясны, диагностика и лечение этих новообразований вызывают затруднение. За исключением хвоста, большая часть поджелудочной железы (ПЖ) расположена вне брюшины на задней стенке брюшной полости. При отсутствии типичных клинических симптомов заболевания ПЖ (т.е. панкреатита, желтухи и впервые выявленного диабета) раннее выявление КОПЖ затруднено из-за ее глубокого расположения, большинство из них обнаруживают случайно при лучевых обследованиях. По данным общенационального исследования, проведенного в Южной Корее (оценены КОПЖ, происходящие из экзокринной части ПЖ, диагностированные в 30 университетских больницах за 12,5 лет) из 1064 пациентов с КОПЖ у 108 (10,5%) пациентов были поражения, которые были обнаружены во время прохождения обследования

по поводу других заболеваний [6]. В целом, данные литературы показывают, что от 2 до 49% обычных лучевых обследований, преимущественно мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) или магнитно-резонансная томография (МРТ), случайно обнаруживают КОПЖ и с возрастом эта доля увеличивается [9, 10].

Наиболее распространенными КОПЖ являются серозные и муцинозные цистаденомы (СЦА и МЦА), внутрипротоковые папиллярно-муцинозные опухоли (ВПМО) и солидно-псевдопапиллярные опухоли (СППО). На основании эпидемиологических данных, заболеваемость СЦА и МЦА и СППО у женщин значительно выше, чем у мужчин и составляет приблизительно 70%, 95% и 80% соответственно, тогда как при ВПМО она аналогична или немного выше, чем у мужчин – 55% [7]. В последние годы осведомленность специалистов об этих новообразованиях возросла, отчасти из-за применения современных методов визуализации, совершенствуются подходы к лечению различных типов кистозных поражений. Однако в целом, диагностика и лечение КОПЖ, по-прежнему, остаются сложными. КОПЖ состоят из различных тканевых компонентов и каждый из них демонстрирует различное биологическое поведение от доброкачественного до пограничного или даже злокачественного. Из-за частичного совпадения доброкачественных и злокачественных признаков визуализации дифференциальная диагностика доброкачественных и злокачественных КОПЖ затруднительна. Более того, ввиду потенциальной злокачественной трансформации некоторых доброкачественных опухолей, «тихая эпидемия» бессимптомных КОПЖ создаёт определенные затруднения в тактике ведения таких пациентов.

Ультразвуковое исследование (УЗИ) в настоящее время преимущественно считается скрининговым методом при выявлении и дифференциации КОПЖ. Однако, в клиниках, где накоплен значительный опыт диагностики и лечения таких образований УЗИ показывает достаточно хорошие результаты. Однако обнаруженное при УЗИ КОПЖ для дифференциальной диагностики с другими кистозными образованиями требует дополнительного обследования с привлечением МСКТ/МРТ. Ранее МСКТ рассматривали как первичный метод верификации КОПЖ. В настоящий момент МРТ считается более надежным методом, и, когда это возможно, должна являться первым методом диагностики.

Рассмотрим критерии диагностики

наиболее часто встречаемых форм КОПЖ.

Серозная цистаденома и цистаденокарцинома (СЦА).

СЦА является доброкачественной опухолью поджелудочной железы (ПЖ) с исключительно низким потенциалом злокачественности 0,1%. СЦА составляют около 30% всех кистозных новообразований ПЖ. Чаще всего они встречаются у женщин на шестом десятилетии жизни. СЦА в подавляющем числе наблюдений поражает головку и тело железы. СЦА развиваются из внутридолькового протокового эпителия ПЖ, они представляют собой кистозные эпителиальные новообразования, состоящие из богатых гликогеном эпителиальных клеток, выстланных изнутри однослойным кубическим эпителием, вырабатывающих водянистую жидкость, похожую на сыворотку, и являющиеся по своему течению доброкачественными кистозными опухолями. ВОЗ классифицирует их на серозные микрокистозные аденомы и серозные макрокистозные (олигокистозные) аденомы. Долгое время в литературе существовало мнение, что классические серозные КОПЖ (то есть большинство) это многодольчатые многокамерные кистозные массы с центральными звездчатыми рубцами и кальцификатами. Однако M.D. Reid с соавт. в 2015 г. провели клинико-патологический анализ 193 случаев серозных новообразований ПЖ и сделали обзор соответствующей тематической литературы. На основании этих данных авторы переоценили соотношение микрокистозных (солидных) и макрокистозных вариантов этих опухолей, указав на макрокистозный вариант, как наиболее часто встречаемый. Эти данные совпадают и с многолетним опытом НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского по диагностике, лечению кистозных опухолей ПЖ. Таким образом, обычно СЦА представляет собой одиночную кисту, достигающую иногда большого размера. Это так называемый макрокистозный или олигокистозный вариант кистозной опухоли. В более редких случаях СЦА может быть представлена небольшим по размеру кистозным образованием, состоящие из группы отдельных микрокист (от 0,01 до 0,5 см в диаметре), разделённых между собой перегородками, внешне напоминающими «пчелиные соты». В ряде случаев, при избыточном развитии стромальной ткани в перегородках, СЦА может иметь вид солидной опухоли с очень мелкими кистозными включениями. Содержимым СЦА является, как правило, прозрачная жидкость с низкой вязкостью [11–14].

УЗ-визуализация.

Макрокистозная форма СЦА при УЗИ характеризуется чёткими ровными контурами, моно- или полициклической формой, анэхогенной структурой с наличием единичных изо- или гиперэхогенных перегородок и наличием эхоплотной капсулы. Несмотря на то, что по данным литературы при дуплексном сканировании (ДС) в перегородках и капсуле макрокистозных СЦА могут лоцироваться единичные артерии, по нашим данным кровотоков в структурах олигоцистных СЦА не был выявлен ни в одном наблюдении. Микрокистозная форма СЦА, наравне с ранее перечисленными критериями, характеризуется наличием множественных кист диаметром 0,2-2,0 см, вследствие чего определяются множественные перегородки с включениями кальция, количество которых зависит от размеров кист и степени выраженности фиброзного компонента их капсул, поэтому при УЗИ микрокистозная форма СЦА может визуализироваться как солидное образование. Ультразвуковое исследование позволяет определить наличие кальцинатов в центре образования в фиброзных перегородках, называемых «звездчатый центральный рубец», «расходящихся» радиально (по типу «солнечных лучей»). При ДС в перегородках и капсуле образования в 35% случаев лоцируются единичные артерии [12, 15].

МСКТ-визуализация.

Олигокистозные СЦА следует подозревать при однокамерном кистозном образовании с дольчатым контуром. Поскольку опухоль (содержимое кистозной полости) в основном имеет плотность воды, они выглядят гиподенсными при нативной МСКТ. Олигоцистные СЦА с единичными тонкими (в виде пленок) фиброзными перегородками демонстрируют отсутствие контрастирования капсулы и перегородок. Олигокистозную форму СЦА при МСКТ часто бывает трудно дифференцировать от муцинозных новообразований. В этих случаях, как и при всех других КОПЖ, для дальнейшей дифференциации поражения используется МРТ. Серозные микрокистозные аденомы чаще всего имеют дольчатую форму. Патогномоничной в 30% СЦА является картина «солнечных лучей» и кальцификаты. Центральный фиброзный рубец гиперденсный и обычно имеет звездчатую форму. После введения контрастного препарата фиброзные структуры (перегородки) контрастируются. Очаги, состоящие в основном из микроскопических кист, могут иметь солидный вид и демонстрировать однородное усиление после введения контраста. Поскольку серозные микрокистозные аденомы считаются единственными гипер-

васкулярными КОПЖ, паттерн их контрастного усиления является важной отличительной чертой [10, 12, 16, 17].

МРТ-визуализация.

На T1-взвешенном изображении (T1-ВИ) с подавлением жира содержимое кистозной полости СЦА классически гипоинтенсивно, области гиперинтенсивности могут появляться, если имело место внутрикистозное кровоизлияние. Фиброзные компоненты опухоли гипоинтенсивны на T1-ВИ. На T2-ВИ кистозные компоненты СЦА, заполненные жидкостью, гиперинтенсивны относительно прилегающей паренхимы ПЖ, а фиброзные компоненты гипоинтенсивны. Следует отметить, что T2-ВИ является основополагающим в выявлении кистозных компонентов КОПЖ, особенно это эффективно при микрокистозной форме опухоли. Кроме того, любые области кальцификации, если они вообще видны, гипоинтенсивны как на T1, так и на T2-ВИ. После инфузии гадолиниевых контрастных препаратов усиление фиброзных перегородок заметно на ранней и поздней фазах визуализации, усиление «центрального звездчатого рубца» поддерживается и в отсроченную фазу визуализации. Следует отметить, что МРТ более чувствительна в обнаружении жидкости, особенно в случае микрокист, чем МСКТ. Наилучшее изображение микрокистозной СЦА возможно получить при МРТ в режиме магнитно-резонансной холангиопанкреатографии (МРХПГ) [18, 19].

Следует, однако, сказать, что большинство СЦА ПЖ демонстрируют характерную морфологию, включая богатую гликогеном эпителиальную выстилку и выступающие субэпителиальные капилляры, однако обширные дегенеративные макрокистозные изменения могут скрыть эти классические черты. Это явление следует отличать от макрокистозной СЦА, при которой тонкостенные макрокистозные пространства выстланы эпителием. Таким образом, СЦА следует включать в дифференциальную диагностику образований ПЖ с обширными дегенеративными кистозными изменениями.

Озлокачествление СЦА происходит крайне редко. Данные литературы свидетельствуют о том, что дифференциация доброкачественной и злокачественной серозной цистаденомы, как гистологически, так и клинически, может быть очень сложной. На сегодняшний день СЦА считается злокачественной при наличии прорастания опухоли в окружающие ткани и органы или наличии отдаленных метастазов. В 1989 г. D.H. George с соавт. [20] впервые сообщили о слу-

чае серозной микрокистозной аденомы со злокачественным течением, и с тех пор в литературе было зарегистрировано не более 30 случаев серозной цистаденокарциномы, причём все они микрокистозные. В. Jais с соавт. из 2622 случаев США выделили только три цистаденокарциномы [11]. Согласно литературным данным, в большинстве случаев серозной цистаденокарциномы обнаруживаются синхронные или метасинхронные метастазы в печень, инфильтрацию лимфатических узлов, инвазию в селезенку, инфильтрацию и тромбоз селезеночной вены, инвазию в нервную, перинеуральную и стромальную инвазию, а также в желудок, легкие, надпочечники, брюшину и толстую кишку, метастазы в брыжейку.

Муцинозная цистаденома и цистаденокарцинома.

МЦА – это муцинпродуцирующие КОПЖ, не связанные с протоками и имеющие характерную овариоподобную субэпителиальную строму. Встречаются редко, преимущественно у женщин и составляют не более 2,5% всех опухолей ПЖ и 8–10% всех кист железы [21]. Муцинозные кистозные опухоли по биологическому потенциалу подразделяют на пограничные и злокачественные (ВОЗ, 2019) [22]:

- к пограничным опухолям относят муцинозные цистаденомы с низкой, умеренной и высокой степенью дисплазии;
- к злокачественным – муцинозные кистозные опухоли в ассоциации с инвазивной карциномой или инвазивные/неинвазивные муцинозные цистаденокарциномы.

В 80–90% наблюдений МЦА поражают тело и хвост железы. Также в большинстве наблюдений опухоль выявляют у женщин в перименопаузальном периоде (средний возраст 48 лет, соотношение мужчин и женщин 1:20) [21].

Макроскопически опухоль представлена солитарным узлом от 6 до 35 см, округлой формы с фиброзной псевдокапсулой. Связь с протоками отсутствует, за исключением ситуаций, когда течение заболевания осложняется развитием фистулы. Чаще опухоль представлена большей кистой и более мелкими полостями по периферии. Кисты заполнены слизистым, геморрагическим или некротическим содержимым, в перегородках и стенке могут отмечаться участки обызвествления [23].

Выраженная овариоподобная строма более характерна для пограничных МЦА – в цистаденокарциномах она практически не выражена. Согласно решениям XI конгресса Международной ассоциации панкреатологов

(International Association of Pancreatology, Япония, 2004), при отсутствии овариоподобной стромы в муцинозной КОПЖ, не имеющей связи с протоками железы и выявленной у женщин менопаузального возраста, ее следует классифицировать как муцинпродуцирующую опухоль с неопределенным гистогенезом [24].

МЦА имеет значительный злокачественный потенциал, оцениваемый в 10–50% [25]. Опухоль характеризуется медленным ростом. Практически в любой муцинозной опухоли с течением времени появляются участки значимой дисплазии эпителия, переходящие сначала в карциному *in situ* и далее эволюционирующие в цистаденокарциному. Злокачественные формы чаще встречаются в пожилом возрасте. Муцинозная цистаденокарцинома составляет 3,3% от общего числа злокачественных новообразований железы. Макроскопически в опухоли наблюдают выраженный солидный компонент, а их средний диаметр превышает 4 см. Достаточно часто при макроскопическом исследовании операционного материала содержимое полостей муцинозных цистаденокарцином носит геморрагический или некротический характер. При микроскопическом исследовании стенок кист обнаружены признаки тяжелой дисплазии и (или) карциномы *in situ*. Опухолевые клетки с выраженной атипией ядер и большим числом митозов часто формируют сосочковые или ветвящиеся структуры. В зависимости от отсутствия или наличия инвазии стенки кисты и фиброзных перегородок выделяют неинвазивный и инвазивный типы муцинозных цистаденокарцином. Иногда в капсуле и перегородках цистаденокарциномы встречаются псевдосаркоматозные или истинные саркоматозные участки [26].

УЗ-визуализация.

Как МЦА, так и цистаденокарциномы при УЗИ характеризуются четкими и ровными контурами, полициклической формой, жидкостной структурой в капсуле. Образование может быть однокамерное или многокамерное с экзогенными перегородками различной степени выраженности. Содержимое кисты может быть анэхогенным или эхогенным, содержать детрит±солидный пристеночный компонент, может содержать кальцинаты. Пристеночные солидные узлы могут указывать на злокачественность новообразования. Также в полости образования могут определяться пристеночные «дочерние пузыри». Образование не сообщается с системой протоков ПЖ. По данным дуплексного сканирования в перегородках и солидной части образования в 70–80% случаев лоцируются

единичные артерии и вены. Вокруг образования в 67–80% случаев визуализируются огибающие коллатеральные артерии и вены. Кровоток в структуре опухоли лоцируется как при МЦА, так и при цистаденокарциноме, при этом наличие огибающих коллатеральных сосудов в большей степени характерно для цистаденокарциномы (80%) [5, 15].

МСКТ-визуализация.

При МСКТ определяется жидкостное образование с четкими и ровными контурами в капсуле. В полости образования на фоне жидкостного содержимого определяются тонкие перегородки и дополнительные солидные массы. Также в полости образования могут быть пристеночные «дочерние пузыри». Риск малигнизации значительно возрастает при многокамерности образования и наличии сосочковых разрастаний эпителия. В ряде наблюдений муцинозных цистаденокарцином часть полостей почти полностью заполнена опухолевыми массами, поэтому при одновременном выявлении таких трех лучевых признаков, как утолщенные стенки и перегородки, кальцинаты и пристеночные образования, вероятность злокачественной формы опухоли составляет 95%. Накопление контрастного вещества происходит в артериальную и венозную фазы с повышением плотности образования в венозную фазу на 10–26 ед. Н по сравнению с артериальной фазой в 60,6% случаев при цистаденоме и в 100% при цистаденокарциноме [10, 17].

МРТ-визуализация.

На T1-ВИ интенсивность сигнала от опухоли вариабельна и определяется содержанием кисты – может быть гипоинтенсивной, изоинтенсивной или гиперинтенсивной. На T1-ВИ с подавлением жира интенсивность МР-сигнала зависит от белкового содержимого. В капсуле и перегородках возможны гипоинтенсивные очаговые кальцинаты. На T2-ВИ определяется гипоинтенсивная киста с внутренними перегородками, дающими смешанный сигнал, капсула на T2-ВИ также гипоинтенсивна, кальцинаты. При цистаденокарциноме содержимое образования может быть неоднородной интенсивности из-за наличия мягкотканного компонента. МРХПГ позволяет убедиться в отсутствии сообщения опухоли с протоком ПЖ, который может быть смещен или сдавлен опухолью. Динамика накопления образованием контрастного вещества при МРТ аналогична таковой при МСКТ. На T1-ВИ с контрастным усилением контрастирование фиброзной стенки кисты происходит на более поздних постконтрастных изображениях. Следует отметить, что накопление контрастного веще-

ства происходит преимущественно по периферии опухоли. Симптомом, указывающим на малигнизацию, является контрастирование перегородок и солидного компонента опухоли [27].

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль.

ВПМО – это потенциально злокачественная эпителиальная опухоль, развивающаяся в протоковой системе ПЖ и состоящая из продуцирующих муцин клеток, которые формируют сосочковые структуры. По мере роста ВПМО проходит развитие от гипертрофии эпителиальной выстилки панкреатических протоков до инвазивного рака, который является конечной стадией процесса. Факторы риска развития ВПМО в настоящее время четко не определены [28]. Истинная заболеваемость ВПМО остается неизвестной. Изучение М. Kosmahl с соавт. КОПЖ, удаленных во время операций с 1971 по 2003 гг., выявило наличие ВПМО в 18% [29]. W.J. Yoon с соавт. проанализировали 1064 образца резецированных кист ПЖ за 12 лет (30 университетских клиник, Южная Корея), 436 (41%) из них были классифицированы как ВПМО [6]. Таким образом, можно говорить о том, что ВПМО является наиболее распространенной КО ПЖ.

В зависимости от локализации ВПМО выделяют [30]:

I тип – ВПМО панкреатических протоков (ГПП, IPMNmd) – расширение одной или множественных ветвей протоков ≥ 10 мм, сообщение с главным панкреатическим протоком (ГПП); диаметр ГПП < 5 мм;

II тип – ВПМО боковых ветвей (БВ, IPMN-bd) – расширенный проток диаметром 5–9 мм обладает низким, а > 10 мм – высоким потенциалом малигнизации; у пациента может наблюдаться картина панкреатита, вторичного по отношению к обструкции ГПП;

III тип – смешанный (ГПП+БВ, IPMN-MT) – ветвь протока с расширенным > 5 мм главным протоком.

По характеру роста выделяют неинвазивную ВПМО и инвазивную – злокачественную карциному. Неинвазивную ВПМО, в свою очередь, разделяют на доброкачественную опухоль и пограничную (с дисплазией низкой (low grade) и высокой (high grade) степени) [31].

ВПМО ГПП ассоциируется с более высоким риском злокачественности, чем ВПМО боковых протоков: приблизительно 20% ВПМО ГПП связаны с неинвазивным раком, а 40% связаны с инвазивным раком [32].

ВПМО ГПП (составляют до 15–21% ВПМО [33]).

УЗ-визуализация.

ВПМО ГПП при УЗИ определяются в виде протока, расширенного на протяжении с утолщением его стенок, возможны пристеночные сосочковые разрастания различной степени выраженности, а также наличие единичных расширенных сегментарных протоков (рис. 1). При инвазивной форме возможно разрастание опухолевых масс вокруг протока в виде гипозоногенной зоны вокруг ГПП. При ДС отмечается отсутствие признаков кровотока в структуре опухолевых масс [15, 27].



Рис. 1 (Fig. 1)

Рис. 1. УЗИ, В-режим.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль главного панкреатического протока (ГПП (DP)). Представлен расширенный ГПП с пристеночными разрастаниями (указаны стрелками), также сверху указан стрелкой начавший расширяться боковой проток (VL – селезеночная вена).

Fig. 1. US, B-mode.

IPMN of the MPD (DP), shows an expanded MDP with parietal growths (indicated by arrows), also indicated by an arrow at the top is the beginning of expansion of the lateral duct (VL – vena lienalis).

нии мягкотканного компонента вокруг ГПП происходит накопление контраста во все фазы исследования аналогично МСКТ. Наибольшие диагностические возможности при ВПМО имеет МРХПГ, с помощью которой оценивают пространственное расположение как главного, так и долевых панкреатических протоков (рис. 3) [27, 34, 35].

ВМПО боковых ветвей (составляют до 41–64% ВПМО [33]).

УЗ-визуализация.

При ВПМО боковых ветвей УЗИ неэффективно, так как в ПЖ визуализируются



Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. МСКТ, артериальная фаза, аксиальная плоскость.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль главного панкреатического протока (ГПП; (указано стрелкой)). Представлен расширенный ГПП с пристеночными разрастаниями.

Fig. 2. MSCT, arterial phase.

IPMN of the MPD (indicated by the arrow), shows an expanded MPD with parietal growths.

МСКТ-визуализация.

При МСКТ диагностируют расширение ГПП с утолщением его стенок, пристеночные мягкотканые разрастания плотностью до 45 ед. Н (рис. 2). Возможно мягкотканое образование вокруг ГПП, накапливающее контрастное вещество во все фазы исследования [27, 34, 35].

МРТ-визуализация.

При МРТ также определяется расширение ГПП с утолщением его стенок, а также сегментарных протоков первого порядка (особенно в режиме МРХПГ). При введении контрастного вещества при распростране-

только кистозные полости различной степени выраженности, связь которых с ГПП чаще всего не удается установить (рис. 4). При незначительной выраженности процесса возможно наличие зоны пониженной эхогенности и мелких кистозных образований, при значительном распространении визуализируются кистозные образования в виде «грозди винограда». При ДС кровотока в перегородках и солидной части образования не фиксируется [15, 27].

МСКТ-визуализация.

При МСКТ определяется аналогичная картина (визуализируют единичные кистоз-



Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. МРХПГ.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль главного панкреатического протока (ГПП, (указано стрелкой)). Представлен расширенный ГПП с пристеночными разрастаниями.

Fig. 3. MRCP.

IPMN of the MPD (indicated by the arrow), shows an enlarged MPD with parietal growths.

ные полости в паренхиме ПЖ (рис. 5) или гроздьевидное скопление кистозных структур). При контрастном усилении стенки расширенных протоков отчетливо визуализируются в портальную или отсроченную фазы исследования в виде ободка по периферии расширенных протоков [27, 34, 35].

МРТ-визуализация.

Методом выбора при диагностике ВПМО боковых ветвей ГПП является МРХПГ, при которой четко дифференцируются кистозные полости, связанные с ГПП (рис. 6). При опухолях боковых ветвей МР-томограмма напоминает гроздь винограда, т.е. визуализируется мультицентрическое внутридольковое расширение протоков 2-3-го порядка в виде кист диаметром 1-3 мм с тонкими перегородками между полостями [27, 34, 35].

Смешанный тип ВПМО (составляют до 22-38% ВПМО [33]).

Смешанный тип ВПМО демонстрирует визуальные характеристики как ВПМО ГПП, так и ВПМО боковых ветвей. При смешанном типе ВПМО имеются следующие критерии диагностики, аналогичные для всех методов лучевого исследования: расширение ГПП, а также боковых протоков, на фоне которого определяются как единичные кисты, так и кистозные образования в виде «грозди

винограда». В просвете кистозных образований возможно наличие пристеночных папиллярных солидных структур, а также распространение солидного компонента на паренхиму ПЖ. Как и в случае с ВПМО ГПП и ВПМО боковых ветвей, при ВПМО смешанного типа наибольшие диагностические возможности у МРХПГ, дающей возможность в трехмерном изображении проследить ход как ГПП, так и боковых протоков на всем протяжении (рис. 7-9) [27, 34, 35].

Солидно-псевдопапиллярная опухоль.

СППО – это редкое, обычно доброкачественное новообразование, представленное мономорфными клетками, имеющими различную экспрессию эпителиальных, мезенхимальных и эндокринных маркеров и формирующих плотные солидные и псевдопапиллярные структуры с частым развитием кистозно-геморрагических изменений. Этиология и факторы риска развития СППО в настоящее время неизвестны. СППО чаще встречается у девочек и женщин молодого возраста, в среднем до 30 лет. Соотношение женщин и мужчин составляет 10:1, средний возраст больных около 22 (2-85) лет. Из-за длительного бессимптомного течения опухоли могут достигать гигантских размеров и лишь тогда проявляться наличием пальпируемого образования. Размер образования может широко варьировать (в пределах от 0,5 до 35 см). Данные образования относятся к опухолям с низким потенциалом злокачественности, они медленно прогрессируют и имеют благоприятный прогноз. На дооперционном этапе диагноз СППО устанавливается верно только у 25% пациентов [5, 36, 37].

На основании проведенных исследований С.-С. Yu и соавт. (2007) выделили 3 типа СППО по данным инструментальных методов исследования [38]:

тип 1 – соответствует полностью солидным новообразованиям;

тип 2 – характеризуется сочетанием солидных участков с кровоизлияниями;

тип 3 – выявляются обширные кровоизлияния и кистозные образования.

Именно тип 1, представленный солидными опухолями, составляет до 40% всех выявляемых СППО и является наиболее сложным для дифференциальной диагностики с нейроэндокринными неоплазиями и аденокарциномами [39]. Следует отметить, что появление кистозных очагов с кровоизлияниями не зависит напрямую от увеличения размеров опухоли, что возможно связано с относительно незначительным числом наблюдений в опубликованных исследовани-

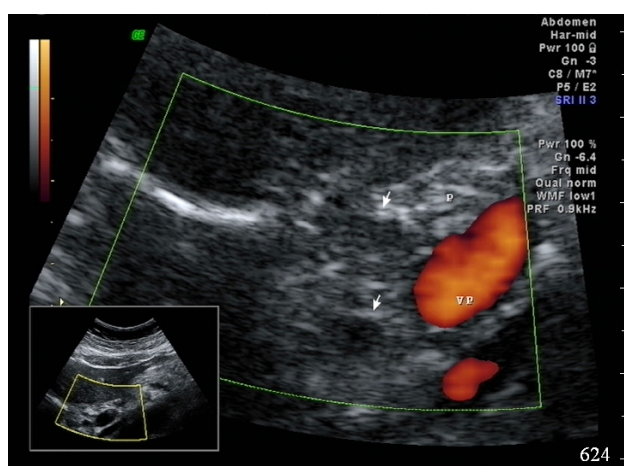


Рис. 4 а (Fig. 4 а)

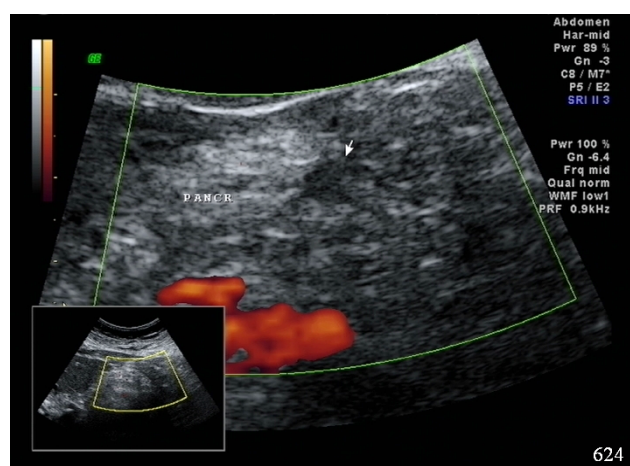


Рис. 4 б (Fig. 4 б)

Рис. 4. УЗИ, режим ЭОДС.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль боковых ветвей: а – головка поджелудочной железы; б – тело поджелудочной железы. Мелкие кистозные полости в паренхиме железы (указаны стрелками), связь полостей с главным панкреатическим протоком проследить не удастся.

Fig. 4. US, Energy Doppler Imaging.

IPMN of the lateral branches: a – pancreatic head; b – pancreatic body. Small cystic cavities in the parenchyma of the gland (indicated by arrows), the connection of the cavities with the MPD cannot be traced.



Рис. 5 а (Fig. 5 а)



Рис. 5 б (Fig. 5 б)

Рис. 5. МСКТ, аксиальная плоскость.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль боковых ветвей: а – артериальная фаза; б – венозная фаза. Мелкие кистозные полости в паренхиме поджелудочной железы, связь полостей с главным панкреатическим протоком проследить не удастся.

Fig. 5. MSCT, axial section.

IPMN of the lateral branches: a – arterial phase; b – venous phase. Small cystic cavities in the pancreatic parenchyma; the connection of the cavities with the MPD cannot be seen.

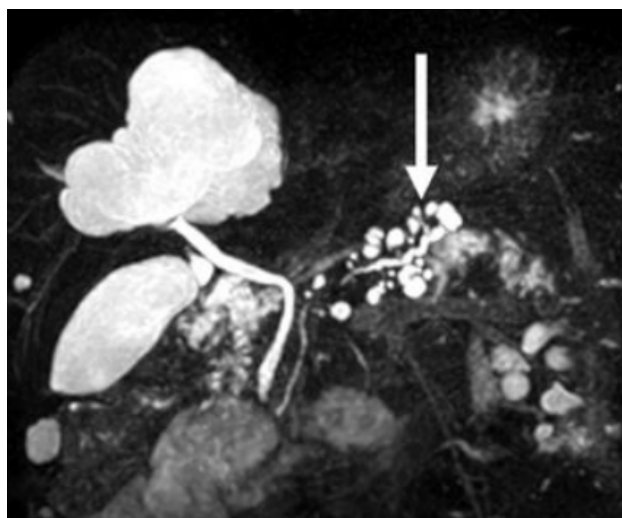


Рис. 6 (Fig. 6)

Рис. 6. МРХПГ.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль боковых ветвей (указано стрелкой), кистозные полости, соединенные с главным панкреатическим протоком узкими протоками.

Fig. 6. MRCP.

IPMN of the lateral branches (indicated by the arrow), connected to the MPD by narrow ducts.

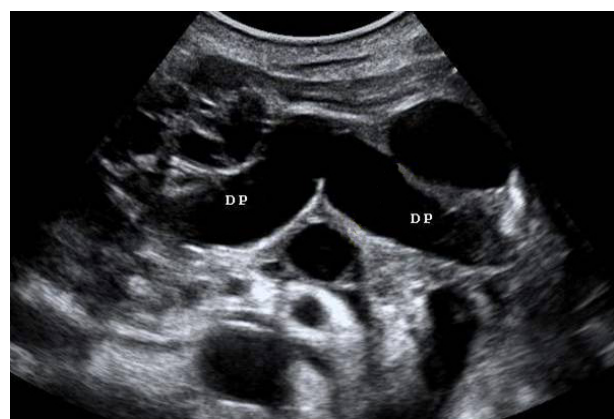


Рис. 7 а (Fig. 7 а)



Рис. 7 б (Fig. 7 б)

Рис. 7. УЗИ.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль смешанного типа: а – расширенный ГПП (DP) и кистозные полости в проекции боковых протоков; б – пристеночный солидный компонент внутри одной из полостей (указано стрелкой).

Fig. 7. US.

mixed-type IPMN: a – dilated MPD (DP) and cystic cavities in the projection of the lateral ducts; b – parietal solid component inside one of the cavities (indicated by the arrow).



Рис. 8 (Fig. 8)

Рис. 8. МСКТ, аксиальная плоскость, артериальная фаза.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль головки поджелудочной железы (указано стрелкой). Представлено кистозно-солидное образование, исходящее из главного панкреатического протока и вовлекающее боковые протоки.

Fig. 8. MSCT, axial section, arterial phase.

pancreatic head IPMN (indicated by the arrow). A cystic-solid lesion is shown, originating from the MPD and involving the lateral ducts.

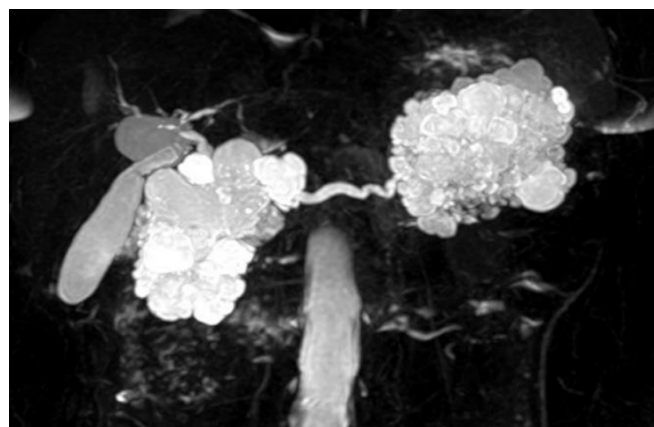


Рис. 9 (Fig. 9)

Рис. 9. МРХПГ.

Внутрипротоковая папиллярная муцинозная опухоль смешанного типа головки и хвоста поджелудочной железы представлена множественными кистозными образованиями различного размера с неоднородным содержимым, соединенными главным панкреатическим протоком.

Fig. 9. MRCP.

Mixed-type IPMN of the pancreatic head and tail, which is presented by multiple cystic lesions of various sizes with heterogeneous contents, connected by MPD.

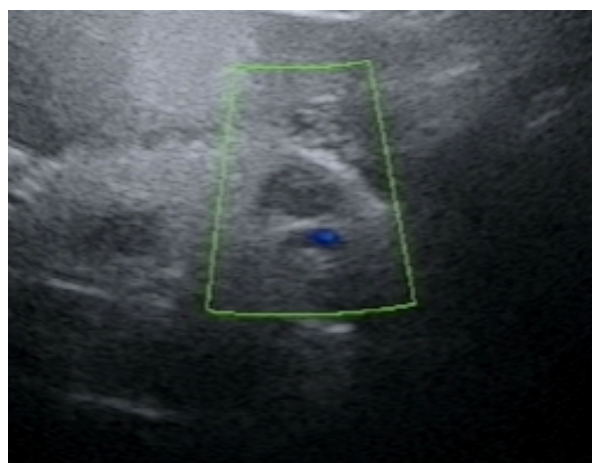


Рис. 10 а (Fig. 10 а)

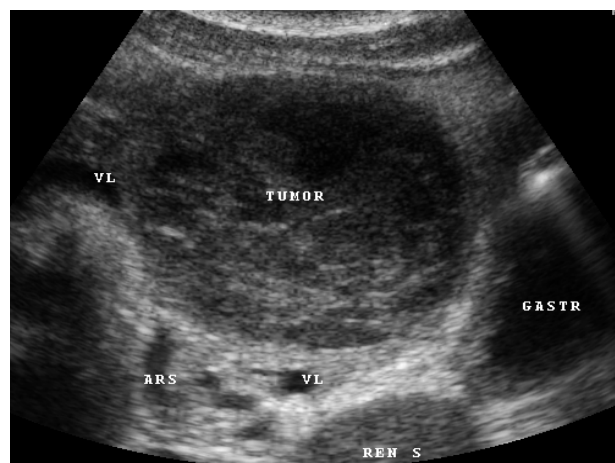


Рис. 10 б (Fig. 10 б)

Рис. 10. УЗИ.

Солидно-псевдопапиллярная опухоль: а – режим ЦДК, солидное гипоехогенное аваскулярное образование тела-хвоста поджелудочной железы; б – В-режим, кистозно-солидное образование (TUMOR) хвоста поджелудочной железы представлено солидной опухолью с множественными мелкокистозными включениями (VL – селезеночная вена, GASTR – желудок, ARS – почечная артерия, REN S – почка).

Fig. 10. US.

SPPT: a – Color Doppler Imaging, solid hypoechoic avascular lesion of the pancreatic body-tail; b – B-mode, cystic-solid lesion (TUMOR) of the pancreatic tail is represented by a solid tumor with multiple small cystic inclusions (VL – vein lienalis, GASTR – stomach, ARS – renal artery, REN S – kidney).

ях. Предполагается, что увеличение выборки пациентов позволит либо доказать её, либо определить какую-то другую зависимость.

УЗ-визуализация.

При УЗИ СППО выявляются на фоне неизменной паренхимы железы как образования солидной или кистозно-солидной структуры. Основной компонент опухоли гипо- или изоэхогенный относительно паренхимы ПЖ. Контуры образования чаще четкие, ровные, иногда визуализируется изо- или гиперэхогенная капсула, в структуре могут определяться единичные кальцинаты. Незначительные кистозные полости (участки кровоизлияний) в опухоли при УЗИ дифференцируются плохо. Построение трехмерной реконструкции ультразвукового изображения позволяет более четко верифицировать жидкостные структуры в образовании. При размерах солидного образования более 3,5 см в диаметре в его структуре лоцируются единичные артерии и вены. При преимущественно кистозной структуре образования кровотоков в солидной части опухоли при ДС не определяется (рис. 10) [5, 15, 40].

МСКТ-визуализация.

Ряд авторов считают, что наиболее чувствительный метод диагностики СППО – это МСКТ. При МСКТ СППО имеет вид четко очерченного округлого гиподенсного образования, представленного солидным и кистозным компонентами в различных соотношениях, без внутренних перегородок. В нативную фазу можно отчетливо визуализировать кальцинаты в структуре опухоли. При болюсном контрастном усилении отмечается неравномерное накопление контрастного препарата опухолью с максимальным повышением плотности в артериальную и/или венозную фазу исследования, однако степень усиления всегда ниже, чем нормальной паренхимы железы. Плотность жидкостного компонента примерно соответствует плотности старых гематом. При I типе опухолей возможны высокие цифры единиц Хаусфилда в жидкостном компоненте образования, что, по-видимому, связано с тем, что кистозные полости очень малы и на томографических срезах в точку измерения может попадать «подрезанный» солидный компонент опухоли (рис. 11) [14, 40, 41].

МРТ-визуализация.

МРТ является наиболее эффективным методом в дифференциальной диагностике кистозного и солидного компонентов внутри опухоли и оценке резектабельности СППО. СППО при МРТ обычно определяется как хорошо отграниченное образование с гетерогенной интенсивностью в T1- и T2-ВИ вслед-

ствие неоднородного строения. Только при МРТ практически во всех наблюдениях можно проследить капсулу опухоли, что является одной из отличительных особенностей СППО. На МРТ капсула обычно гипоинтенсивна как на T1, так и на T2-ВИ с умеренным контрастированием после внутривенного введения. Кальцификаты наблюдаются в 30% СППО и чаще встречаются в более крупных опухолях. Могут наблюдаться различные типы кальцификации: от периферической до центральной, грубой или слегка аморфной. После введения гадолиний-содержащего внутривенного контрастного препарата выявляется слабое повышение интенсивности сигнала по периферии опухоли, усиление и постепенное заполнение солидных участков с прогрессирующим контрастированием в портальной и отсроченной фазах. В то время, как более крупные поражения демонстрируют гетерогенное контрастирование, более мелкие опухоли контрастируются однородно. Зоны высокой интенсивности сигнала на T1-ВИ и низкой интенсивности или неоднородного сигнала на T2-ВИ указывают на продукты крови в опухоли. Внутреннее кровотечение считается патогномичным признаком для СППО, как было отмечено в 29–88,9% случаев, что помогает провести дифференциальную диагностику с нейроэндокринными неоплазиями. Также могут быть видны внутренние уровни жидкости. Однако картина СППО с минимальными жидкостными геморрагическими полостями по данным МСКТ и МРТ практически неотличима от нефункционирующих нейроэндокринных опухолей (рис. 12). Поэтому дооперационная дифференциальная диагностика СППО крайне сложна, частота ошибочного диагноза составляет до 38% [14, 40, 41].

По некоторым данным, злокачественные формы СППО обнаруживаются у 15% взрослых пациентов и у 13% детей. До настоящего времени нет четких критериев злокачественности для СППО. Единственным четким доказательством наличия злокачественного течения опухоли являются метастазы. Следует отметить, что гистологическое строение и иммунофенотип метастазов при этом соответствуют основным характеристикам типов СППО. Согласно рекомендациям D. Santini и соавт. [42], критериями злокачественности СППО являются периневральная и сосудистая инвазии, а также прорастание опухоли в прилежащую ткань ПЖ.

Признаки высокого риска малигнизации.

Наиболее высокий риск малигнизации



Рис. 11 а (Fig. 11 a)



Рис. 11 б (Fig. 11 b)



Рис. 11 в (Fig. 11 c)



Рис. 11 г (Fig. 11 d)

Рис. 11. МСКТ, аксиальная плоскость.

Солитно-псевдопапиллярная опухоль тела поджелудочной железы: а – нативная фаза, образование изоденсно паренхиме поджелудочной железы; б – артериальная фаза контрастного усиления, гиподенсное образование; в – венозная фаза контрастного усиления, гиподенсное образование; г –отсроченная фаза контрастного усиления, образование изоденсно паренхиме поджелудочной железы.

Fig. 11. MSCT, axial section.

SPPT of the pancreas body: а – native phase, the lesion isodense to the pancreatic parenchyma; б – arterial phase of contrast enhancement, hypodense lesion; в – venous phase of contrast enhancement, hypodense lesion; д – delayed phase of contrast enhancement, the lesion isodense to the pancreatic parenchyma.

относится к МЦА и ВПМО. Визуальные признаки ВПМО, которые отмечены, как «тревожные» в отношении злокачественности в международных консенсусных рекомендациях «Фукуока – 2017» (The 2017 international consensus Fukuoka guidelines) включают [43]:

- диаметр кисты более 3 см;
- утолщенная контрастно усиленная стенка кисты;
- контрастно усиленный пристеночный узел менее 5 мм;
- расширение ГПП на 5–9 мм;
- резкое изменение диаметра ГПП с восходящей атрофией ПЖ, лимфаденопатией и скоростью роста кисты большей или равной 5 мм за 2 года.

Рекомендации Американского колледжа радиологии предлагают использовать пороговое значение диаметра MPD в 7 мм [44].

тогда обследования второй линии после МСКТ/МРТ. Оно играет важную роль в оценке и классификации КОПЖ благодаря своей способности определять внутреннюю структуру (содержимое, перегородки, солидный компонент), которая дополнительно усиливается при использовании контрастного вещества. ЭУЗИ позволяет поставить точный диагноз во всех случаях, неправильно диагностированных другими методами визуализации. Так, например, при микрокистозной СЦА обнаруживают даже небольшие области тесно скомпонованных микрокист [12]. При СППО можно лучше визуализировать опухолевую капсулу, наличие в ней кальцинатов. Тонкоигольная аспирация под контролем ЭУЗИ обычно обеспечивает окончательный диагноз, но чувствительность может снизиться, если нет адекватного образца для анализа. ЭУЗИ также широко используется

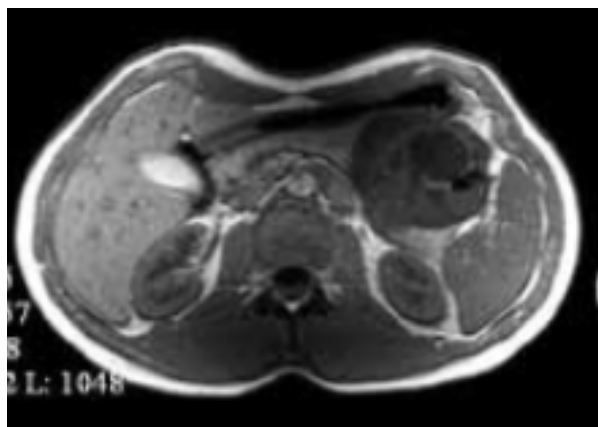


Рис. 12 а (Fig. 12 a)

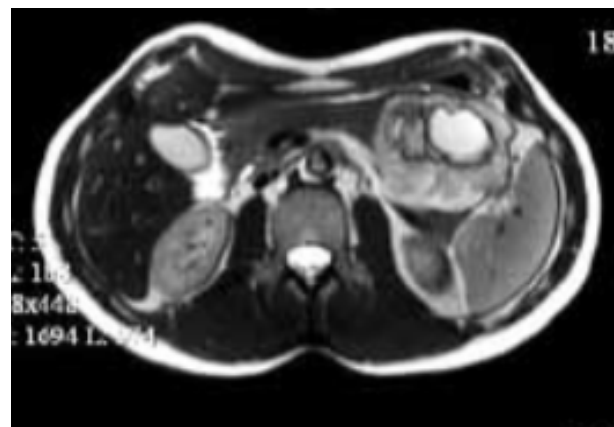


Рис. 12 б (Fig. 12 b)

Рис. 12. МРТ, аксиальная плоскость.

Солитно-псевдопапиллярная опухоль в хвосте поджелудочной железы: а – T1-ВИ, кистозно-солидная опухоль сниженной интенсивности сигнала с жидкостными полостями, в которых прослеживается гиперинтенсивный компонент – метгемоглобин; б – T2-ВИ, кистозно-солидная опухоль повышенной интенсивности сигнала с жидкостными полостями, в которых прослеживается гипоинтенсивный компонент – метгемоглобин

Fig. 12. MRI, axial plane.

Pancreatic tail SPPT: a – T1-WI, cystic-solid tumor of reduced signal intensity with fluid cavities in which there is a hyperintense component – methemoglobin; b – T2-WI, cystic-solid tumor of increased signal intensity with fluid cavities in which there is a hypointense component – methemoglobin.

Подобные изменения предполагают необходимость дальнейшего исследования с помощью эндоскопического УЗИ.

Эндоскопическое ультразвуковое исследование (ЭУЗИ).

ЭУЗИ признано важным диагностическим инструментом для лечения КОПЖ. При сложностях лучевой дифференциальной диагностики ЭУЗИ назначается в качестве ме-

для наблюдения за более крупными кистами (>2 см), которые связаны с большим злокачественным потенциалом [45].

Для пациентов, у которых затруднительно подтвердить злокачественность при эндоскопии, дальнейшее развитие заболевания должно тщательно контролироваться с помощью МРТ/МРХПГ, опухолевых маркеров и ЭУЗИ. После обнаружения КОПЖ следует

сосредоточиться на его иссечении и долгосрочном наблюдении на основе вопросов, связанных с симптомами локального роста и прогрессирования.

Радиомика и искусственный интеллект.

Говоря о диагностике в настоящее время, нельзя не сказать об использовании радиомики и искусственного интеллекта в процессе дифференциации образований. Тактика ведения пациентов с КОПЖ остается важной клинической проблемой, балансирующей между необходимостью раннего выявления злокачественного потенциала и избыточным лечением доброкачественных поражений. Хотя традиционные лучевые подходы являются основой оценки КОПЖ, они ограничены субъективной интерпретацией и переменной точностью. Интеграция передовой лучевой визуализации и искусственного интеллекта в лечение КОПЖ предлагает многообещающий путь вперед, потенциально повышая диагностическую точность, улучшая стратификацию рисков и персонализируя стратегию ведения пациентов. Методы сегментации образований и радиомического анализа на основе искусственного интеллекта могут обеспечить более объективные и воспроизводимые оценки, потенциально революционизируя принятие клинических решений. Однако полная реализация потенциала искусственного интеллекта в лечении КОПЖ требует дальнейшей проверки посредством строгих многоцентровых перспективных исследований. По мере развития этой области МРТ используется чаще, чем другие методы, и искусственный интеллект становится бесценным инструментом в ар-

сенале врача, в конечном итоге повышая диагностическую точность при дифференциации и результаты лечения пациентов в сложной ситуации КОПЖ [46, 47].

Заключение.

КОПЖ – это опухоли, содержащие кистозные компоненты с различным биологическим поведением, клиническими проявлениями и особенностями визуализации, различается и их злокачественный потенциал. Лучевые методы визуализации эффективны в дифференциальной диагностике КОПЖ, облегчая получение характеристик, оценку наличия агрессивного поведения и оценку резектабельности у пациентов с очевидной малигнизацией. Хотя доступны различные методы визуализации, различение подтипов КОПЖ может оказаться сложным. Первым шагом при оценке КОПЖ является МРТ/МРХПГ, которая дифференцирует большую часть КОПЖ. При сложностях дифференциации по данным МСКТ/МРТ выполняется ЭУЗИ. Радиомические признаки имеют широкие перспективы применения в дифференциальной диагностике и прогнозирования тактики ведения пациентов с КОПЖ. В сочетании с клиническими проявлениями и признаками визуализации радиомика дает возможность для точной предоперационной диагностики КОПЖ.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Кармазановский Г.Г., Саввина Т.В., Ширияева С.В., Данилов М.В., Вихорев А.В., Буриев И.М. Кистозные опухоли поджелудочной железы. Хирургия. 1994; 1: 10-14.
2. Данилов М.В., Буриев И.М., Глабай В.А. Дифференциальная диагностика и хирургическая тактика при кистозных поражениях поджелудочной железы. Анналы хирургической гепатологии. 1999; 4(2): 153-154.
3. Ширияева С.В. Оценка эффективности различных методов хирургического лечения кистозных поражений поджелудочной железы. Канд. Дисс. М., 1994, 175 с.
4. Степанова Ю.А., Кармазановский Г.Г., Егоров В.И., Кочатков А.В., Дубова Е.А., Косова И.А., Солодина Е.Н. Возможности лучевых методов исследования в диагностике внутрипротоковых папиллярных муцинозных опухолей. Анналы хирургической гепатологии. 2009; 14(3): 69-79.
5. Степанова Ю.А., Щеголев А.И., Кармазановский Г.Г., Дубова Е.А., Осипова Н.Ю., Егоров В.И., Цыганков В.Н. Солидно-псевдопапиллярные опухоли поджелудочной железы: диагностика и лечение. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2009; 9: 29-40.
6. Yoon W.J., Lee J.K., Lee K.H., Ryu J.K., Kim Y.T., Yoon Y.B. Cystic neoplasms of the exocrine pancreas: an update of a nationwide survey in Korea. *Pancreas*. 2008 Oct; 37(3): 254-258. doi: 10.1097/MPA.0b013e3181676ba4.
7. Perri G., Marchegiani G., Frigerio I., Derveniz C.G., Conlon K.C., Bassi C., Salvia R. Management of Pancreatic Cystic Lesions. *Dig Surg*. 2020; 37: 1-9. doi: 10.1159/000496509
8. van Huijgevoort N., Del C.M., Wolfgang C.L., van Hooft J.E., Besselink M.G. Diagnosis and Management of Pancreatic Cystic Neoplasms: Current Evidence and Guidelines. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2019; 16: 676-689. doi: 10.1038/s41575-019-0195-x
9. Mamone G., Barresi L., Tropea A., Di Piazza A., Miraglia R. MRI of Mucinous Pancreatic Cystic Lesions: A New Updated Morphological Approach for The Differential Diagnosis. Up-

dates Surg. 2020; 72: 617–637. doi: 10.1007/s13304-020-00800-y

10. Наджлаа Фахри Хассан, Кассим Амир Хади Тадж Аль-Дин. Компьютерная томография в диагностике кистозных поражений поджелудочной железы. REJR. 2022; 12(3): 47-57. doi: 10.21569/2222-7415-2022-12-3-47-57

11. Jais B., Rebours V., Malleo G., Salvia R., Fontana M., Maggino L., Bassi C., Manfredi R., Moran R., Lennon A.M., Zaheer A., Wolfgang C., Hruban R., Marchegiani G., Fernández Del Castillo C., Brugge W., Ha Y., Kim M.H., Oh D., Hirai I., Kimura W., Jang J.Y., Kim S.W., Jung W., Kang H., Song S.Y., Kang C.M., Lee W.J., Crippa S., Falconi M., Gomatos I., Neoptolemos J., Milanetto A.C., Sperti C., Ricci C., Casadei R., Bissolati M., Balzano G., Frigerio I., Girelli R., Delhay M., Bernier B., Wang H., Jang K.T., Song D.H., Huggett M.T., Oppong K.W., Pererva L., Kopchak K.V., Del Chiaro M., Segersvard R., Lee L.S., Conwell D., Osvaldt A., Campos V., Agüero Garcete G., Napoleon B., Matsumoto I., Shinzeki M., Bolado F., Fernandez J.M., Keane M.G., Pereira S.P., Acuna I.A., Vaquero E.C., Angiolini M.R., Zerbi A., Tang J., Leong R.W., Faccineto A., Morana G., Petrone M.C., Arcidiacono P.G., Moon J.H., Choi H.J., Gill R.S., Pavey D., Ouasssi M., Sastre B., Spandre M., De Angelis C.G., Rios-Vives M.A., Concepcion-Martin M., Ikeura T., Okazaki K., Frulloni L., Messina O., Lévy P. Serous cystic neoplasm of the pancreas: a multi-national study of 2622 patients under the auspices of the International Association of Pancreatology and European Pancreatic Club (European Study Group on Cystic Tumors of the Pancreas). Gut. 2016 Feb; 65(2): 305-312. doi: 10.1136/gutjnl-2015-309638.

12. Dababneh Y, Mousa OY. Pancreatic Serous Cystadenoma. 2022 Oct 31. In: StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan.

13. Reid M.D., Choi H.J., Memis B., Krasinskas A.M., Jang K.T., Akkas G., Maithel S.K., Sarmiento J.M., Kooby D.A., Basturk O., Adsay V. Serous Neoplasms of the Pancreas: A Clinicopathologic Analysis of 193 Cases and Literature Review With New Insights on Macrocystic and Solid Variants and Critical Reappraisal of So-called "Serous Cystadenocarcinoma". Am J Surg Pathol. 2015 Dec; 39(12): 1597-1610. doi: 10.1097/PAS.0000000000000559.

14. Степанова Ю.А. Лучевые методы диагностики кистозных образований поджелудочной железы и паранепанкреатической зоны на этапах хирургического лечения. Докт.Дисс. М., 2009, 398 с.

15. Степанова Ю.А. Ультразвуковая диагностика заболеваний поджелудочной железы (учебное пособие). Под редакцией академика РАН А.С. Кокова. Изд. 4-е, дополн. и перераб. М., 2023, 135 с.

16. Panarelli N.C., Park K.J., Hruban R.H., Klimstra D.S. Microcystic serous cystadenoma of the pancreas with subtotal cystic degeneration: another neoplastic mimic of pancreatic pseudocyst. Am J Surg Pathol. 2012 May; 36(5): 726-731. doi: 10.1097/PAS.0b013e31824cf879.

17. Lin X.Z., Wu Z.Y., Li W.X., Zhang J., Xu X.Q., Chen K.M., Yan F.H. Differential diagnosis of pancreatic serous oligocystic adenoma and mucinous cystic neoplasm with spectral CT imaging: initial results. Clin Radiol. 2014 Oct; 69(10): 1004-1010. doi: 10.1016/j.crad.2014.05.003.

18. Mottola J.C., Sahni V.A., Erturk S.M., Swanson R., Banks

P.A., Morteale K.J. Diffusion-weighted MRI of focal cystic pancreatic lesions at 3.0-Tesla: preliminary results. Abdom Imaging. 2012 Feb; 37(1): 110-117. doi: 10.1007/s00261-011-9737-6.

19. Ishigami K., Nishie A., Asayama Y., Ushijima Y., Takayama Y., Fujita N., Takahata S., Ohtsuka T., Ito T., Igarashi H., Ikari S., Metz C.M., Honda H. Imaging pitfalls of pancreatic serous cystic neoplasm and its potential mimickers. World J Radiol. 2014 Mar 28; 6(3): 36-47. doi: 10.4329/wjr.v6.i3.36.

20. George D.H., Murphy F., Michalski R., Ulmer B.G. Serous cystadenocarcinoma of the pancreas: A new entity? Am J Surg Pathol. 1989; 13: 61–66.

21. Rytych J., Krogh K., Yang G.Y., Escobar D.J. Mucinous pancreatic tumor overview. PathologyOutlines.com website. <https://www.pathologyoutlines.com/topic/pancreasmucin.html>. Accessed April 21st, 2025.

22. Nagtegaal I.D., Odze R.D., Klimstra D., Paradis V., Rugge M., Schirmacher P., Washington K.M., Carneiro F., Cree I.A.; WHO Classification of Tumours Editorial Board. The 2019 WHO classification of tumours of the digestive system. Histopathology. 2020; 76(2): 182-188. doi: 10.1111/his.13975.

23. Brugge W.R. Diagnosis and management of cystic lesions of the pancreas. J Gastrointest Oncol. 2015 Aug; 6(4): 375-88. doi: 10.3978/j.issn.2078-6891.2015.057.

24. Tanaka M., Chari S., Adsay V., Fernandez-del Castillo C., Falconi M., Shimizu M., Yamaguchi K., Yamao K., Matsuno S.; International Association of Pancreatology. International consensus guidelines for management of intraductal papillary mucinous neoplasms and mucinous cystic neoplasms of the pancreas. Pancreatology. 2006; 6(1-2): 17-32. doi: 10.1159/000090023.

25. Chandwani R., Allen P.J. Cystic Neoplasms of the Pancreas. Annu Rev Med. 2016; 67: 45-57. doi: 10.1146/annurev-med-051914-022011.

26. Izumo A, Yamaguchi K, Eguchi T, Nishiyama K, Yamamoto H, Yonemasu H, Yao T, Tanaka M., Tsuneyoshi M. Mucinous cystic tumor of the pancreas: immunohistochemical assessment of "ovarian-type stroma". Oncol Rep. 2003; 10(3): 515-525.

27. Степанова Ю.А. Кистозные опухоли. Лучевая диагностика и терапия в гастроэнтерологии. Под ред. проф. Кармазановского Г.Г. М., ГЭОТАР-Медиа, 2014. С.431-454.

28. Ohtsuka T., Fernandez-Del Castillo C., Furukawa T., Hijioka S., Jang J.Y., Lennon A.M., Miyasaka Y., Ohno E., Salvia R., Wolfgang C.L., Wood L.D. International evidence-based Kyoto guidelines for the management of intraductal papillary mucinous neoplasm of the pancreas. Pancreatology. 2024 Mar; 24(2): 255-270. doi: 10.1016/j.pan.2023.12.009.

29. Kosmahl M., Pauser U., Peters K., Sipos B., Lüttges J., Kremer B., Klöppel G. Cystic neoplasms of the pancreas and tumor-like lesions with cystic features: a review of 418 cases and a classification proposal. Virchows Arch. 2004; 445(2): 168-178. doi: 10.1007/s00428-004-1043-z.

30. European Study Group on Cystic Tumours of the Pancreas. European evidence-based guidelines on pancreatic cystic neoplasms. Gut. 2018; 67(5): 789-804. doi:10.1136/gutjnl-2018-316027

31. Basturk O., Hong S.M., Wood L.D., Adsay N.V., Albores-Saavedra J., Biankin A.V., Brosens L.A., Fukushima N., Gog-

- gins M., Hruban R.H., Kato Y., Klimstra D.S., Klöppel G., Krasinskas A., Longnecker D.S., Matthaei H., Offerhaus G.J., Shimizu M., Takaori K., Terris B., Yachida S., Esposito I., Furukawa T.; Baltimore Consensus Meeting. A Revised Classification System and Recommendations From the Baltimore Consensus Meeting for Neoplastic Precursor Lesions in the Pancreas. *Am J Surg Pathol*. 2015; 39(12): 1730-1741. doi: 10.1097/PAS.0000000000000533.
32. Tanaka M. Intraductal Papillary Mucinous Neoplasm of the Pancreas as the Main Focus for Early Detection of Pancreatic Adenocarcinoma. *Pancreas*. 2018; 47(5): 544-550. doi: 10.1097/MPA.0000000000001047.
33. Levink I., Bruno M.J., Cahen D.L. Management of intraductal papillary mucinous neoplasms: controversies in guidelines and future perspectives. *Curr Treat Options Gastroenterol*. 2018; 16(3): 316-332. doi: 10.1007/s11938-018-0190-2
34. Hu F., Hu Y., Wang D., Ma X., Yue Y., Tang W., Liu W., Wu P., Peng W., Tong T. Cystic Neoplasms of the Pancreas: Differential Diagnosis and Radiology Correlation. *Front Oncol*. 2022 Mar 1; 12: 860740. doi: 10.3389/fonc.2022.860740.
35. Miller F.H., Lopes Vendrami C., Recht H.S., Wood C.G., Mittal P., Keswani R.N., Gabriel H., Borhani A.A., Nikolaidis P., Hammond N.A. Pancreatic Cystic Lesions and Malignancy: Assessment, Guidelines, and the Field Defect. *Radiographics*. 2022; 42(1): 87-105. doi: 10.1148/rg.210056.
36. Nagtegaal I.D., Odze R.D., Klimstra D., Paradis V., Rugge M., Schirmacher P., Washington K.M., Carneiro F., Cree I.A.; WHO Classification of Tumours Editorial Board. The 2019 WHO classification of tumours of the digestive system. *Histopathology*. 2020; 76(2): 182-188. doi: 10.1111/his.13975.
37. Гордиенко Е.Н., Паклина О.В., Чекмарева И.А., Горин Д.С. Силидно-псевдопапиллярная опухоль поджелудочной железы. Актуальные клинико-морфологические и молекулярно-биологические аспекты. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2013; 8: 70-75.
38. Yu C.C., Tseng J.H., Yeh C.N., Hwang T.L., Jan Y.Y. Clinicopathological study of solid and pseudopapillary tumor of pancreas: emphasis on magnetic resonance imaging findings. *World J Gastroenterol*. 2007 Mar 28; 13(12): 1811-185. doi: 10.3748/wjg.v13.i12.1811.
39. Gandhi D., Sharma P., Parashar K., Kochar P.S., Ahuja K., Sawhney H., Sharma S. Solid pseudopapillary Tumor of the Pancreas: Radiological and surgical review. *Clin Imaging*. 2020; 67: 101-107. doi: 10.1016/j.clinimag.2020.06.008.
40. Степанова Ю.А. Лучевые методы диагностики кистозных образований поджелудочной железы и паранкреатической зоны на этапах хирургического лечения. Докт. Дисс. М., 2009, 398 с.
41. Alvarez X.D., Fernando Alcázar C., Hernando Sanz A., Mora Oliver I., Granel L., Barreras J.A., Calero A., Carbonell Morote S., Domingo C., Estevan R., Oliver I., López Andujar R., Sabater L., Compañ A., Ramia J.M. Solid pseudopapillary neoplasms of the pancreas: Multicenter Vasepa study. *Cir Esp (Engl Ed)*. 2024; 102(6): 307-313. doi: 10.1016/j.cireng.2024.02.001.
42. Santini D., Poli F., Lega S. Solid-papillary tumors of the pancreas: histopathology. *JOP*. 2006; 7(1): 131-136.
43. Tanaka M., Fernández-Del Castillo C., Kamisawa T., Jang J.Y., Levy P., Ohtsuka T., Salvia R., Shimizu Y., Tada M., Wolfgang C.L. Revisions of international consensus Fukuoka guidelines for the management of IPMN of the pancreas. *Pancreatol*. 2017; 17(5): 738-753. doi: 10.1016/j.pan.2017.07.007.
44. Megibow A.J., Baker M.E., Morgan D.E., Kamel I.R., Sahani D.V., Newman E., Brugge W.R., Berland L.L., Pandharipande P.V. Management of Incidental Pancreatic Cysts: A White Paper of the ACR Incidental Findings Committee. *J Am Coll Radiol*. 2017; 14(7): 911-923. doi: 10.1016/j.jacr.2017.03.010.
45. Lisotti A., Napoleon B., Facciorusso A., Cominardi A., Crinò S.F., Brighi N., Gincul R., Kitano M., Yamashita Y., Marchegiani G., Fusaroli P. Contrast-enhanced EUS for the characterization of mural nodules within pancreatic cystic neoplasms: systematic review and meta-analysis. *Gastrointest Endosc*. 2021; 94(5): 881-889.e5. doi: 10.1016/j.gie.2021.06.028.
46. Rangwani S., Ardeshta D.R., Rodgers B., Melnychuk J., Turner R., Culp S., Chao W.L., Krishna S.G. Application of Artificial Intelligence in the Management of Pancreatic Cystic Lesions. *Biomimetics (Basel)*. 2022; 7(2): 79. doi: 10.3390/biomimetics7020079.
47. Seyithanoglu D., Durak G., Keles E., Medetalibeyoglu A., Hong Z., Zhang Z., Taktak Y.B., Cebeci T., Tiwari P., Velichko Y.S., Yazici C., Tirkes T., Miller F.H., Keswani R.N., Spampinato C., Wallace M.B., Bagci U. Advances for Managing Pancreatic Cystic Lesions: Integrating Imaging and AI Innovations. *Cancers (Basel)*. 2024; 16(24): 4268. doi: 10.3390/cancers16244268.
- hepatology. 2009; 14(3): 69-79 (in Russian).
5. Stepanova Yu.A., Shchegolev A.I., Karmazanovsky G.G., Dubova E.A., Osipova N.Yu., Egorov V.I., Tsygankov V.N. Solid pseudopapillary tumors of the pancreas: diagnosis and treatment. *Surgery. Journal named after N.I. Pirogov*. 2009; 9: 29-40 (in Russian).
6. Yoon W.J., Lee J.K., Lee K.H., Ryu J.K., Kim Y.T., Yoon Y.B. Cystic neoplasms of the exocrine pancreas: an update of a nationwide survey in Korea. *Pancreas*. 2008 Oct; 37(3): 254-258. doi: 10.1097/MPA.0b013e3181676ba4.
7. Perri G., Marchegiani G., Frigerio I., Derveniz C.G., Conlon K.C., Bassi C., Salvia R. Management of Pancreatic Cystic Lesions. *Dig Surg*. 2020; 37: 1-9. doi: 10.1159/000496509

References:

- Karmazanovsky G.G., Savvina T.V., Shiryayeva S.V., Danilov M.V., Vikhorev A.V., Buriev I.M. Cystic tumors of the pancreas. *Surgery*. 1994; 1: 10-14 (in Russian).
- Danilov M.V., Buriev I.M., Glabay V.A. Differential diagnostics and surgical tactics for cystic lesions of the pancreas. *Annals of surgical hepatology*. 1999; 4(2): 153-154.
- Shiryayeva S.V. Evaluation of the effectiveness of various methods of surgical treatment of cystic lesions of the pancreas. *Cand. Diss. M., 1994, 175 p. (in Russian)*.
- Stepanova Yu.A., Karmazanovsky G.G., Egorov V.I., Kochatkov A.V., Dubova E.A., Kosova I.A., Solodinina E.N. Possibilities of radiation research methods in the diagnosis of intraductal papillary mucinous tumors. *Annals of surgical*

8. van Huijgevoort N., Del C.M., Wolfgang C.L., van Hooft J.E., Besselink M.G. *Diagnosis and Management of Pancreatic Cystic Neoplasms: Current Evidence and Guidelines*. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2019; 16: 676-689. doi: 10.1038/s41575-019-0195-x
9. Mamone G., Barresi L., Tropea A., Di Piazza A., Miraglia R. *MRI of Mucinous Pancreatic Cystic Lesions: A New Updated Morphological Approach for The Differential Diagnosis*. *Updates Surg*. 2020; 72: 617-637. doi: 10.1007/s13304-020-00800-y
10. Najlaa Fakhri Hassan, Qassim Amir Hadi Taj Al-Din. *Computed tomography in the diagnosis of cystic lesions of the pancreas*. *REJR*. 2022; 12(3): 47-57. doi: 10.21569/2222-7415-2022-12-3-47-57
11. Jais B., Rebours V., Malleo G., Salvia R., Fontana M., Maggino L., Bassi C., Manfredi R., Moran R., Lennon A.M., Zaheer A., Wolfgang C., Hruban R., Marchegiani G., Fernández Del Castillo C., Brugge W., Ha Y., Kim M.H., Oh D., Hirai I., Kimura W., Jang J.Y., Kim S.W., Jung W., Kang H., Song S.Y., Kang C.M., Lee W.J., Crippa S., Falconi M., Gomatos I., Neoptolemos J., Milanetto A.C., Sperti C., Ricci C., Casadei R., Bissolati M., Balzano G., Frigerio I., Girelli R., Delhaye M., Bernier B., Wang H., Jang K.T., Song D.H., Huggett M.T., Oppong K.W., Pererva L., Kopchak K.V., Del Chiaro M., Segersvard R., Lee L.S., Conwell D., Osvaldt A., Campos V., Agüero Garcete G., Napoleon B., Matsumoto I., Shinzeki M., Bolado F., Fernandez J.M., Keane M.G., Pereira S.P., Acuna I.A., Vaquero E.C., Angiolini M.R., Zerbi A., Tang J., Leong R.W., Faccineto A., Morana G., Petrone M.C., Arcidiacono P.G., Moon J.H., Choi H.J., Gill R.S., Pavey D., Ouasssi M., Sastre B., Spandre M., De Angelis C.G., Rios-Vives M.A., Concepcion-Martin M., Ikeura T., Okazaki K., Frulloni L., Messina O., Lévy P. *Serous cystic neoplasm of the pancreas: a multinational study of 2622 patients under the auspices of the International Association of Pancreatology and European Pancreatic Club (European Study Group on Cystic Tumors of the Pancreas)*. *Gut*. 2016 Feb; 65(2): 305-312. doi: 10.1136/gutjnl-2015-309638.
12. Dababneh Y, Mousa OY. *Pancreatic Serous Cystadenoma*. 2022 Oct 31. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan.
13. Reid M.D., Choi H.J., Memis B., Krasinskas A.M., Jang K.T., Akkas G., Maithel S.K., Sarmiento J.M., Kooby D.A., Basturk O., Adsay V. *Serous Neoplasms of the Pancreas: A Clinicopathologic Analysis of 193 Cases and Literature Review With New Insights on Macrocystic and Solid Variants and Critical Reappraisal of So-called "Serous Cystadenocarcinoma"*. *Am J Surg Pathol*. 2015; 39(12): 1597-1610. doi: 10.1097/PAS.0000000000000559.
14. Stepanova Yu.A. *Radiation methods for diagnostics of cystic formations of the pancreas and parapancreatic zone at the stages of surgical treatment*. *Doct. Diss. M.* 2009, 398 p. (in Russian).
15. Stepanova Yu.A. *Ultrasound diagnostics of pancreatic diseases (study guide)*. Edited by Academician of the Russian Academy of Sciences L.S. Kokov. Publ. 4th, supplemented. and revised. M., 2023, 135 p. (in Russian).
16. Panarelli N.C., Park K.J., Hruban R.H., Klimstra D.S. *Microcystic serous cystadenoma of the pancreas with subtotal cystic degeneration: another neoplastic mimic of pancreatic pseudocyst*. *Am J Surg Pathol*. 2012; 36(5): 726-731. doi: 10.1097/PAS.0b013e31824cf879.
17. Lin X.Z., Wu Z.Y., Li W.X., Zhang J., Xu X.Q., Chen K.M., Yan F.H. *Differential diagnosis of pancreatic serous oligocystic adenoma and mucinous cystic neoplasm with spectral CT imaging: initial results*. *Clin Radiol*. 2014; 69(10): 1004-1010. doi: 10.1016/j.crad.2014.05.003.
18. Mottola J.C., Sahni V.A., Erturk S.M., Swanson R., Banks P.A., Mortelet K.J. *Diffusion-weighted MRI of focal cystic pancreatic lesions at 3.0-Tesla: preliminary results*. *Abdom Imaging*. 2012; 37(1): 110-117. doi: 10.1007/s00261-011-9737-6.
19. Ishigami K., Nishie A., Asayama Y., Ushijima Y., Takayama Y., Fujita N., Takahata S., Ohtsuka T., Ito T., Igarashi H., Ikari S., Metz C.M., Honda H. *Imaging pitfalls of pancreatic serous cystic neoplasm and its potential mimickers*. *World J Radiol*. 2014; 6(3): 36-47. doi: 10.4329/wjr.v6.i3.36.
20. George D.H., Murphy F., Michalski R., Ulmer B.G. *Serous cystadenocarcinoma of the pancreas: A new entity?* *Am J Surg Pathol*. 1989; 13: 61-66.
21. Ryttych J., Krogh K., Yang G.Y., Escobar D.J. *Mucinous pancreatic tumor overview*. *PathologyOutlines.com website*. <https://www.pathologyoutlines.com/topic/pancreasmucin.html>. Accessed April 21st, 2025.
22. Nagtegaal I.D., Odze R.D., Klimstra D., Paradis V., Rugge M., Schirmacher P., Washington K.M., Carneiro F., Cree I.A.; *WHO Classification of Tumours Editorial Board*. *The 2019 WHO classification of tumours of the digestive system*. *Histopathology*. 2020; 76(2): 182-188. doi: 10.1111/his.13975.
23. Brugge W.R. *Diagnosis and management of cystic lesions of the pancreas*. *J Gastrointest Oncol*. 2015; 6(4): 375-88. doi: 10.3978/j.issn.2078-6891.2015.057.
24. Tanaka M., Chari S., Adsay V., Fernandez-del Castillo C., Falconi M., Shimizu M., Yamaguchi K., Yamao K., Matsuno S. *International Association of Pancreatology. International consensus guidelines for management of intraductal papillary mucinous neoplasms and mucinous cystic neoplasms of the pancreas*. *Pancreatol*. 2006; 6(1-2): 17-32. doi: 10.1159/000090023.
25. Chandwani R., Allen P.J. *Cystic Neoplasms of the Pancreas*. *Annu Rev Med*. 2016; 67: 45-57. doi: 10.1146/annurev-med-051914-022011.
26. Izumo A., Yamaguchi K., Eguchi T., Nishiyama K., Yamamoto H., Yonemasu H., Yao T., Tanaka M., Tsuneyoshi M. *Mucinous cystic tumor of the pancreas: immunohistochemical assessment of "ovarian-type stroma"*. *Oncol Rep*. 2003; 10(3): 515-525.
27. Stepanova Yu.A. *Cystic tumors. Radiological diagnostics and therapy in gastroenterology*. Edited by prof. Karmazanovskiy G.G. M., GEOTAR-Media, 2014. PP. 431-454 (in Russian).
28. Ohtsuka T., Fernandez-Del Castillo C., Furukawa T., Hijioka S., Jang J.Y., Lennon A.M., Miyasaka Y., Ohno E., Salvia R., Wolfgang C.L., Wood L.D. *International evidence-based Kyoto guidelines for the management of intraductal papillary mucinous neoplasm of the pancreas*. *Pancreatol*. 2024; 24(2): 255-270. doi: 10.1016/j.pan.2023.12.009.
29. Kosmahl M., Pauser U., Peters K., Sipos B., Lüttges J., Kremer B., Klöppel G. *Cystic neoplasms of the pancreas and*

- tumor-like lesions with cystic features: a review of 418 cases and a classification proposal. *Virchows Arch.* 2004; 445(2): 168-178. doi: 10.1007/s00428-004-1043-z.
30. European Study Group on Cystic Tumours of the Pancreas. European evidence-based guidelines on pancreatic cystic neoplasms. *Gut.* 2018; 67(5): 789-804. doi:10.1136/gutjnl-2018-316027
31. Basturk O., Hong S.M., Wood L.D., Adsay N.V., Albores-Saavedra J., Biankin A.V., Brosens L.A., Fukushima N., Goggins M., Hruban R.H., Kato Y., Klimstra D.S., Klöppel G., Krasinskas A., Longnecker D.S., Matthaei H., Offerhaus G.J., Shimizu M., Takaori K., Terris B., Yachida S., Esposito I., Furukawa T.; Baltimore Consensus Meeting. A Revised Classification System and Recommendations From the Baltimore Consensus Meeting for Neoplastic Precursor Lesions in the Pancreas. *Am J Surg Pathol.* 2015; 39(12): 1730-1741. doi: 10.1097/PAS.0000000000000533.
32. Tanaka M. Intraductal Papillary Mucinous Neoplasm of the Pancreas as the Main Focus for Early Detection of Pancreatic Adenocarcinoma. *Pancreas.* 2018; 47(5): 544-550. doi: 10.1097/MPA.0000000000001047.
33. Levink I., Bruno M.J., Cahen D.L. Management of intra-ductal papillary mucinous neoplasms: controversies in guidelines and future perspectives. *Curr Treat Options Gastroenterol.* 2018; 16(3): 316-332. doi: 10.1007/s11938-018-0190-2
34. Hu F., Hu Y., Wang D., Ma X., Yue Y., Tang W., Liu W., Wu P., Peng W., Tong T. Cystic Neoplasms of the Pancreas: Differential Diagnosis and Radiology Correlation. *Front Oncol.* 2022; 12: 860740. doi: 10.3389/fonc.2022.860740.
35. Miller F.H., Lopes Vendrami C., Recht H.S., Wood C.G., Mittal P., Keswani R.N., Gabriel H., Borhani A.A., Nikolaidis P., Hammond N.A. Pancreatic Cystic Lesions and Malignancy: Assessment, Guidelines, and the Field Defect. *Radiographics.* 2022; 42(1): 87-105. doi: 10.1148/rg.210056.
36. Nagtegaal I.D., Odze R.D., Klimstra D., Paradis V., Rugge M., Schirmacher P., Washington K.M., Carneiro F., Cree I.A.; WHO Classification of Tumours Editorial Board. The 2019 WHO classification of tumours of the digestive system. *Histopathology.* 2020; 76(2): 182-188. doi: 10.1111/his.13975.
37. Gordienko E.N., Pakhlin O.V., Chekmareva I.A., Gorin D.S. Solid-pseudopapillary tumor of the pancreas. Relevant clinico-morphological and molecular-biological aspects. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova.* 2013; 8: 70-75 (in Russian).
38. Yu C.C., Tseng J.H., Yeh C.N., Hwang T.L., Jan Y.Y. Clinicopathological study of solid and pseudopapillary tumor of pancreas: emphasis on magnetic resonance imaging findings. *World J Gastroenterol.* 2007; 13(12): 1811-185. doi: 10.3748/wjg.v13.i12.1811.
39. Gandhi D., Sharma P., Parashar K., Kochar P.S., Ahuja K., Sawhney H., Sharma S. Solid pseudopapillary Tumor of the Pancreas: Radiological and surgical review. *Clin Imaging.* 2020; 67: 101-107. doi: 10.1016/j.clinimag.2020.06.008.
40. Stepanova Yu.A. Radiation methods for diagnostics of cystic formations of the pancreas and parapancreatic zone at the stages of surgical treatment. *Doct. Diss. M., 2009, 398 p. (in Russian).*
41. Alvarez X.D., Fernando Alcázar C., Hernando Sanz A., Mora Oliver I., Granel L., Barreras J.A., Calero A., Carbonell Morote S., Domingo C., Estevan R., Oliver I., López Andujar R., Sabater L., Compañ A., Ramia J.M. Solid pseudopapillary neoplasms of the pancreas: Multicenter Vasepa study. *Cir Esp (Engl Ed).* 2024; 102(6): 307-313. doi: 10.1016/j.cireng.2024.02.001.
42. Santini D., Poli F., Lega S. Solid-papillary tumors of the pancreas: histopathology. *JOP.* 2006 Jan 11; 7(1): 131-136.
43. Tanaka M., Fernández-Del Castillo C., Kamisawa T., Jang J.Y., Levy P., Ohtsuka T., Salvia R., Shimizu Y., Tada M., Wolfgang C.L. Revisions of international consensus Fukuoka guidelines for the management of IPMN of the pancreas. *Pancreatol.* 2017; 17(5): 738-753. doi: 10.1016/j.pan.2017.07.007.
44. Megibow A.J., Baker M.E., Morgan D.E., Kamel I.R., Sahani D.V., Newman E., Brugge W.R., Berland L.L., Pandharipande P.V. Management of Incidental Pancreatic Cysts: A White Paper of the ACR Incidental Findings Committee. *J Am Coll Radiol.* 2017; 14(7): 911-923. doi: 10.1016/j.jacr.2017.03.010.
45. Lisotti A., Napoleon B., Facciorusso A., Cominardi A., Crinò S.F., Brighi N., Gincul R., Kitano M., Yamashita Y., Marchegiani G., Fusaroli P. Contrast-enhanced EUS for the characterization of mural nodules within pancreatic cystic neoplasms: systematic review and meta-analysis. *Gastrointest Endosc.* 2021; 94(5): 881-889.e5. doi: 10.1016/j.gie.2021.06.028.
46. Rangwani S., Ardeshta D.R., Rodgers B., Melnychuk J., Turner R., Culp S., Chao W.L., Krishna S.G. Application of Artificial Intelligence in the Management of Pancreatic Cystic Lesions. *Biomimetics (Basel).* 2022; 7(2): 79. doi: 10.3390/biomimetics7020079.
47. Seyithanoglu D., Durak G., Keles E., Medetalibeyoglu A., Hong Z., Zhang Z., Taktak Y.B., Cebeci T., Tiwari P., Velichko Y.S., Yazici C., Tirkes T., Miller F.H., Keswani R.N., Spampinato C., Wallace M.B., Bagci U. Advances for Managing Pancreatic Cystic Lesions: Integrating Imaging and AI Innovations. *Cancers (Basel).* 2024; 16(24): 4268. doi: 10.3390/cancers16244268.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ МРТ В ДИАГНОСТИКЕ ДИФFUЗНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПЕЧЕНИ

Раджабов М.Э., Бахтиозин Р.Ф.

ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский Университет), г. Москва, Россия.

Обзор посвящен систематизации возможностей количественных методов магнитно-резонансной томографии (МРТ) в комплексной диагностике диффузных заболеваний печени. Диффузные заболевания печени, характеризующиеся повреждением гепатоцитов и снижением функциональной активности органа, представляют собой серьезную, глобальную проблему, часто приводящую к хроническим состояниям. В последние годы МРТ переходит от качественных оценок к точным количественным измерениям паренхимы печени, предлагая неинвазивную, стандартизированную и точную альтернативу биопсии. Особое внимание уделяется таким новым количественным методикам МРТ, как магнитно-резонансная эластография (МРЭ) для оценки степени фиброза печени у пациентов с циррозом и гепатитами, измерение фракции жира по протонной плотности (PDFF) для количественной оценки стеатоза печени, методам оценки метаболизма железа в печени, включая T2 релаксометрию и анализ коэффициента интенсивности сигнала, актуальным при таких состояниях, как гемохроматоз, и радиомике как инструменту для извлечения текстурной информации из МРТ-изображений, позволяющей проводить более детальный анализ изменений в паренхиме печени..

Ключевые слова: гемохроматоз, диффузные заболевания печени, накопление железа.

Контактный автор: Раджабов М. Э., e-mail: murad.rajabov@mail.ru

Для цитирования: Раджабов М.Э., Бахтиозин Р.Ф. Количественные методы МРТ в диагностике диффузных заболеваний печени. REJR 2026; 16(1):210-222. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-210-222.

Статья получена: 03.06.25

Статья принята: 03.09.25

QUANTITATIVE MRI METHODS IN THE DIAGNOSIS OF DIFFUSE LIVER DISEASES

Radzhabov M.E., Bakhtiozin R.F.

Sechenov University. Moscow, Russia.

This review systematizes the capabilities of quantitative magnetic resonance imaging (MRI) methods in the comprehensive diagnosis of diffuse liver diseases. Diffuse liver diseases, characterized by hepatocyte damage and decreased functional activity, represent a serious, global problem, often leading to chronic conditions. In recent years, MRI has shifted from qualitative assessments to precise quantitative measurements of the liver parenchyma, offering a noninvasive, standardized, and accurate alternative to biopsy. Particular attention is paid to such new quantitative MRI techniques as magnetic resonance elastography (MRE) for assessing the degree of liver fibrosis in patients with cirrhosis and hepatitis, proton density lipid fraction (PDFF) measurement for quantifying liver steatosis, methods for assessing iron metabolism in the liver, including T2 relaxometry and signal intensity ratio analysis, which are relevant in conditions such as hemochromatosis, and radiomics as a tool for extracting texture information from MRI images, allowing for a more detailed analysis of changes in the liver parenchyma.

Keywords: hemochromatosis, diffuse liver disease, iron accumulation.

Corresponding author: Radzhabov M.E., e-mail: murad.rajabov@mail.ru

For citation: Radzhabov M.E., Bakhtiozin R.F. Quantitative MRI methods in the diagnosis of diffuse liver diseases. REJR 2026; 16(1):210-222. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-210-222.

Received: 03.06.25

Accepted: 03.09.25

Диффузные заболевания печени являются широко распространенными во всем мире и включают в себя патологические изменения печени, которые возникают при повреждении гепатоцитов и снижении функции печени и в большинстве случаев могут привести к хронизации процесса [1].

Из-за растущей распространенности этих заболеваний существует необходимость в высокоточной стандартизированной и неинвазивной количественной оценке для диагностики и выбора оптимальной лечебной тактики с последующим наблюдением [2].

Ключевой представитель диффузных патологий – стеатоз, или жировая дистрофия печени. Высокая распространенность и потенциал к прогрессированию делают его приоритетным объектом для неинвазивной оценки.

Степень стеатоза определяется по биопсии печени с прямой гистологической визуализацией по количеству клеток с внутриклеточными жировыми вакуолями: нет (0% гепатоцитов), легкая (0–33% гепатоцитов), умеренная (33–66% гепатоцитов) и тяжелая (>66% гепатоцитов). По мере увеличения степени стеатоза наблюдаются следующие закономерности: на УЗИ – повышенная эхогенность паренхимы печени и снижение четкости таких внутрипеченочных структур, как стенки сосудов; на КТ в нативную фазу плотность печени меньше нормы, хотя плотность селезенки не изменена; при МРТ значения PDFF повышенные (рис. 1) [2].

В сфере неинвазивной диагностики заболеваний печени магнитно-резонансная томография (МРТ) утвердила себя как «золотой стандарт». Это обусловлено исключительной точностью в диагностике, определении стадии и мониторинге данных патологий [3–5]. Особенно выделяется магнитно-резонансная эластография (МРЭ), позволяющая с высокой чувствительностью (91%) и специфичностью (96%) выявлять фиброз на стадиях 2 и выше (F2-4) согласно международной шкале METAVIR [6].

За последние годы значительно усовершенствовались технологии количественного анализа паренхимы печени как в нативных, так и в контрастно-усиленных изображениях [7]. Среди передовых методик МРТ можно выделить: последовательность T2/T2*, используемую для измерения содержания железа; МР-эластография (МРЭ) обеспечивает неинвазивную оценку жесткости паренхимы, действуя как «виртуальная биопсия» для точного определения стадий фиброза и ранней диагностики цирроза по всей площади органа [8, 9]. Методика основана на анализе механических сдвиговых волн, индуцирующих колебания в тканях печени (рис. 2 [16]) [10].

Среди всех доступных методов визуализации МРТ представляет собой наиболее перспективный метод количественной оценки диффузного заболевания печени с использованием различных методов и физических принципов, позволяющих достичь очень высокой точности.

Диффузные заболевания печени возникают при различной этиологии повреждении гепатоцитов и других клеток, составляющих паренхиму печени, с последующими изменениями печеночной ткани, что приводит к глобальному снижению функции печени. Болезненные процессы, которые диффузно поражают печень, включают чрезмерную перегрузку веществами из-за экзогенного поступления или из-за генетических изменений, иммунных или аутоиммунных заболеваний, инфекций, сосудистых повреждений, естественного течения большинства этих патологических расстройств, приводящих к изменению архитектуры печени. МРТ с последовательностью химического сдвига позволяет определить интенсивность сигнала в печени в фазе и противофазе, что позволяет оценить перегрузку паренхимы печени железом.

Гемохроматоз – это заболевание, характеризующееся избыточным накоплением железа в тканях организма, что приводит к дисфункции различных органов. Обычно всасывание железа строго регулируется, но при гемохроматозе организм всасывает из-

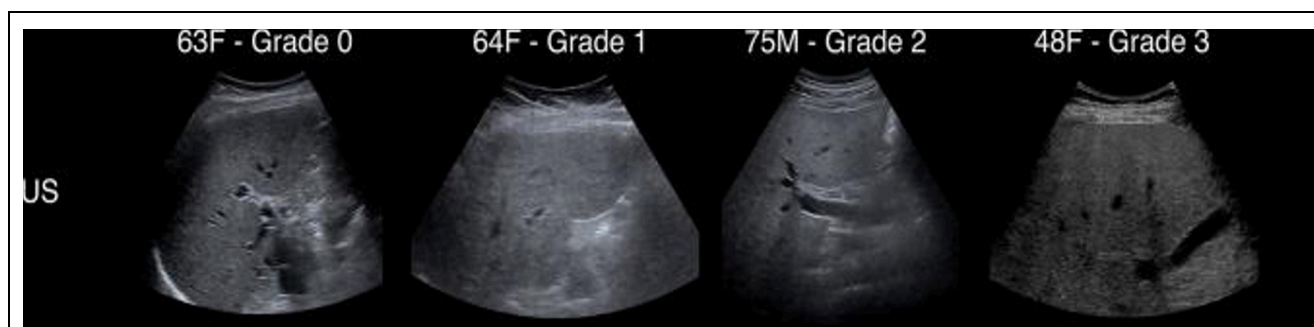


Рис. 1 а (Fig. 1 a)

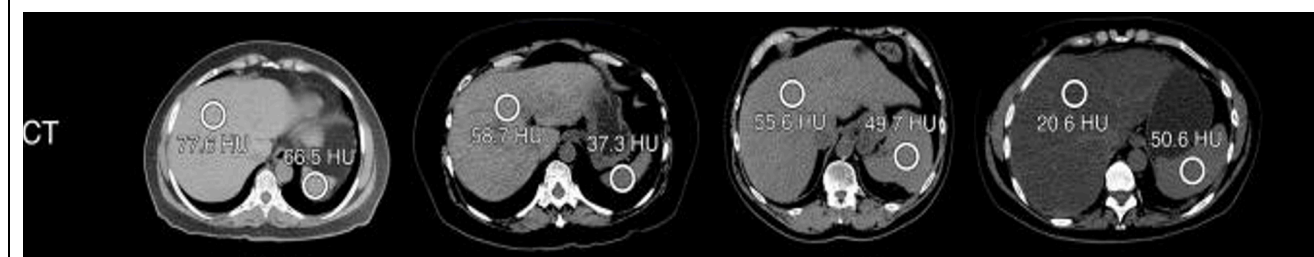


Рис. 1 б (Fig. 1 b)

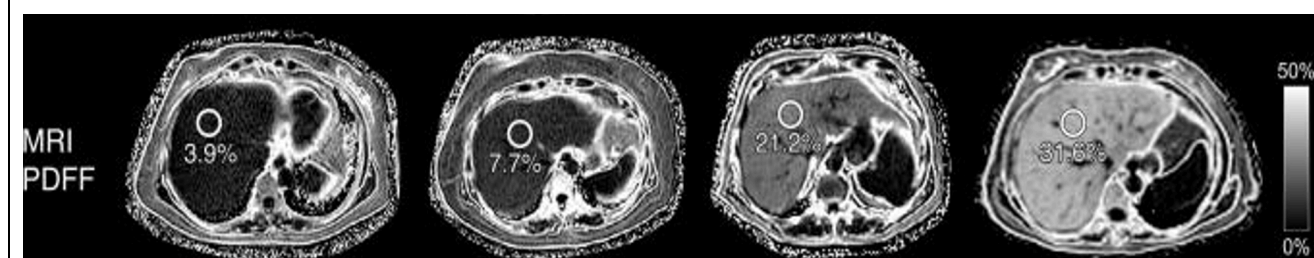


Рис. 1 в (Fig. 1 c)

Рис. 1. Степени стеатоза на УЗИ, КТ и МРТ [2]. а – УЗИ печени, В-режим; б – КТ печени, аксиальная плоскость, нативная фаза; в – МРТ PDFF печени, аксиальная плоскость.

Показана количественная оценка жира при разной степени жировой дистрофии. УЗИ печени в В-режиме, нативные КТ печени, демонстрирующие снижение плотности паренхимы по мере нарастания степени жировой дистрофии и МРТ PDFF, позволяющая определить количественное содержание жира в печени при различных стадиях жировой дистрофии для четырех пациентов.

Fig. 1. Degrees of steatosis on ultrasound, CT and MRI [2]. а – ultrasound of the liver, B-mode; б – CT of the liver, axial plane, native phase; в – MRI PDFF of the liver, axial plane.

Quantitative assessment of hepatic fat across various degrees of steatosis is presented. B-mode ultrasound of the liver, non-contrast CT scans of the liver demonstrating a decrease in parenchymal density as the degree of fatty infiltration increases, and MRI-PDFF allowing for the quantification of hepatic fat content at various stages of fatty liver disease for four patients.

быток железа, которое не может вывести. Наследственный гемохроматоз – наиболее распространенная форма, являющаяся ауто-сомно-рецессивным заболеванием, встречающимся преимущественно у лиц европейского происхождения. Патология вызвана мутациями в гене HFE, что приводит к повышенному всасыванию железа. Избыточное железо откладывается в органах, включая печень, поджелудочную железу, сердце и кожу, что

часто вызывает такие состояния, как заболевания печени, диабет, сердечная недостаточность и изменение цвета кожи, известное как «бронзовый диабет». Типы наследственного гемохроматоза различаются в зависимости от генетических мутаций. Тип 1 является наиболее распространенным, тогда как типы 2, 3 и 4 встречаются реже. Вторичный гемохроматоз может возникнуть из-за частых переливаний крови или определенных

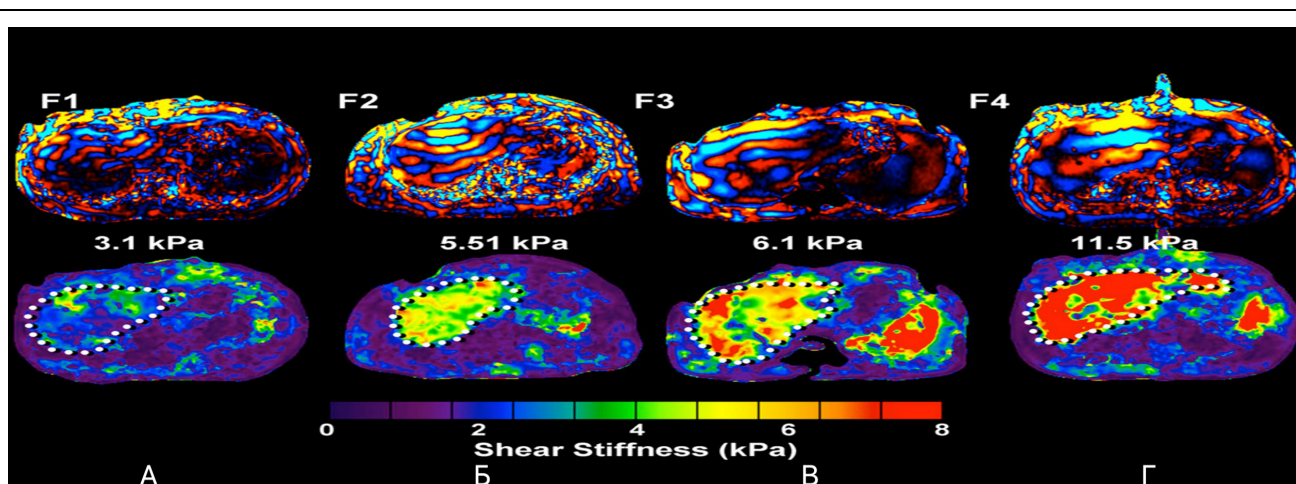


Рис. 2 (Fig. 2)

Рис. 2. Магнитно-резонансная эластография (МРЭ) печени [16].

МРЭ демонстрирует увеличение значений жесткости печени с увеличением стадии фиброза. В верхнем ряду представлены волновые изображения четырех пациентов с подтвержденным биопсией фиброзом печени от стадии METAVIR 1 до 4.

В нижнем ряду представлены соответствующие эластограммы для этих пациентов.

а: 2–7 кПа	F0–F1	В норме
б: 7,5–10 кПа	F2	Фиброз печени умеренной степени
в: 10–14 кПа	F3	Фиброз печени тяжелой степени
г: 14 и более кПа	F4	Цирроз

Длина волны визуализируемых сдвиговых волн и средняя жесткость волны ткани печени систематически увеличиваются с тяжестью фиброза.

Fig. 2. Magnetic resonance elastography of the liver [16].

MRE demonstrates an increase in liver stiffness values with an increase in the stage of fibrosis. The top row shows wave images of four patients with biopsy-confirmed liver fibrosis from METAVIR stage 1 to 4. The bottom row shows the corresponding elastograms for these patients.

a: 2–7 kPa	F0–F1	Normal
b: 7.5–10 kPa	F2	Moderate liver fibrosis
c: 10–14 kPa	F3	Severe liver fibrosis
d: 14 and more kPa	F4	Cirrhosis

The wavelength of the visualized shear waves and the average stiffness of the liver tissue wave systematically increase with the severity of fibrosis.

гематологических расстройств [11]. Наиболее точно визуализировать подобные изменения в структуре органов позволяет метод химического сдвига. Благодаря разнице в резонансных частотах, на МРТ отчетливо проявляется эффект «выпадения» сигнала в зонах максимальной концентрации железа (рис. 3 [29]).

Для комплексной оценки состояния паренхимы печени применяются такие методы медицинской визуализации: определение протонной плотности фракции жира (PDFF),

отражающей распределение жира в паренхиме путем выявления химического сдвига между жиром и водой; диффузионно-взвешенную визуализацию (ДВИ), позволяющую количественно оценивать движение молекул в ткани [12, 13]. Кроме того, в последние годы активно развивается радиомика, представляющая собой метод, который анализирует текстурные характеристики пространственного распределения интенсивности сигнала и взаимосвязи между пикселями [14].

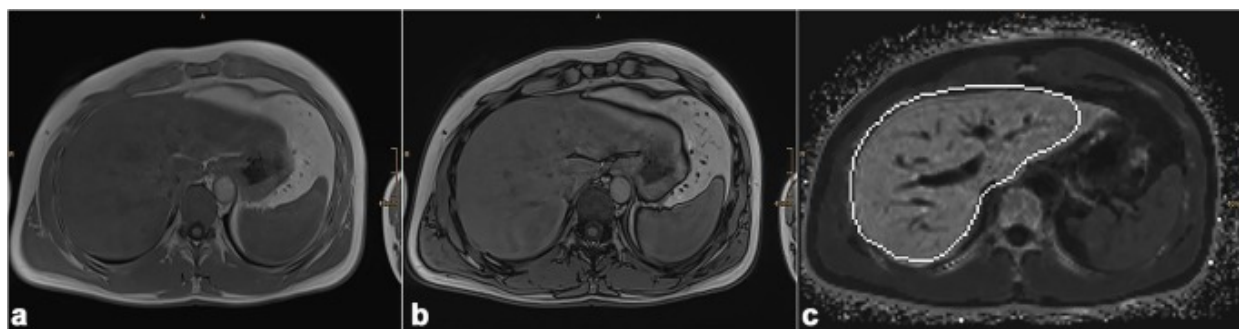


Рис. 3 (Fig. 3)

Рис. 3. Последовательность химического сдвига на МРТ [29].

Пример последовательности химического сдвига, которая указывает на патологическое отложение железа.

Интенсивность сигнала печени в фазе:

а: TE = 4,77 мс, TR = 6,68 мс снижена (SI 100) по сравнению с противофазой.

б: SI 120, TE = 2,35, TR = 6,68 мс, что предполагает перегрузку железом. Последовательность градиентного эха с несколькими эхо:

в: обеспечивает R2 128 с⁻¹, что соответствует патологической концентрации железа в печени (LIC) ~ 67 мкмоль/г.

Fig. 3. The sequence of the chemical shift on the MRI [29].

An example of a chemical shift sequence that indicates abnormal iron deposition.

The intensity of the liver signal in the phase:

a: TE = 4.77 ms, TR = 6.68 ms is reduced (SI 100) compared to the antiphase.

b: SI 120, TE = 2.35, TR = 6.68 ms, which suggests iron overload.

A sequence of gradient echoes with multiple echoes:

c: provides R2 128 s⁻¹, which corresponds to a pathological liver iron concentration (LIC) of ~ 67 mmol/g.

Симптомы гемохроматоза обычно проявляются во взрослом возрасте и могут включать в себя усталость, боли в суставах и потемнение кожи. Диагноз ставится с помощью анализов крови, измеряющих уровень железа и генетического тестирования. Лечение гемохроматоза в первую очередь включает регулярную флеботомию для удаления избытка железа из организма, а раннее обнаружение может предотвратить серьезное повреждение органов [15].

Современная классификация гемохроматоза.

До недавнего времени классификация гемохроматоза основывалась на критериях, включавших тип генетического дефекта и возраст, в котором появляются симптомы заболевания. В 2022 году новые рекомендации по классификации гемохроматоза были разработаны членами Международного общества по изучению железа в биологии и медицине (BIOIRON Society) на встрече в Гей-

дельберге, Германия. Новая классификация рассматривает как клинические, так и молекулярные аспекты вовлеченности (рис. 4) [16, 17].

Патогенез гемохроматоза.

Механизм развития первичного гемохроматоза заключается в мутациях HFE, которые вызывают повышенное всасывание железа, несмотря на нормальное потребление железа с пищей. HFE регулирует выработку гепсидина, белкового продукта HAMP, который является циркулирующим пептидным гормоном. Гепсидин, вырабатываемый преимущественно в печени, ингибирует всасывание железа с пищей в двенадцатиперстной кишке и его высвобождение макрофагами селезенки [17–19].

Причины вторичного гемохроматоза включают эритропоэтический гемохроматоз, состояние, которое возникает из-за избыточного поглощения железа, поскольку пациент производит избыточное количество эритро-

Novel classification of hemochromatosis (HC)

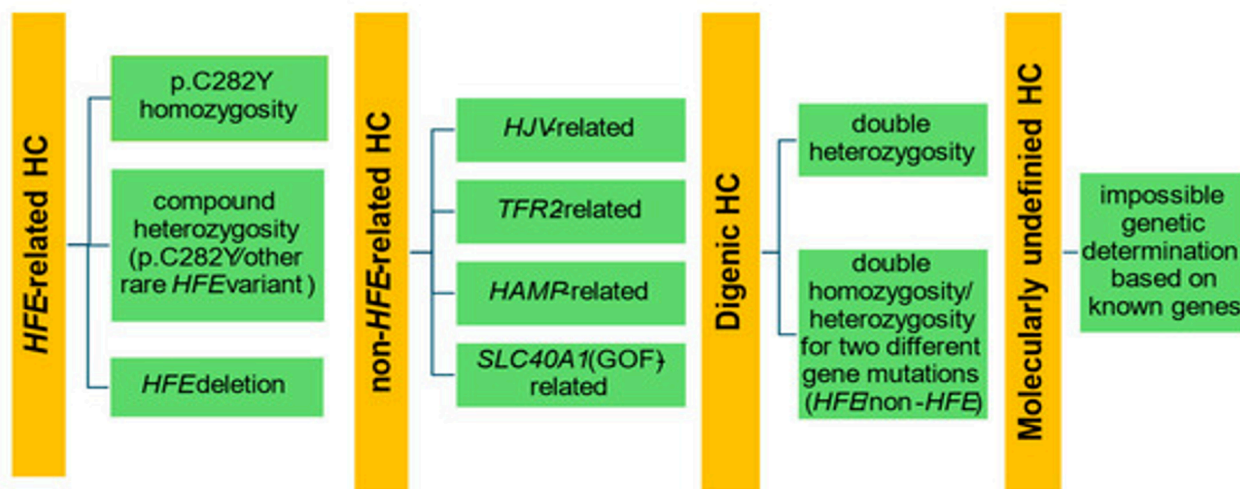


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. Схема.

Современная классификация гемохроматоза, предложенная Международным обществом по изучению железа в биологии и медицине (BIOIRON Society) [17]. Согласно новой классификации, если у пациента имеются убедительные признаки гемохроматоза, но гомозиготность по p.C282Y (или гетерозиготность по соединению p.C282Y/p.H63D) не выявлена, следует установить временный диагноз «молекулярно неопределенный» гемохроматоз. Затем, по показаниям, может быть начато лечение с помощью кровопускания. Новая классификация учитывает проблему молекулярного анализа и облегчает медицинскую коммуникацию.

Fig. 4. Scheme.

Modern classification of hemochromatosis, proposed by the International Society for the Study of Iron in Biology and Medicine (BIOIRON Society) [17].

According to the new classification, if a patient has convincing signs of hemochromatosis, but homozygosity for p.C282Y (or heterozygosity for the compound p.C282Y/p.H63D) has not been detected, a temporary diagnosis of “molecular indeterminate” hemochromatosis should be established. Then, according to the indications, treatment with bloodletting can be initiated. The new HC classification takes into account the problem of molecular analysis and facilitates medical communication.

цитов. Это часто происходит из-за основного заболевания эритроцитов, которое делает их более хрупкими и, следовательно, имеет сокращенную продолжительность жизни. Когда клетки разрушаются, их железо откладывается в тканях организма. Тот же механизм действует у пациентов, которые получают множественные, обычно хронические переливания эритроцитов. Другие менее распространенные состояния, такие как поздняя кожная порфирия, могут вызывать перегрузку железом. Эритропоэтический гемохроматоз следует за распространенностью основного заболевания и встречается в более широком диапазоне этнических групп, чем наследственная форма заболевания. Кроме того, чрезмерное потребление железа также

может вызвать гемохроматоз. Исторически это было результатом употребления пива, приготовленного в стальных бочках. Случайные и преднамеренные передозировки железа могут быть результатом употребления некоторых безрецептурных пищевых добавок [20].

T2-релаксометрия.

Железо в печени обладает парамагнитными свойствами и приводит к сокращению времени релаксации T2. Ускоренная релаксация пропорциональна содержанию железа. Модели распада приписываются средней интенсивности сигнала при разных временах эха. Для получения надежных измерений времени T2 при разных уровнях перегрузки железом необходимы последовательности

сбора данных с несколькими разными временами эха. Интенсивность сигнала как функцию времени эха можно использовать для получения параметрической карты T2 [21].

Коэффициент интенсивности сигнала.

Соотношение между интенсивностью сигнала печени и интенсивностью сигнала параспинальных мышц (подвздошно-реберной, длинной и остистой), которые не накапливают железо, может быть использовано для определения концентрации железа в печени. Используя тот же срез, измерения интенсивности сигнала выполняются с использованием области интереса (ROI), избегая крупных сосудов в печени. Используемые последовательности представляют собой градиентные вызванные эхо, поскольку они более чувствительны к парамагнитному эффекту железа [22].

производимы. В целом методы релаксации T2 более точны, но пока не стандартизированы и обычно требуют обработки вне места проведения, что влечет за собой дополнительные затраты. Преимуществом методов релаксации T2 является полезность измерения концентрации железа в миокарде [23].

Радиомика.

Радиомика – это количественный инструмент, применяемый в медицинской визуализации, целью которого является извлечение из имеющихся данных ультраструктурной пиксельной информации относительно характеристик ткани. Концепция радиомики нашла более широкое применение, не исключительно в области онкологии [24, 25], но и в том, что путем математического извлечения пространственного распределения интенсивности сигнала и взаимосвязей между пикселями она количественно определяет текстурную информацию, используя не-

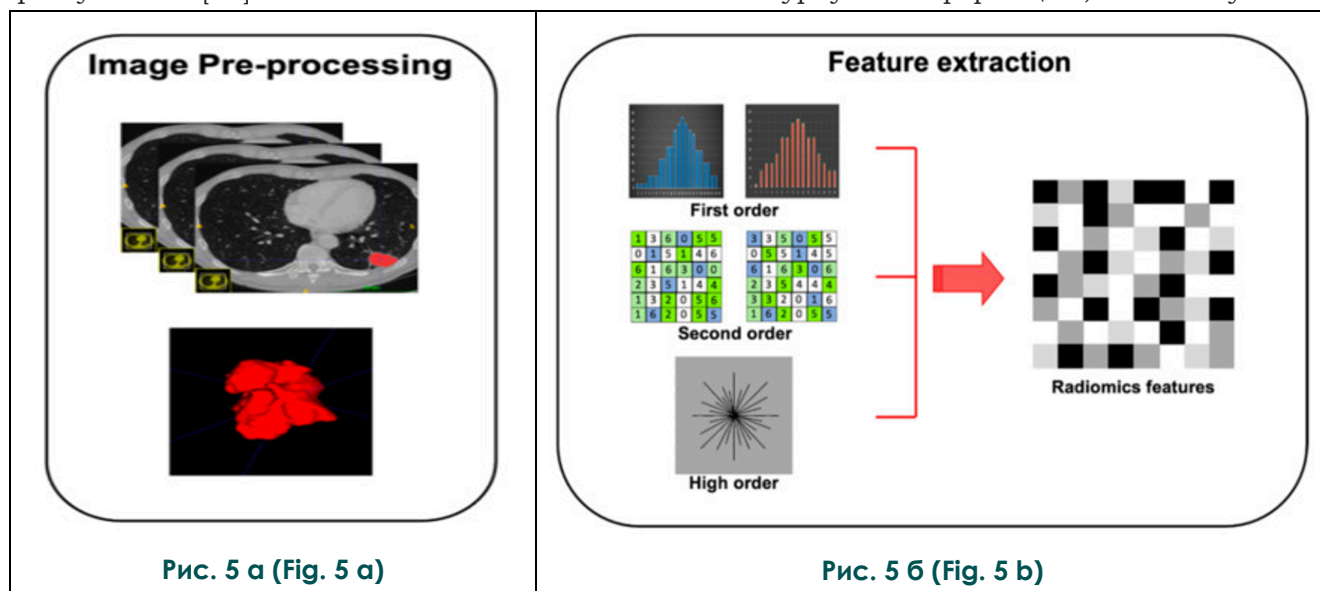


Рис. 5 а (Fig. 5 а)

Рис. 5 б (Fig. 5 б)

Рис. 5. Графическая блок-схема извлечения радиомических признаков [25].

а – Описание значений вокселей без учета взаимосвязи с другими вокселями.

б – Анализ каждого вокселя и его взаимосвязи с соседними вокселями.

Fig. 5. Graphical radiomics block feature extraction flowchart [25].

а – Description of voxels values without considering relationships with others voxels.

б – Analysis of each voxel and its relationship with neighboring voxels.

T2-релаксометрия против методов Simultaneous image refocusing (SIR).

Оценить содержание железа в печени проще с помощью одновременной фокусировки изображения (SIR) по сравнению с T2-релаксометрией. Методы SIR менее точны при концентрации железа >350 мкмоль Fe/г. Однако методы SIR высокоспецифичны при всех уровнях концентрации железа и вос-

сколько аналитических методов (рис. 5) [25–27].

MRQuantif.

MRQuantif – это программное обеспечение, разработанное для помощи врачам в их клинической практике. Оно обеспечивает научно обоснованную количественную оценку железа и жира в печени с помощью последовательностей градиентного эха и, сле-

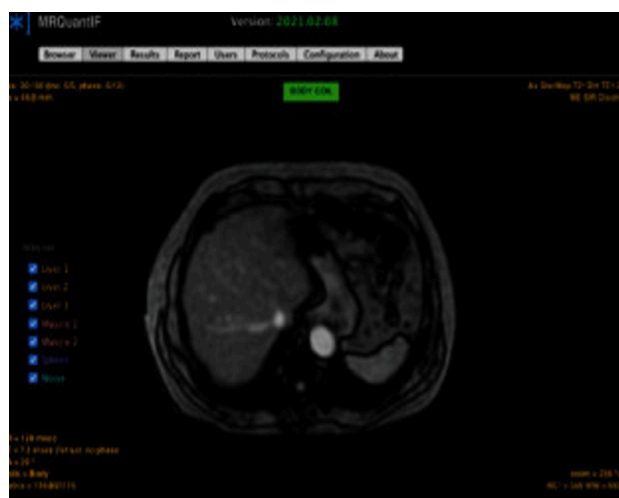


Рис. 6 а (Fig. 6 а)

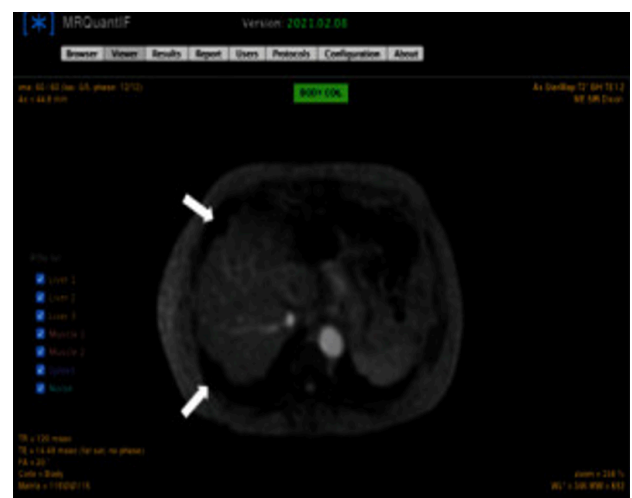


Рис. 6 б (Fig. 6 б)

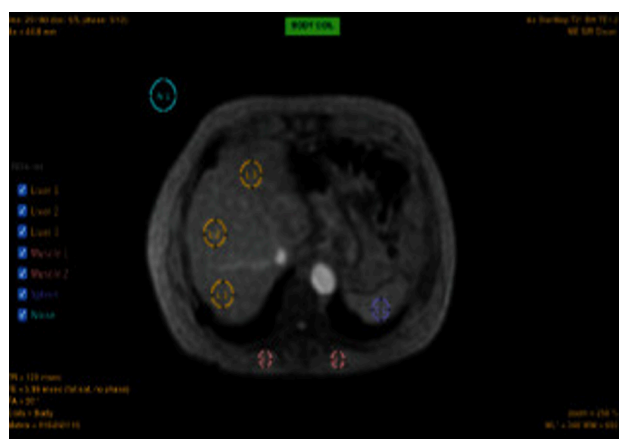


Рис. 6 в (Fig. 6 с)



Рис. 6 г (Fig. 6 d)

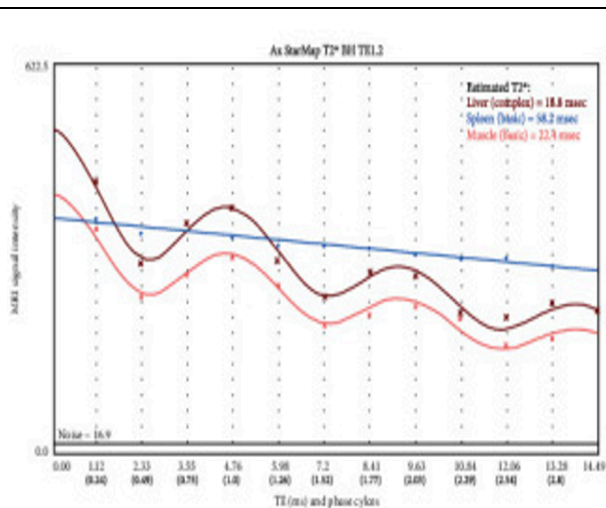


Рис. 6 д (Fig. 6 е)

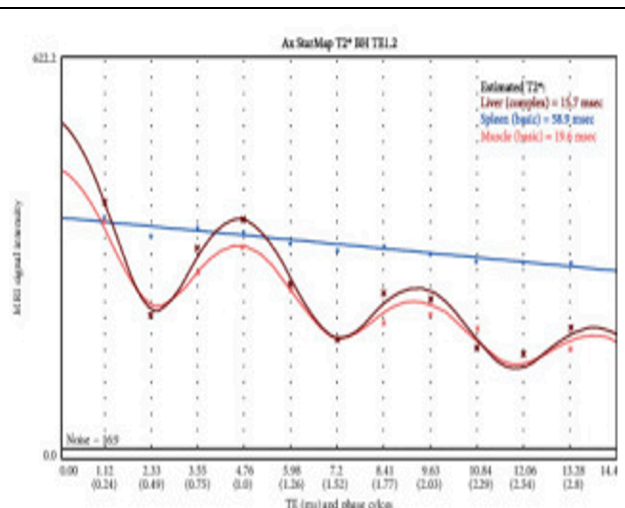


Рис. 6 е (Fig. 6 f)

Рис. 5. Количественная оценка железа и жира в печени с помощью последовательностей градиентного эха [30].

а – МРТ печени с гетерозиготным гемохроматозом.

б – МРТ печени с сидеротическими печеночными узелками (белые стрелки).

в – МРТ печени после постобработки с помощью программного обеспечения MRQuantif. Области интереса указаны на паренхиме печени.

г – МРТ печени после постобработки с помощью программного обеспечения MRQuantif. Области интереса обозначены участками в паренхиме печени, на паравертебральных мышцах и селезенке, и фоновым шумом для расчета.

д – Кривые, показывающие расчетное время T2 печени, печеночных узелков.

е – Кривые, показывающие расчетное время селезенки и мышц.

Fig. 5. Quantification of iron and fat in the liver using a gradient echo sequence [30].

a - MRI of the liver with heterozygous hemochromatosis.

b - MRI of the liver with siderotic hepatic nodules (white arrows).

c - MRI of the liver after post-processing by MRQuantif software. The regions of interest are drawn on the liver parenchyma.

d - MRI of the liver after post-processing by MRQuantif software. The regions of interest are drawn on the hepatic nodules, on the paravertebral muscles and spleen, and background noise for calculation.

e - The curve showing the estimated T2 time of liver, hepatic nodules.

f - The curve showing the estimated time of spleen and muscles.

довательно, может оценить степень стеатоза и перегрузки железом (рис. 6) [28–30].

Обсуждение.

МРТ становится очень важным методом визуализации при оценке диффузных заболеваний печени, особенно при изучении фиброза печени, стеатоза и перегрузки печени железом с помощью таких различных методов, как магнитно-резонансная эластография (МРЭ), диффузионно-взвешенная визуализация (ДВИ), магнитно-резонансная томография протонной плотности жировой фракции (MRI-PDFF), полученных на основе T1-взвешенных последовательностей, и T2*. Основное преимущество заключается в том, что это неинвазивный метод, который позволяет проводить количественную оценку, не зависящую от оператора, и оценивать весь объем печени. Кроме того, радиомика, применяемая к МРТ, обеспечивает дальнейший шаг в изучении диффузных заболеваний печени с возможностью ретроспективного анализа, осуществимого на основе уже проведенных исследований.

Несмотря на то, что методы визуализации, описанные для оценки диффузных заболеваний печени, считаются альтернативой биопсии печени, существуют некоторые ограничения, которые необходимо учиты

вать.

Основные ограничения этих новых неинвазивных биомаркеров связаны с программным обеспечением для постобработки, которое не всегда доступно и требует обновления аппаратуры МРТ, аппаратного обеспечения и рабочей станции, а также с тем, что в литературе отсутствуют исследования, касающиеся диффузных заболеваний печени с одной этиологией. Наконец, клиницисты несколько скептически относятся к предпочтению этих неинвазивных методов перед другими хорошо известными, такими как биопсия печени.

Будущие направления количественной МРТ при диффузных заболеваниях печени включают такие различные методы визуализации, как MR fingerprinting (MRF), применя

емая к ткани печени для обеспечения более быстрой количественной оценки [31], модели глубокого обучения для раннего выявления фиброза печени [32] и методы T1-картирования в основном для оценки степени воспаления печени, особенно при неалкогольном стеатогепатите (НАСГ) [33]. В последнее время активно проводятся исследования, касающиеся использования гепатобилиарных контрастных веществ для оценки и

количественного определения функции печени с точки зрения печеночной перфузии, проницаемости сосудов или экспрессии транспортеров гепатоцитов, которые используются для оценки не только степени фиброза печени, но и тяжести цирроза [33, 34]. В различных исследованиях рассматривалась роль МРТ, усиленной гадопсетиновой кислотой, в отличие от неалкогольной жировой болезни печени (НАЖБП), от неалкогольного стеатогепатита (НАСГ) и простого стеатоза или стадирующего фиброза [35], были получены отличные результаты с точки зрения морфологической и количественной оценки ткани печени. До сих пор количественные параметры, учитываемые при использовании этого метода визуализации, оставались ограниченными из-за длительных сроков обследования, используемых сложных математических моделей и возможного наличия нарушений дыхания. Кроме того, не были стандартизированы пороговые значения для определения нормальных и аномальных значений [36]. Будущие исследования позволят оценить функциональную и количественную роль гепатобилиарных контрастных веществ при диффузных заболеваниях печени, в конечном счете с помощью исследований одной этиологии.

Список литературы:

1. Annibale B., Burra P., Ciacci C., et al. *Manuale di Gastroenterologia, Section 5, Chapter 25. Editrice Gastroenterologica Italiana*, 2016. Available at: hdl.handle.net/2318/130740.
2. Zhang Y. N., Fowler K. J., Hamilton G., et al. Liver fat imaging-a clinical overview of ultrasound, CT, and MR imaging. *The British Journal of Radiology*. 2018;91(1089):p. 20170959. doi.org/10.1259/bjr.20170959.
3. Lee H. M., Ahn J., Kim W. R., et al. A comparison between community and academic practices in the USA in the management of chronic hepatitis B patients receiving entecavir: results of the ENUMERATE study. *Digestive Diseases and Sciences*. 2019;64(2):358-366. doi.org/10.1007/s10620-018-5281-3.
4. Thomson M. J., Tapper E. B., Lok A. S. F. Dos and don'ts in the management of cirrhosis: a view from the 21st century. *The American Journal of Gastroenterology*. 2018;113(7):927-931. doi.org/10.1038/s41395-018-0028-5.
5. Thomaidis-Brears H. B., Lepe R., Banerjee R., Duncker C. Multiparametric MR mapping in clinical decision-making for diffuse liver disease. *Abdom Radiol (NY)*. 2020;45(11):3507-3522. doi.org/10.1007/s00261-020-02684-3.
6. Wang Y., Ganger D. R., Levitsky J., et al. Assessment of chronic hepatitis and fibrosis: comparison of MR elastography and diffusion-weighted imaging. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 2011;196(3):553-561. doi.org/10.2214/AJR.10.4580

Заключение.

Таким образом, лучевые методы визуализации имеют ключевое значение в диагностике диффузных заболеваний печени и должны применяться на всех этапах ведения пациента: от первичного скрининга и постановки диагноза до мониторинга эффективности проводимой терапии и долгосрочного прогнозирования.

«Золотым стандартом» неинвазивной диагностики фиброза, стеатоза и перегрузки железом сегодня признана магнитно-резонансная томография. Использование таких высокотехнологичных протоколов, как магнитно-резонансная эластография (МРЭ), диффузионно-взвешенная визуализация (ДВИ) и расчет протонной плотности жировой фракции (MRI-PDFF) на основе T1-T2 взвешенных последовательностей, позволяет получить исчерпывающую информацию о состоянии паренхимы.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

7. Welle C. L., Guglielmo F. F., Venkatesh S. K. MRI of the liver: choosing the right contrast agent. *Abdom Radiol (NY)*. 2020;45(2):384-392. doi.org/10.1007/s00261-019-02162-5.
8. Wood J. C. Estimating tissue iron burden: current status and future prospects. *British Journal of Haematology*. 2015;170(1):15-28. doi.org/10.1111/bjh.13374.
9. Гусейнова А.С., Каннер Д.Ю., Швейкин А.О., Лившиц М.В., Москалец М.В., Воронов Д.О., и др. Диагностические возможности КТ и МРТ в определении лечебной тактики при гепатоцеллюлярной карциноме. *REJR*. 2024;14(4):109-121. 10.21569/2222-7415-2024-14-4-109-121.
10. Imajo K., Kessoku T., Honda Y., et al. Magnetic resonance imaging more accurately classifies steatosis and fibrosis in patients with nonalcoholic fatty liver disease than transient elastography. *Gastroenterology*. 2016; 150(3): 626-637.e7. doi.org/10.1053/j.gastro.2015.11.048.
11. Babitt JL, Lin HY. The molecular pathogenesis of hereditary hemochromatosis. *Semin Liver Dis*. 2011;31(3):280-92. Epub 2011 Sep 7. doi.org/10.1055/s-0031-1286059
12. Reeder S. B., Sirlin C. B. Quantification of liver fat with magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*. 2010;18(3):337-357. doi.org/10.1016/j.mric.2010.08.013.
13. Ding L., Xiao L., Lin X., Xiong C., Lin L., Chen S. Intravoxel incoherent motion (IVIM) diffusion-weighted imaging (DWI) in patients with liver dysfunction of chronic viral hepatitis: seg-

- mental heterogeneity and relationship with Child-Turcotte-Pugh class at 3 Tesla. *Gastroenterology Research and Practice*. 2018;2018:12. doi.org/10.1155/2018/2983725
- 14.van Timmeren J. E., Cester D., Tanadini-Lang S., Alkadhi H., Baessler B. Radiomics in medical imaging-“how-to” guide and critical reflection. *Insights Into Imaging*. 2020;11(1): 91. doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2.
15. Bacon BR, Adams PC, Kowdley KV, Powell LW, Tavill AS; American Association for the Study of Liver Diseases. Diagnosis and management of hemochromatosis: 2011 practice guideline by the American Association for the Study of Liver Diseases. *Hepatology*. 2011;54(1):328-43. doi.org/10.1002/hep.24330 .
- 16.Venkatesh S. K., Yin M., Ehman R. L. Magnetic resonance elastography of liver: technique, analysis, and clinical applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2013;37(3):544-555. doi.org/10.1002/jmri.23731.
- 17.Szczerbinska A., Kasztelan-Szczerbinska B., Rycyk-Bojarzynska A., Kocki J., Cichoz-Lach H. Hemochromatosis – How Not to Overlook and Properly Manage “Iron People”. A Review. *J Clin Med*. 2024;13(13):3660. doi.org/10.3390/jcm13133660.
- 18.Cheng R, Barton JC, Morrison ED, Phatak PD, Krawitt EL, Gordon SC, et al. Differences in hepatic phenotype between hemochromatosis patients with HFE C282Y homozygosity and other HFE genotypes. *J Clin Gastroenterol*. 2009 Jul;43(6):569-573. doi.org/10.1097/mcg.0b013e3181919a33.
- 19.Bulaj ZJ, Griffen LM, Jorde LB, Edwards CQ, Kushner JP. Clinical and biochemical abnormalities in people heterozygous for hemochromatosis. *N Engl J Med*. 1996 Dec 12;335(24):1799-805. doi.org/10.1056/nejm199612123352403.
- 20.Joshi R, Shvartsman M, Morán E, Lois S, Aranda J, Barqué A, et al. Functional consequences of transferrin receptor-2 mutations causing hereditary hemochromatosis type 3. *Mol Genet Genomic Med*. 2015;3(3):221-32. doi.org/10.1002/mgg3.136.
- 21.Pietrangelo A. Hereditary hemochromatosis: pathogenesis, diagnosis, and treatment. *Gastroenterology*. 2010;139(2):393-408, 408.e1-2. doi.org/10.1053/j.gastro.2010.06.013.
- 22.St Pierre TG, Clark PR, Chua-anusorn W et-al. Noninvasive measurement and imaging of liver iron concentrations using proton magnetic resonance. *Blood*. 2005;105 (2): 855-61. doi.org/10.1182/blood-2004-01-0177.
- 23.Gandon Y, Olivié D, Guyader D et-al. Non-invasive assessment of hepatic iron stores by MRI. *Lancet*. 2004;363 (9406): 357-62. doi:10.1016/S0140-6736(04)15436-6.
- 24.Alústiza Echeverría JM, Castiella A, Emparanza JJ. Quantification of iron concentration in the liver by MRI. *Insights Imaging*. 2012;3 (2): 173-80. doi:10.1007/s13244-011-0132-1.
1. 25.Caruso D., Polici M., Zerunian M., et al. Radiomics in oncology, part 1: technical principles and gastrointestinal application in CT and MRI. *Cancers (Basel)*. 2021;13(11): 2522. doi.org/10.3390/cancers13112522.
- 26.Caruso D., Polici M., Zerunian M., et al. Radiomics in oncology, part 2: thoracic, genito-urinary, breast, neurological, hematologic and musculoskeletal applications. *Cancers (Basel)*. 2021;13(11): 2681. doi.org/10.3390/cancers13112681.
27. Тальшинский А.Е., Камышанская И.Г., Крючкова О.В., Бахтиозин Р.Ф., Пашковская А.А. Применение глубокого обучения для автоматизированного контурирования предстательной железы по данным магнитно-резонансной томографии: промежуточные результаты. *REJR*. 2024; 14(4):179-188. doi.org/10.21569/2222-7415-2024-14-4-179-188.
- 28.van Timmeren J. E., Cester D., Tanadini-Lang S., Alkadhi H., Baessler B. Radiomics in medical imaging-“how-to” guide and critical reflection. *Insights Into Imaging*. 2020;11(1): 91. doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2.
- 29.Henninger B., Alustiza J., Garbowski M., Gandon Y. Practical guide to quantification of hepatic iron with MRI. *European Radiology*. 2020;30(1):383-393. doi.org/10.1007/s00330-019-06380-9.
30. Zerunian M., Pucciarelli F., Masci B. Updates on Quantitative MRI of Diffuse Liver Disease: A Narrative Review. *Abdom Radiol (NY)*. 2024;49(5):1234-1250. doi.org/10.1155/2022/1147111.
- 31.Chen Y., Jiang Y., Pahwa S., et al. MR fingerprinting for rapid quantitative abdominal imaging. *Radiology*. 2016;279(1):278-286. doi.org/10.1148/radiol.2016152037.
- 32.Schawkat K., Ciritsis A., von Ulmenstein S., et al. Diagnostic accuracy of texture analysis and machine learning for quantification of liver fibrosis in MRI: correlation with MR elastography and histopathology. *European Radiology*. 2020;30(8):4675-4685. doi.org/10.1007/s00330-020-06831-8.
- 33.Ba-Ssalamah A., Bastati N., Wibmer A., et al. Hepatic gadoxetic acid uptake as a measure of diffuse liver disease: where are we? *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2017;45(3):646-659. doi.org/10.1002/jmri.25518.
- 34.Bastati N., Beer L., Mandorfer M., et al. Does the functional liver imaging score derived from gadoxetic acid-enhanced MRI predict outcomes in chronic liver disease? *Radiology*. 2020;294(1):98-107. doi.org/10.1148/radiol.2019190734.
- 35.Poetter-Lang S., Bastati N., Messner A., et al. Quantification of liver function using gadoxetic acid-enhanced MRI. *Abdom Radiol (NY)*. 2020;45(11):3532-3544. doi.org/10.1007/s00261-020-02779-x.

References:

- 1.Annibale B., Burra P., Ciacci C., et al. *Manuale di Gastroenterologia*, Section 5, Chapter 25. Editrice Gastroenterologica Italiana, 2016. Available at: hdl.handle.net/2318/130740.
- 2.Zhang Y. N., Fowler K. J., Hamilton G., et al. Liver fat imaging-a clinical overview of ultrasound, CT, and MR imaging. *The British Journal of Radiology* . 2018;91(1089):p. 20170959. doi.org/10.1259/bjr.20170959.
- 3.Lee H. M., Ahn J., Kim W. R., et al. A comparison between community and academic practices in the USA in the management of chronic hepatitis B patients receiving entecavir: results of the ENUMERATE study. *Digestive Diseases and Sciences*. 2019;64(2):358-366. doi.org/10.1007/s10620-018-

5281-3.

4. Thomson M. J., Tapper E. B., Lok A. S. F. Dos and don'ts in the management of cirrhosis: a view from the 21st century. *The American Journal of Gastroenterology*. 2018;113(7):927-931. doi.org/10.1038/s41395-018-0028-5.
5. Thomaidis-Brears H. B., Lepe R., Banerjee R., Duncker C. Multiparametric MR mapping in clinical decision-making for diffuse liver disease. *Abdom Radiol (NY)*. 2020;45(11):3507-3522. doi.org/10.1007/s00261-020-02684-3.
6. Wang Y., Ganger D. R., Levitsky J., et al. Assessment of chronic hepatitis and fibrosis: comparison of MR elastography and diffusion-weighted imaging. *AJR. American Journal of Roentgenology*. 2011;196(3):553-561. doi.org/10.2214/AJR.10.4580
7. Welle C. L., Guglielmo F. F., Venkatesh S. K. MRI of the liver: choosing the right contrast agent. *Abdom Radiol (NY)*. 2020;45(2):384-392. doi.org/10.1007/s00261-019-02162-5.
8. Wood J. C. Estimating tissue iron burden: current status and future prospects. *British Journal of Haematology*. 2015;170(1):15-28. doi.org/10.1111/bjh.13374.
9. Huseynova L.S., Kanner D.Yu., Schweikin A.O., Livshits M.V., Moskalets M.V., Voronov D.O., et al. Diagnostic capabilities of CT and MRI in determining treatment tactics in hepatocellular carcinoma. *REJR*. 2024; 14(4):109-121. doi.org/10.21569/2222-7415-2024-14-4-109-121 (in Russian).
10. Imajo K., Kessoku T., Honda Y., et al. Magnetic resonance imaging more accurately classifies steatosis and fibrosis in patients with nonalcoholic fatty liver disease than transient elastography. *Gastroenterology*. 2016; 150(3): 626-637. doi.org/10.1053/j.gastro.2015.11.048.
11. Babitt JL, Lin HY. The molecular pathogenesis of hereditary hemochromatosis. *Semin Liver Dis*. 2011;31(3):280-92. Epub 2011 Sep 7. doi.org/10.1055/s-0031-1286059
12. Reeder S. B., Sirlin C. B. Quantification of liver fat with magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging Clinics of North America*. 2010;18(3):337-357. doi.org/10.1016/j.mric.2010.08.013.
13. Ding L., Xiao L., Lin X., Xiong C., Lin L., Chen S. Intravoxel incoherent motion (IVIM) diffusion-weighted imaging (DWI) in patients with liver dysfunction of chronic viral hepatitis: segmental heterogeneity and relationship with Child-Turcotte-Pugh class at 3 Tesla. *Gastroenterology Research and Practice*. 2018;2018:12. doi.org/10.1155/2018/2983725
14. van Timmeren J. E., Cester D., Tanadini-Lang S., Alkadhi H., Baessler B. Radiomics in medical imaging-“how-to” guide and critical reflection. *Insights Into Imaging*. 2020;11(1): 91. doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2.
15. Bacon BR, Adams PC, Kowdley KV, Powell LW, Tavill AS; American Association for the Study of Liver Diseases. Diagnosis and management of hemochromatosis: 2011 practice guideline by the American Association for the Study of Liver Diseases. *Hepatology*. 2011;54(1):328-43. doi.org/10.1002/hep.24330 .
16. Venkatesh S. K., Yin M., Ehman R. L. Magnetic resonance elastography of liver: technique, analysis, and clinical applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2013;37(3):544-555. doi.org/10.1002/jmri.23731.
17. Szczerbinska A., Kasztelan-Szczerbinska B., Rycyk-Bojarzynska A., Kocki J., Cichoz-Lach H. Hemochromatosis – How Not to Overlook and Properly Manage “Iron People”. A Review. *J Clin Med*. 2024;13(13):3660. doi.org/10.3390/jcm13133660.
18. Cheng R, Barton JC, Morrison ED, Phatak PD, Krawitt EL, Gordon SC, et al. Differences in hepatic phenotype between hemochromatosis patients with HFE C282Y homozygosity and other HFE genotypes. *J Clin Gastroenterol*. 2009 Jul;43(6):569-573. doi.org/10.1097/mcg.0b013e3181919a33.
19. Bulaj ZJ, Griffen LM, Jorde LB, Edwards CQ, Kushner JP. Clinical and biochemical abnormalities in people heterozygous for hemochromatosis. *N Engl J Med*. 1996 Dec 12;335(24):1799-805. doi.org/10.1056/nejm199612123352403.
20. Joshi R, Shvartsman M, Morán E, Lois S, Aranda J, Barqué A, et al. Functional consequences of transferrin receptor-2 mutations causing hereditary hemochromatosis type 3. *Mol Genet Genomic Med*. 2015;3(3):221-32. doi.org/10.1002/mgg3.136.
21. Pietrangelo A. Hereditary hemochromatosis: pathogenesis, diagnosis, and treatment. *Gastroenterology*. 2010;139(2):393-408, 408.e1-2. doi.org/10.1053/j.gastro.2010.06.013.
22. St Pierre TG, Clark PR, Chua-anusorn W et al. Noninvasive measurement and imaging of liver iron concentrations using proton magnetic resonance. *Blood*. 2005;105 (2): 855-61. doi.org/10.1182/blood-2004-01-0177.
23. Gandon Y, Olivie D, Guyader D et al. Non-invasive assessment of hepatic iron stores by MRI. *Lancet*. 2004;363 (9406): 357-62. doi:10.1016/S0140-6736(04)15436-6.
24. Alústiza Echeverría JM, Castiella A, Emparanza JI. Quantification of iron concentration in the liver by MRI. *Insights Imaging*. 2012;3 (2): 173-80. doi:10.1007/s13244-011-0132-1.
25. Caruso D., Polici M., Zerunian M., et al. Radiomics in oncology, part 1: technical principles and gastrointestinal application in CT and MRI. *Cancers (Basel)*. 2021;13(11): 2522. doi.org/10.3390/cancers13112522.
26. Caruso D., Polici M., Zerunian M., et al. Radiomics in oncology, part 2: thoracic, genito-urinary, breast, neurological, hematologic and musculoskeletal applications. *Cancers (Basel)*. 2021;13(11): 2681. doi.org/10.3390/cancers13112681.
27. Talyshinsky A.E., Kamyshanskaya I.G., Kryuchkova O.V., Bakhtiozin R.F., Pashkovskaya A.A. Application of deep learning for automated prostate contouring on magnetic resonance imaging: intermediate results. *REJR*. 2024; 14(4):179-188. doi.org/10.21569/2222-7415-2024-14-4-179-188 (in Russian).
28. van Timmeren J. E., Cester D., Tanadini-Lang S., Alkadhi H., Baessler B. Radiomics in medical imaging-“how-to” guide and critical reflection. *Insights Into Imaging*. 2020;11(1): 91. doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2.
29. Henninger B., Alustiza J., Garbowski M., Gandon Y. Practical guide to quantification of hepatic iron with MRI. *European Radiology*. 2020;30(1):383-393. doi.org/10.1007/s00330-019-06380-9.
30. Zerunian M., Pucciarelli F., Masci B. Updates on Quantitative MRI of Diffuse Liver Disease: A Narrative Review. *Abdom Radiol (NY)*. 2024;49(5):1234-1250. doi.org/10.1155/2022/1147111.

- 31.Chen Y., Jiang Y., Pahwa S., et al. MR fingerprinting for rapid quantitative abdominal imaging. *Radiology*. 2016;279(1):278-286. doi.org/10.1148/radiol.2016152037.
- 32.Schawkat K., Ciritsis A., von Ulmenstein S., et al. Diagnostic accuracy of texture analysis and machine learning for quantification of liver fibrosis in MRI: correlation with MR elastography and histopathology. *European Radiology*. 2020;30(8):4675-4685. doi.org/10.1007/s00330-020-06831-8.
- 33.Ba-Ssalamah A., Bastati N., Wibmer A., et al. Hepatic gadoxetic acid uptake as a measure of diffuse liver disease: where are we? *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. 2017;45(3):646-659. doi.org/10.1002/jmri.25518.
- 34.Bastati N., Beer L., Mandorfer M., et al. Does the functional liver imaging score derived from gadoxetic acid-enhanced MRI predict outcomes in chronic liver disease? *Radiology*. 2020;294(1):98-107. doi.org/10.1148/radiol.2019190734.
- 35.Poetter-Lang S., Bastati N., Messner A., et al. Quantification of liver function using gadoxetic acid-enhanced MRI. *Abdom Radiol (NY)*. 2020;45(11):3532-3544. doi.org/10.1007/s00261-020-02779-x..

КЛИНИКО-ЛУЧЕВОЙ МОНИТОРИНГ ФАЦИО-АУРИКУЛО-ВЕРТЕБРАЛЬНОГО СПЕКТРА АНОМАЛИЙ (СИНДРОМ ГОЛЬДЕНХАРА)

Хомутова Е.Ю., Савченко Р.К., Худорожков Ю.Г., Хомутов А.Д.

ФГБОУ ВО «Омский государственный медицинский университет» МЗ РФ. г. Омск, Россия.

Цель исследования. Представить опыт клинико-лучевого мониторинга на этапах планирования объема и последовательности проведения контурной пластики с использованием 3D-КТ моделирования, а также на послеоперационном этапе (с оценкой результатов) у пациента с фацио-аурикуло-вертебральным спектром аномалий (синдромом Гольденхара) для гарантированного получения наилучшего физиологического и эстетического результата как важного этапа многолетнего комплексного лечения пациента, а также для включения в личный и общий опыт изучения этого орфанного заболевания.

Материалы и методы. Представлено клиническое наблюдение пациента 20 лет с синдромом Гольденхара с жалобами на асимметрию и неэстетичный вид лица, периодические головные боли и боли в шее, умеренные трудности при жевании твердой пищи. В анамнезе ряд хирургических операций по поводу врожденного порока сердца, микротии и удаления ушных довесков справа. Проводилось дооперационное ортодонтическое и остеопатическое лечение с минимальным функциональным и эстетическим улучшением.

Результаты. Проведены КАКТ, МСКТ, ТРГ (с цефалометрическим анализом), МРТ лицевого черепа, шейного отдела позвоночника, височно-нижнечелюстных суставов (ВНЧС) с функциональными пробами, соответственно текущим клиническим проявлениям, в предоперационный период (с 3D-моделированием объема, размеров и поэтапного плана создания модели индивидуального имплантата) для контурной пластики дефекта (гипоплазии) нижней челюсти и в послеоперационный период для оценки первых результатов. После общеклинического обследования пациента нами было проведено планирование контурной пластики на лицевом скелете с использованием данных 3D-реконструкции при МСКТ. Это позволило четко определить размеры, объем деформации нижней челюсти справа, сопоставив с контралатеральной стороной для формирования симметрии лица с учетом виртуального послойного восполнения патологического дефекта.

Обсуждение. Была поэтапно спланирована операция с учетом данных, полученных при МСКТ, КАКТ лицевого черепа. Использовался метод аддитивного производства при 3D-печати шаблона и окончательной модели имплантата. Применение технологий аддитивного производства позволило получить имплантат, адаптированный под анатомические особенности пациента, с восполнением объема дефекта правой половины лица. Индивидуальный имплантат не нуждался в доработке непосредственно во время операции, гарантировал благоприятный процесс реконструктивной операции, прогнозировал стабильный в эстетическом отношении результат. Проведение пациенту с синдромом Гольденхара МСКТ ВНЧС (с полным охватом головы и шейного отдела позвоночника) с возможностью дополнительной работы в программе автоматической цефалометрии позволило оценить первые результаты хирургического лечения, а также планировать ортодонтическое и остеопатическое лечение в послеоперационный период, что обеспечило стойкий удовлетворительный эстетический результат.

Заключение. Использование клинико-лучевого мониторинга на всех этапах ведения и лечения пациента с таким редким заболеванием, как фацио-аурикуло-вертебральный спектр аномалий, дает не только исключительный опыт для выбора правильной тактики лечения, гарантировано улучшает состояние пациента и его внешнюю эстетику (повышает настроение и уверенность в обычной жизни и социальной деятельности). Персонализированный подход к пациентам с редко встречающимися заболеваниями, в том числе междисциплинарный врачебный поиск решений для медицинской помощи таким пациентам, способствует накоплению ценного исследовательского опыта.

Ключевые слова: синдром Гольденхара, нижняя челюсть, объемное моделирование, стереолитография, мультidetекторная компьютерная томография, МСКТ, КАКТ.

Контактный автор: Хомутова Е.Ю., e-mail: elenahomutova68@gmail.com

Для цитирования: Хомутова Е.Ю., Савченко Р.К., Худорожков Ю.Г., Хомутов А.Д. Клинико-лучевой мониторинг фацио-аурикуло-вертебрального спектра аномалий (синдром Гольденхара). REJR 2026; 16(1):223-236. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-223-236.

Статья получена: 23.09.25

Статья принята: 14.10.25

CLINICAL AND RADIOLOGICAL MONITORING OF FACIO-AURICULO-VERTEBRAL SPECTRUM OF ANOMALIES (GOLDENHAR SYNDROME)

Khomutova E.Yu., Savchenko R.K., Khudorozhkov Yu.G., Khomutov A.D.

Omsk State Medical University. Omsk, Russia.

To present the experience of clinical and radiological monitoring at the stages of planning the volume and sequence of contour plastic surgery using 3D-CT modeling, as well as at the postoperative stage (with evaluation of the results), in a patient with a facio-auriculo-vertebral spectrum of anomalies (Goldenhar syndrome), to guarantee the best physiological and aesthetic results.

Material and methods. The article presents a clinical observation of a 20-year-old patient with Goldenhar syndrome, with complaints of asymmetry and unaesthetic appearance of the face, periodic headaches and neck pain, moderate difficulties with chewing solid food. The anamnesis includes a number of surgeries for congenital heart defect, microtia and removal of ear appendages on the right. Orthodontic and osteopathic treatment was performed with minimal functional and aesthetic improvement.

Results. CBCT, MSCT, TRG (with cephalometric analysis), and MRI of the facial skull, cervical spine, and TMJ were performed dynamically, based on current clinical manifestations, preoperatively (with 3D modeling of the volume, dimensions, and a step-by-step plan for creating a custom implant model) for contouring the mandibular defect (hypoplasia), and postoperatively to evaluate initial results. Following a general clinical examination of the patient, we planned the facial contouring procedure using 3D reconstruction data from MSCT. This allowed us to clearly determine the size and volume of the right mandibular deformity, comparing it with the contralateral side, to achieve facial symmetry, taking into account the virtual layer-by-layer restoration of the pathological defect.

Discussion. The surgery was planned in stages, taking into account data obtained from MSCT and CBCT of the facial skull. Additive manufacturing was used for 3D printing of a template and the final implant model. The usage of additive manufacturing technologies allowed the production of an implant adapted to the patient's anatomical features, filling the defect on the right side of the face. The custom-made implant required no modifications during surgery, guaranteed a favorable reconstructive process, and predicted a stable aesthetic outcome. MSCT of the TMJ (completely covering the head and cervical spine), with the option of additional work in an automatic cephalometric program, allowed for the evaluation of the initial surgical results and the planning of orthodontic and osteopathic treatment in the postoperative period, which will ensure a lasting and satisfactory aesthetic outcome.

Conclusion. The usage of clinical and radiological monitoring at all stages of the care and treatment of patients with a rare condition such as facio-auriculo-vertebral spectrum anomalies not only provides exceptional experience in choosing the right treatment strategy, but also guarantees improvements in the patient's condition and appearance (improving mood and confidence in everyday life and social activities). A personalized approach to patients with rare diseases, including interdisciplinary medical research of solutions for medical care for these patients, contributes to the accumulation of valuable research experience.

Keywords: facio-auriculo-vertebral spectrum anomalies, Goldenhar syndrome, lower jaw, volumetric modeling, stereolithography, multidetector computed tomography, MSCT, CBCT.

Corresponding author: Khomutova E.Yu., e-mail: elenahomutova68@gmail.com

For citation: Khomutova E.Yu., Savchenko R.K., Khudorozhkov Yu.G., Khomutov A.D. Clinical and radiological monitoring of facio-auriculo-vertebral spectrum of anomalies (Goldenhar syndrome). REJR 2026; 16(1):215-228. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-215-228.

Received: 23.09.25

Accepted: 14.10.25

Фацио-аурикуло-вертебральный спектр аномалий, также называемый синдромом Гольденхара (СГ), является редким комбинированным синдромом, развивающимся во время blastogenesis из первой и второй жаберных дуг [1]. Впервые был описан Морисом Гольденхаром в 1952 году. Синдром характеризуется наличием пороков развития уха, аномалий позвоночника, эпibuльбарных дермоидов, односторонней гипоплазией лица и иногда внутренними системными пороками развития. Характеристика синдрома в разной степени включает совокупность этих пороков развития [1, 2]. Нет единого мнения о частоте встречаемости СГ. Известно о диапазоне в популяции от 1:3000–5000 до 1:25 000–40 000 с соотношением показателей у мужчин и женщин в пропорции 3:2 соответственно [1, 3, 4].

Наиболее частые признаки синдрома Гольденхара – аномалии лица. Этот симптом варьируется от легкой асимметрии лица до сильно недоразвитой половины лица с аномалиями орбиты [3, 5]. Микротия и аурикулярные пороки развития в 100% случаев наблюдаются при СГ [4, 5, 6]. Примерно в 50% случаев наблюдается комбинированная кондуктивная и сенсоневральная тугоухость [3, 5, 6]. Большинство случаев лицевых аномалий синдрома Гольденхара являются односторонними (до 85-90% случаев). Правая сторона поражается чаще, чем левая, в соотношении 3:2 [5, 7].

Одним из наиболее распространенных краниофациальных дефектов при СГ является односторонняя гипоплазия нижней челюсти на пораженной стороне [3, 4, 5]. Синдром также влияет на зубочелюстные структуры, вызывая такие признаки, как расщелина губы и неба, расщелина языка, односторонняя гипоплазия языка, сильно изогнутое небо, гипоплазия верхней и нижней челюстей, микрогнатия, гипертрофия десен, сверхкомплектные зубы, пороки развития эмали и дентина и задержка развития зубов [1, 2, 5, 7, 8].

Частой аномалией при СГ являются пороки развития позвоночника (чаще комбинированные), которые включают гипоплазию структурных элементов позвоночного столба,

а также сращение или отсутствие определенных позвонков [1, 3, 4].

Рентгенологический мониторинг (в основном с помощью МСКТ, КЛКТ) является основным диагностическим лучевым методом и предполагает полную оценку всех лицевых пороков развития с определением тактики для хирургического лечения, ортодонтического и оториноларингологического подходов, а также для диагностики аномалий развития позвоночника [7, 9, 10]. КТ-диагностика проводится с оценкой выраженности дисфункции височно-нижнечелюстных суставов (ВНЧС), в алгоритме исследования используется не только статическое положение с закрытым ртом, но и в положении с максимально открытым ртом с обязательным использованием авторского фиксатора нижней челюсти [10, 11, 12].

Магнитно-резонансная томография и ультразвуковая диагностика используются как методы поиска и определения выраженности аномалий лицевого черепа и вертеброгенных пороков развития в порядке второй очереди обследования (используются по возможности, особенно на послеоперационном этапе и/или во время ортодонтического лечения), а также в диагностическом алгоритме поиска аномалий внутренних органов [9, 11, 12, 13].

Лечение аномалий краниофациального и вертебрального спектра, связанных с СГ, зависит от возраста и выраженности деформаций у конкретного пациента [1, 4, 6, 8, 14, 15]. Хирургическое лечение проводится при выраженных изменениях синдрома, требует многофакторного вложения сил и терпения со стороны пациента, его семьи и хирургов во избежание осложнений и неудач [14, 15].

Пациентам с синдромом Гольденхара требуется последовательное клинично-лучевое наблюдение (мониторинг) с этапной оценкой тактики для определения объема реконструктивной пластической хирургии и эффективным прогнозом для планирования последующих этапов ортодонтического и остеопатического лечения и реабилитации.

Цель исследования.

Представить опыт клинично-лучевого мониторинга на этапах планирования объе-

ма и последовательности проведения контурной пластики с использованием 3D-КТ моделирования, а также на послеоперационном этапе (с оценкой результатов) у пациента с фацио-аурикуло-вертебральным спектром аномалий (синдромом Гольденхара) для гарантированного получения наилучшего физиологического и эстетического результатов как важного этапа многолетнего комплексного лечения пациента и для включения в личный и общий опыт изучения этого орфанного заболевания.

Материалы и методы.

Клиническое наблюдение.

Пациент 2004 года рождения с установленным в 3-летнем возрасте диагнозом: синдром Голденхара, обратился в Академическую стоматологическую клинику Омского медицинского университета на консультативный прием в ноябре 2021 г., с жалобами на асимметрию и неэстетичный вид лица, периодические головные боли и боли в шее, умеренные трудности при жевании твердой пищи. В 3-летнем возрасте (2007 г.) пациенту проводилось хирургическое лечение по поводу врожденного порока сердца (стеноз легочной артерии) – объем и название операции неизвестны (со слов матери пациента медицинские документы утеряны). В 2008 году было проведено хирургическое лечение по поводу макростомы справа и удаление ушных довесков у правого уха. С 12 лет (с 2016 г.) пациенту проводилось многоэтапное ортодонтическое лечение с помощью миофункциональных конструкций с попыткой сгладить поперечные и вертикальные скелетные несоответствия (в разной степени выраженные) для улучшения эстетики лица, а также в качестве начального этапа исправления несоответствия средней линии зубов из-за искривления нижней челюсти (для создания функциональной и эстетической окклюзии) с минимальным улучшением. Пациенту было показано хирургическое лечение в виде контурной пластики индивидуальным имплантатом с закреплением его к ветви нижней челюсти титановыми минивинтами после полного клинического и лучевого обследования.

При внешнем осмотре пациента отмечалась значительная асимметрия лица за счет недоразвития правой половины нижней челюсти и мягких тканей правой половины лица; асимметрия ушных раковин. В области правого угла рта и в околоушно-жевательной области определялись малозаметные нормотрофические рубцы (как следствие после операций по поводу макростомы и ушных довесков). Региональные лимфоузлы не увели-

чены. Парезов, параличей мимической мускулатуры нет. Кожа лица с угревой сыпью, цвет кожи обычный. Пальпаторно данных за инфильтративные изменения в челюстно-лицевой области не выявлено. Рот открывается в полном объеме. Язык мягкий, безболезненный, движения его в полном объеме. Перкуссия зубов безболезненная. Полость рта требует санации (глубокий кариес у нескольких зубов).

КТ-исследование на дооперационном этапе проводилось с помощью МДКТ-аппарата Brilliance фирмы Philips Healthcare (с числом детекторов 128) с использованием коллимации 1 мм, интервала реконструкции 0,5 мм, напряжения 120 кВ и модуляции тока трубки 150 мА. Повторное сканирование было проведено с надутыми щеками (воздушный контраст вокруг зубов позволяет заметно повысить качество трехмерных реконструкций челюстей). Интерпретация результатов выполнялась на рабочей станции (software Philips Healthcare) с использованием разных окон обзора, при одновременном анализе 2D-программ (аксиальные срезы, мультипланарные реконструкции) и в пакете 3D-программ после удаления шумов и других артефактов изображения.

Также КТ-изображения в формате DICOM обрабатывались на ПК с использованием программного приложения Materialise 3-matic medical (Бельгия) для проектирования персонифицированной модели прототипа имплантата (для последующего его выполнения в 3D-печати) и для наглядного моделирования объема и планирования этапов контурной пластики с окончательным вариантом для изготовления модели имплантата из политетрафторэтилена (Экофлон, 2006, патент RU 2270640).

На первом этапе трехмерная КТ-реконструкция слепка головы и планов кожи использовалась для оценки гипоплазии правой ушной раковины. Левая ушная раковина имела обычные размеры и морфологию. Программа 3D-реконструкции плоскостей скелета показала различную морфологию правой и левой половин нижней челюсти с уменьшением объема и деформацией (западением) справа. Также 3D-реконструкция нижней челюсти подробно показала смещение медиальной оси лица в гипоплазированную правую сторону, а также асимметрию правых мышечков нижней челюсти. Отмечалась некоторая интерпозиция нижней губы справа и уменьшение шейно-подбородочного угла (рис. 1). Дополнительно на программе мультипланарной реконструкции (МПП) при МСКТ определялось, что правая суставная

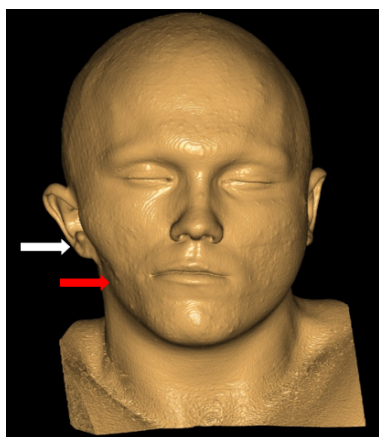


Рис. 1 а (Fig. 1 a)

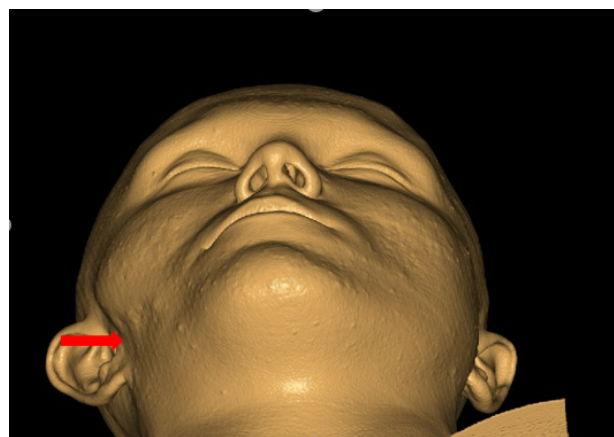


Рис. 1 б (Fig. 1 b)

Рис. 1. МСКТ височно-нижнечелюстных суставов (ВНЧС) до оперативного вмешательства, МПР, кососагиттальные реконструкции (а – левый ВНЧС, б – правый ВНЧС).

а – Суставная головка левого ВНЧС обычной формы и размеров, имеет центральное положение в суставе.

б – Гипоплазия суставной головки в правом ВНЧС, суставная головка в положении ретропозиции (красная стрелка). Асимметрия суставных ветвей нижней челюсти (правая короче левой).

Fig. 1. MSCT, TMJ (before reconstructive surgery), MPR, oblique sagittal views (a – left TMJ, b – right TMJ).

a – hypoplasia of the right auricle (white arrow), hypoplasia of the right half of the lower jaw, some interposition of the lower lip on the right (red arrow).

b – displacement of the medial axis of the face and chin to the right (red arrow).

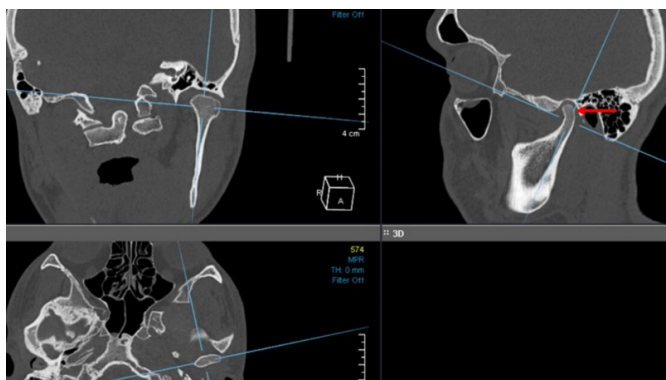


Рис. 2 а (Fig. 2 a)

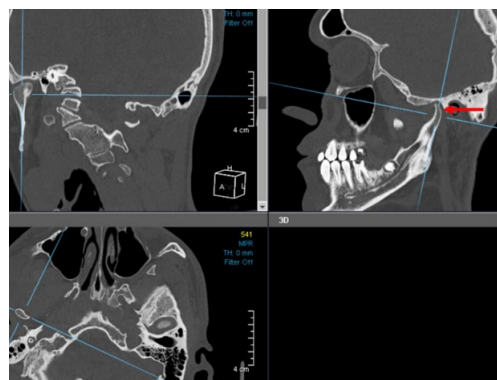


Рис. 2 б (Fig. 2 b)

Рис. 2. МСКТ височно-нижнечелюстных суставов (ВНЧС) до оперативного вмешательства, МПР, кососагиттальные реконструкции (а – левый ВНЧС, б – правый ВНЧС).

а – Суставная головка левого ВНЧС обычной формы и размеров, имеет центральное положение в суставе.

б – Гипоплазия суставной головки в правом ВНЧС, суставная головка в положении ретропозиции (красная стрелка). Асимметрия суставных ветвей нижней челюсти (правая короче левой).

Fig. 2. MSCT, TMJ (before reconstructive surgery), MPR, oblique sagittal views (a – left TMJ, b – right TMJ).

a – The condyle of the left TMJ is of normal shape and size, centrally positioned in the joint.

b – Hypoplasia of the condyle of the right TMJ, the condyle is in a retroverted position (red arrow). Asymmetry of the articular rami of the mandible (the right is shorter than the left).

ветвь, правая суставная головка и правая часть тела нижней челюсти асимметрично меньше, чем такие структуры с левой стороны (рис. 2).

Методом постепенного изменения контуров лица на КТ 3D-реконструкции мягких тканей моделировался внешний вид пациента с учетом высказанных им пожеланий (рис. 3, 4).

эталонный шаблон имплантата был создан с помощью аддитивных технологий и имел заданную структурную канальность, необходимую пористость и другие характеристики, нужные в определённой мере для микро-структуры прототипа, а в последствии для создания модели истинного имплантата (рис. 5). Во время операции после вскрытия стерильной упаковки имплантат поэтапно был

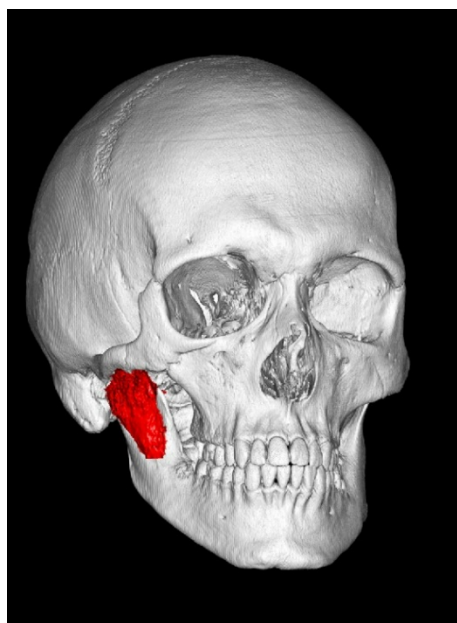


Рис. 3 а (Fig. 3 а)

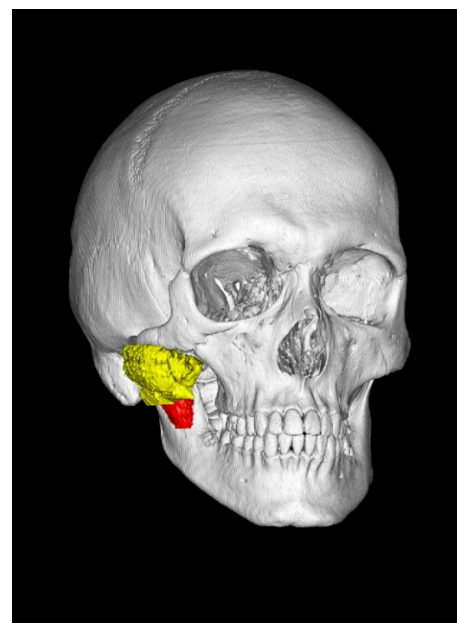


Рис. 3 б (Fig. 3 б)

Рис. 3. МСКТ черепа, объемный рендеринг с 3D-моделированием.

Коррекции асимметрии нижней челюсти путем опционального последовательного наложения слепка недостающего объема тела нижней челюсти – после красного участка (а) накладывают желтый участок (б).

Fig. 3. MSCT, volume rendering, with 3D modeling.

The correction of the asymmetry of the lower jaw by optional superposition of a cast of the missing volume of the lower jaw body – after the red section (a) the yellow section (b) is applied.

На основе данных МСКТ и специализированного компьютерного обеспечения (Materialise 3-matic medical, Бельгия) с последующим использованием 3D-печати был создан прототип имплантата индивидуальной формы с учетом анатомических особенностей головы и лица пациента, объема для восполнения деформированного участка (рис. 5). Использовался метод аддитивного производства 3D-печати шаблона и окончательной модели имплантата. Применение метода аддитивного производства позволило получить имплантат, адаптированный под анатомию пациента, с восполнением объема дефекта правой половины лица, который не нуждался в доработке непосредственно во время операции [14]. В нашем наблюдении

зафиксирован к нижней челюсти (рис. 6)

Для комплексной оценки перед проведением хирургического вмешательства при МСКТ шейного отдела позвоночника была определена выраженность аномалий и других патологических изменений. Выявлены врожденные аномалии в виде почти полной конкресценции тел C2-C3, C6-C7-Th1 позвонков с наличием дополнительного полупозвонка слева на уровне сегменте C7-Th1, гипоплазия правых поперечных отростков C6-C7 позвонков. Был определен подвывих в C1-C2, нарушение статики позвоночного столба: левосторонний сколиоз на уровне C7-Th1 в 36 градусов; сглаженность физиологического шейного лордоза с формированием кифоза на уровне C5-6 (рис. 7).



Рис. 4 а (Fig. 4 a)



Рис. 4 б (Fig. 4 b)

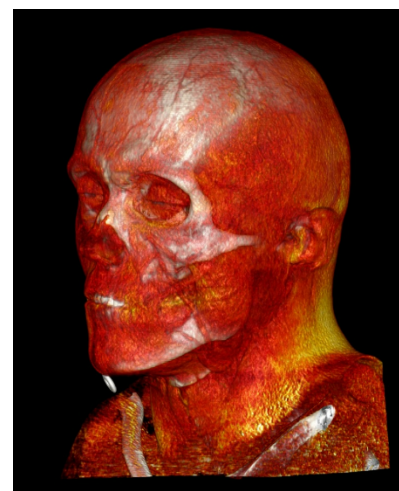


Рис. 4 в (Fig. 4 c)

Рис. 4. МСКТ, объемный рендеринг с 3D-реконструкцией мягких тканей и моделированием.

Коррекция асимметрии нижней челюсти путем наложения слепка недостающего объема тела нижней челюсти (а) с сопоставлением с контралатеральной стороной (зеркальное отображение – б, в).

Fig. 4. MSCT, volume rendering, with 3D reconstruction of soft tissues and modeling.

The correction of the asymmetry of the lower jaw by superimposing a cast of the missing volume of the lower jaw body (a), with comparison of the contralateral side (mirror image – b, c).



Рис. 5 а (Fig. 5 a)



Рис. 5 б (Fig. 5 b)

Рис. 5. Фотографии. Модель шаблона индивидуального прототипа, построенная при помощи МСКТ, с последующим использованием специализированного компьютерного обеспечения (Materialise 3-matic medical, Бельгия) и 3D-печати (аддитивные технологии печати).

а, б – Наглядно представлен высокий уровень детализации анатомических структур с дополнительным объемом материала для восполнения симметрии половин тела и ветвей нижней челюсти

Fig. 5. Photos. A model of a custom-made prototype template, constructed using MSCT, followed by the use of specialized computer software (Materialise 3-matic medical, Belgium), and 3D printing (additive printing technologies).

а, б – clearly demonstrated the high level of detail of the anatomical structures, with additional material to restore the symmetry of the halves of the body and the branches of the mandible.

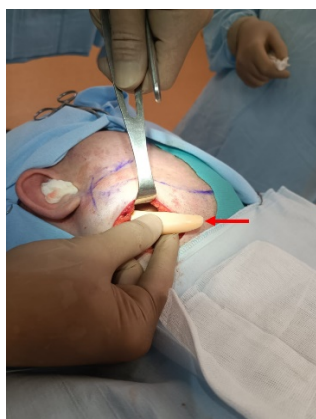


Рис. 6 а (Fig. 6 a)



Рис. 6 б (Fig. 6 b)

Рис. 6. Интраоперационные фотографии установки имплантата.

Во время операции стерильный имплантат введен (а) и зафиксирован к нижней челюсти справа (б).

Fig. 6. Intraoperative photographs of implant installation.

During the operation, a sterile implant was inserted (a) and fixed to the lower jaw on the right (b).

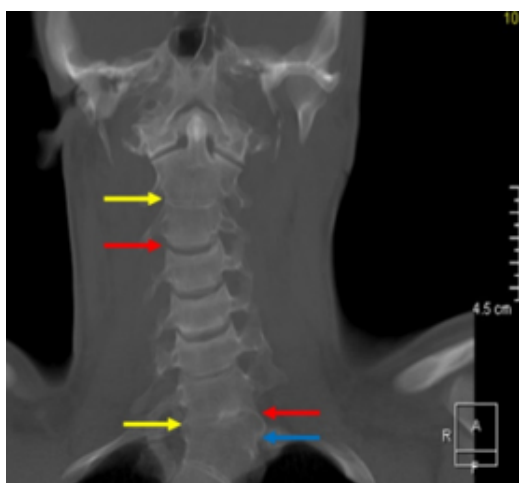


Рис. 7 а (Fig. 7 a)



Рис. 7 б (Fig. 7 b)

Рис. 7. МСКТ шейного отдела позвоночника (с охватом челюстно-лицевой области), МПР, а – коронарная реконструкция, б – сагиттальная реконструкция.

Определяется конкресценция C2-C3, C6-C7-Th1 позвонков (желтые стрелки), с наличием дополнительного полупозвонка слева, на уровне C7-Th1 (синяя стрелка).

Нарушение статики позвоночного столба – S-образный сколиоз с дугами искривлений: верхней дуги вправо – на уровне C3-4, нижней дуги влево – на уровне C7-Th1 (красные стрелки); сглаженность физиологического шейного лордоза с формированием кифоза в сегменте C5-6 (зеленая стрелка).

Fig. 7. MSCT of the cervical spine (including the maxillofacial region), MPR, a – coronal reconstruction, b - sagittal reconstruction.

Concretion of the C2-C3 and C6-C7-Th1 vertebrae is visible (yellow arrows), with an additional hemivertebra on the left, at the C7-Th1 level (blue arrow).

Violation of the statics of the spinal column – S-shaped scoliosis with curved arcs: the upper one to the right – at the C3-4 level, the lower one to the left – at the C7-Th1 level (red arrows); smoothing of the physiological cervical lordosis, with the formation of kyphosis in the C5-6 segment (green arrow).

Ранними послеоперационными результатами при проведении МСКТ лицевого черепа были отмечены – почти полное восстановление симметрии лица с дополненным объемом к нижней челюсти справа, восстановление длины правой суставной ветви нижней челюсти до необходимого размера, практически центральное положение суставной головки в правом ВНЧС (рис. 8, 9).

работе с КТ-изображениями (МСКТ, КЛКТ) стала оценка автоматического изменения объема ротоглоточного дыхательного пути (особенно при таких скелетных аномалиях, как СГ и гипертонус мышц языка), которая была проведена до и после операции (рис. 12). С использованием программы автоматической сегментации костных и мягкотканых структур на послеоперационном этапе был

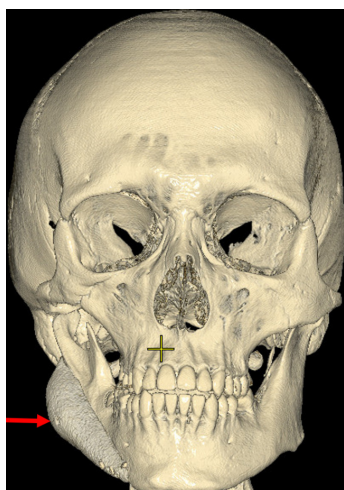


Рис. 8 а (Fig. 8 a)

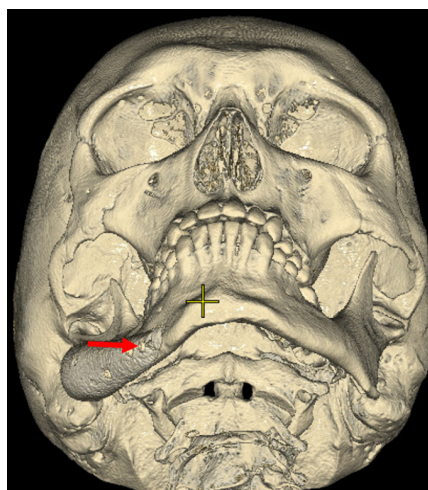


Рис. 8 б (Fig. 8 b)

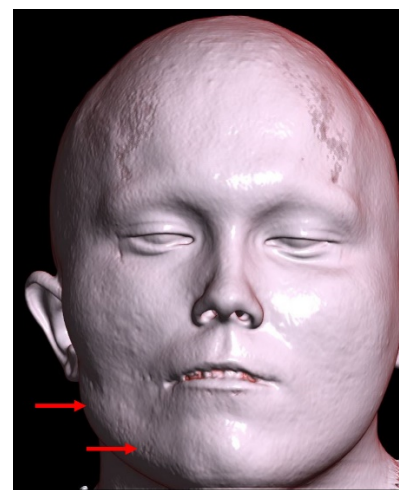


Рис. 8 в (Fig. 8 c)

Рис. 8. МСКТ, объемный рендеринг с 3D-моделированием костных структур с демонстрацией послеоперационной коррекции недостающего объема тела нижней челюсти.

а, б – Коррекция недостающего объема тела нижней челюсти (красные стрелки).

в – Демонстрация ожидаемых пациентом результатов эстетического моделирования симметрии лица.

Fig. 8. MSCT, volume rendering, with 3D modeling of bone structures demonstrating postoperative correction of the missing volume of the mandible.

a, b – Correction of the missing volume of the mandible body (red arrows).

c – Visual demonstration of the patient's expected results of aesthetic modeling of facial symmetry.

Для оценки проведенного (этапного) остеопатического и ортодонтического лечения пациенту для планирования этого комбинированного лечения в послеоперационный период были проведены КЛКТ (до операции) и МСКТ (после операции) лицевого черепа и ВНЧС с возможностью работы в программе цефалометрического анализа (ПО Planmeca Romexis, Финляндия, ПО Диагност, Россия) для проведения цефалометрических расчетов (в ручном и в автоматическом вариантах) в прямой и боковой проекции (рис. 10, 11). Ранним результатом контурной пластики стали уменьшение ретропозиции нижней челюсти, уменьшение протрузии верхних резцов, сокращение сагиттальной щели (рис. 11).

Важным диагностическим дополнением к возможностям вышеуказанного ПО при

определен восстановленный объем ротоглоточного дыхательного пути на 16,8 см³ (с 18,4 см³ до 35,2 см³), минимальное сечение увеличено до 41,4 мм² (с 189,6 мм до 231 мм²). Данные показатели важны для исключения обструкции дыхательных путей, в том числе риска апноэ.

Обсуждение.

Для пациентов с синдромом Голденхара важен междисциплинарный подход в лечении, из которого самый яркий эстетический эффект обеспечивает контурная пластика лица. Подготовка к контурной пластике с этапами создания по виртуальной трехмерной модели прототипа и окончательной модели имплантата потребовала от хирургов больших затрат времени, связанных с необычностью работы и профессиональным контактом с рентгенологом, что в первую

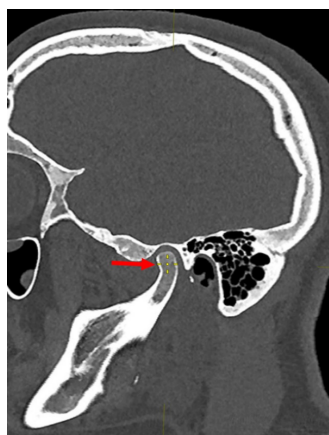


Рис. 9 а (Fig. 9 a)

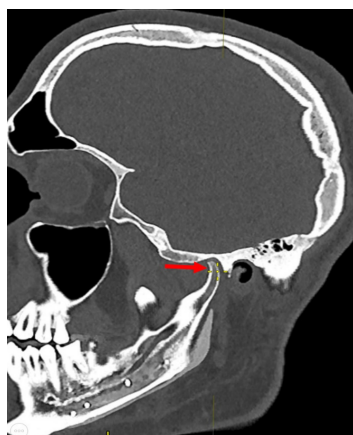


Рис. 9 б (Fig. 9 b)

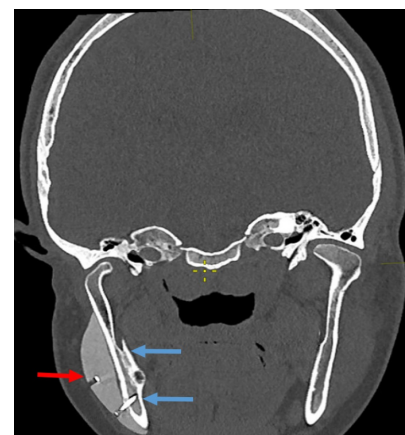


Рис. 9 в (Fig. 9 c)

Рис. 9. МСКТ ВНЧС после реконструктивной пластики, МПР, кососагиттальные реконструкции (а – левый ВНЧС, б – правый ВНЧС).

а – Суставная головка обычной формы и размеров, имеет центральное положение в суставе;

б – Правый ВНЧС; ближе к центральному положению в суставе, ретропозиция незначительная (красная стрелка).

в – Симметрия суставных ветвей нижней челюсти; дополнение костного (синие стрелки) и мягкотканного (красная стрелка) объема до необходимого правой суставной ветви.

Fig. 9. MSCT of the TMJ (after reconstructive surgery); MPR, oblique sagittal views (a – left TMJ, b – right TMJ).

a – The condyle is of normal shape and size, and is centrally positioned in the joint.

b – Closer to the central position in the joint, the retroposition is not significant (red arrow).

c – Symmetry of the articular rami of the mandible; addition of bone (blue arrows) and soft tissue (red arrow) volume to the required one of the right articular rami.

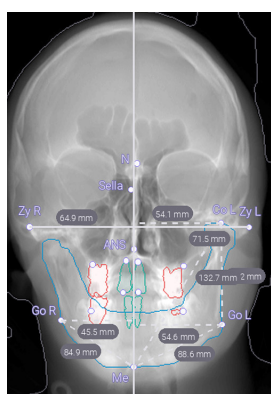


Рис. 10 а (Fig. 10 a)

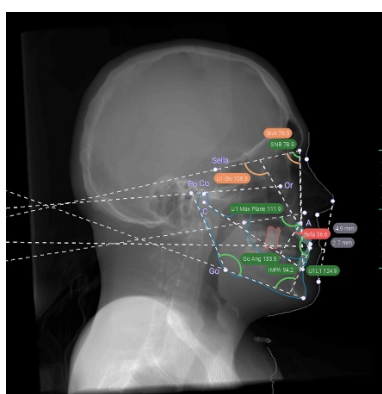


Рис. 10 б (Fig. 10 b)

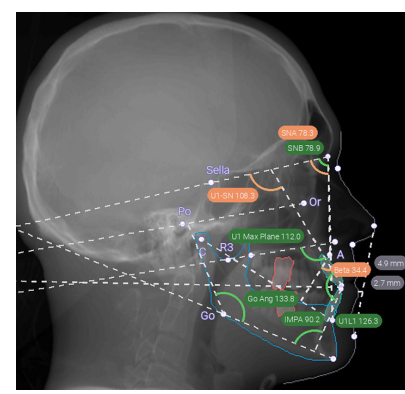


Рис. 10 в (Fig. 10 c)

Рис. 10. Программа автоматического цефалометрического анализа лицевого черепа до операции (а – в прямой проекции, б – в боковой проекции (левый бок), в – в боковой проекции (правый бок)).

Определяются признаки поперечных и вертикальных скелетных несоответствий, в том числе нарушение прикуса, искривленная позиция средней линии зубов.

Fig. 10. Software for automatic cephalometric analysis of the facial skull before surgery (a - frontal projection, b – lateral projection (left side), c – lateral projection (right side)).

Signs of transverse and vertical skeletal discrepancies are determined, including malocclusion and a crooked position of the teeth midline.

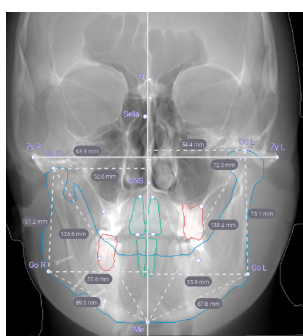


Рис. 11 а (Fig. 11 a)

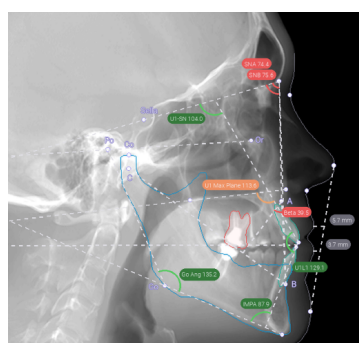


Рис. 11 б (Fig. 11 b)

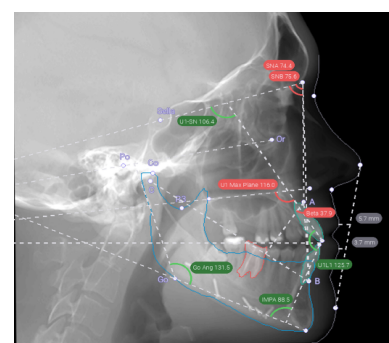


Рис. 11 в (Fig. 11 c)

Рис. 11. Программа автоматического цефалометрического анализа лицевого черепа после операции через 2,5 месяца (а – в прямой проекции, б – в боковой проекции (левый бок), в – в боковой проекции (правый бок)).

Отмечается умеренно выраженное уменьшение ретропозиции нижней челюсти, уменьшение протрузии верхних резцов, сокращение сагиттальной щели.

Fig. 11. Program for automatic cephalometric analysis of the facial skull 2.5 months later after surgery (a – in the frontal projection, b – in the lateral projection (left side), c – in the lateral projection (right side)).

There is a moderate decrease in the retroposition of the lower jaw, a decrease in the protrusion of the upper incisors, narrowing of the sagittal fissure.

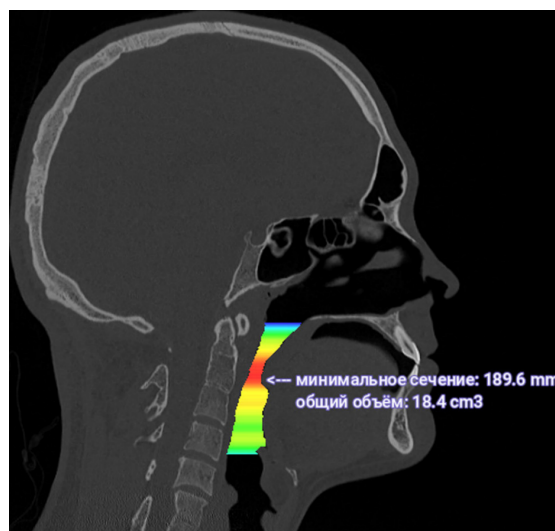


Рис. 12 а (Fig. 12 a)

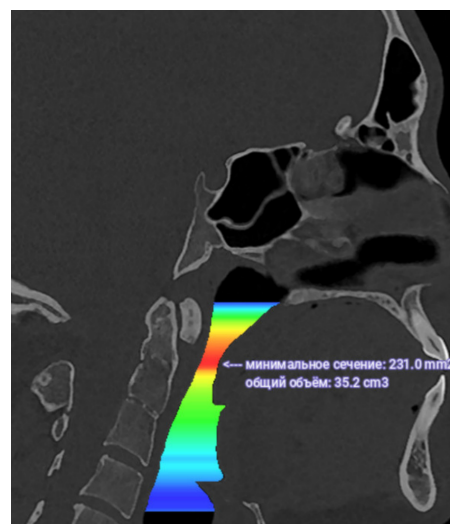


Рис. 12 б (Fig. 12 b)

Рис. 12. Программа автоматической сегментации костных и мягкотканых структур для измерения объема ротоглоточного дыхательного пути (а – до операции, б – после операции).

На послеоперационном этапе был определен увеличенный объем ротоглоточного дыхательного пути на 16,8 см³ (с 18,4 см³ до 35,2 см³), минимальное сечение увеличено до 41,4 мм² (с 189,6 мм² до 231 мм²).

Fig. 12. A program for automatic segmentation of bone and soft tissue structures for measuring the volume of the oropharyngeal airway (a – before surgery, b – after surgery).

At the postoperative stage, an increased volume of the oropharyngeal airway of 16.8 cm³ was determined (from 18.4 cm³ to 35.2 cm³), and the minimum section was increased to 41.4 mm² (from 189.6 mm² to 231 mm²).

очередь следует объяснить отсутствием навыков работы с трехмерными объектами на компьютере. Всеми врачами, участвовавшими в этой работе, была отмечена потрясающая наглядность прототипа челюсти пациента, детальная проработка тонкостей анатомических структур. Была положительно оценена возможность проведения проработки этапов предстоящей контурной пластики. Это достижимо при правильном обследовании пациента и контроле получаемых трехмерных реконструкций костных структур и мягких тканей врачом-рентгенологом.

Была отмечена высокая ценность прототипа как наглядного пособия для общения с пациентом. Используя прототип, мы смогли до хирургического вмешательства полностью разъяснить пациенту ход операции, возможные осложнения, показать анатомические сложности и мотивировать на согласие с проведением дополнительных процедур в реабилитационный период. Сложилось уверенное впечатление, что использование прототипа позволило нам не только значительно лучше информировать пациента, но и объяснить размер материальных трат. В последующем прототип может быть использован не только для улучшения коммуникации «врач – пациент», но и в обучении персонала или для межврачебной коммуникации.

Важным аспектом планирования пластической операции является проведение компьютерной томографии в разных технологических вариантах устройства аппаратов – МСКТ и КАКТ с возможностью проведения компьютерного объемного моделирования ожидаемого результата и с проведением стереолитографии с последующей разметкой и адаптацией стандартного имплантата по поверхности кости и, как завершение, проведение операции с оценкой ранних послеоперационных результатов.

В источниках литературы нет единого мнения относительно однозначного выбора технологии КТ для пациентов с синдромом Голденхара. Считается, что программы МСКТ для объемного моделирования обеспечивают больше преимуществ, чем КАКТ, по более достоверному объемному воспроизведению черепа и мягких тканей с отсутствием перекрытия анатомических частей, ограничивающего видимость структур, обеспечивая высокую точность и наглядность объемных изображений с постоянной и легко воспроизводимой системой отсчета. Это обеспечивает максимально возможное соответствие индивидуальных имплантатов анатомии пациента при операции. При МСКТ используются стандартные величины рентгеновской плот-

ности тканей по шкале Хаунсфилда во всем объеме и по всей протяженности исследования.

КАКТ, помимо четко обозначенной матрицы исследования, зачастую имеет меньший серошкальный диапазон и неравномерные величины рентгеновских плотностей тканей в разных точках зоны обследования, что может вести к погрешностям и искажениям при построении трехмерных реконструкций и при изготовлении стереолитографических моделей [10, 16].

Дополнительным важным преимуществом МСКТ головы и лицевого черепа является возможность снижать количество артефактов, которые возникают довольно часто из-за наличия металла в составе несъемных ортопедических конструкций после реставрации зубов, ввиду наличия ортодонтических конструкций, дентальных имплантатов, шурупов и мини-пластин после остеосинтеза [11, 16]. На трехмерном изображении при КАКТ появляется большое количество лучей в плоскости выполненного сканирования и значительно снижается качество при создании стереолитографических моделей. При моноэнергетической МСКТ можно изменять направления лучей артефактов таким образом, чтобы область артефактов «не наслаивалась» на зону, в которой планируется выполнять хирургическое вмешательство. Потенциально двухэнергетическая МСКТ лицевого черепа почти полностью убирает проблему вышеописанных артефактов изображения.

Недостатками МСКТ лицевого черепа для планирования контурной пластики является горизонтальное положение пациента во время обследования, которое может исказить расположение мягких тканей лица (из-за артефактов отсутствует детализация окклюзии), достаточно высокая стоимость процедуры и более высокая лучевая нагрузка (выше, чем при КАКТ) [16]. Нами вопросы лучевой нагрузки при МСКТ черепа решались в сторону снижения эффективной дозы до допустимого низкого порога без снижения качества построения моделей объемного рендеринга, стереолитографии, использовался разработанный авторский алгоритм при проведении других МСКТ-исследований [17]. В дальнейшем следует продолжить обсуждение вопросов оптимизации лучевой нагрузки при МСКТ и уменьшения артефактов при КАКТ лицевого черепа.

Для решения вышеизложенных задач и для подтверждения эффективности нашего лучевого мониторинга на этапах послеоперационной стратегии для пациентов с синдромом Голденхара необходимо долгосрочное

междисциплинарное наблюдение врачей (оториноларинголога, окулиста, стоматолога-ортопеда, челюстно-лицевого хирурга, ортодонта, остеопата, вертебролога) и их комбинированная оценка, что будет изложено нами в следующих статьях.

Заключение.

Использование клинико-лучевого мониторинга на всех этапах ведения и лечения пациента с таким редким заболеванием, как синдром Голденхара дает не только исключительный опыт для выбора правильной тактики лечения, гарантировано улучшает общее состояние пациента и его внешнюю эстетику (повышает настроение и уверенность в

обычной жизни и социальной деятельности). Персонифицированный подход к пациентам с орфанными заболеваниями, в том числе междисциплинарный врачебный поиск решений для медицинской помощи таким пациентам, способствуют накоплению ценного исследовательского опыта.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие финансовой поддержки исследования и конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

Список литературы:

1. Giordano L, Turatti G. The goldenharsyndrome. *EJCO* 2016; 4. DOI:10.12889/2016_E0026.
2. A 3-month-old male infant with Goldenharsyndrome: A clinical case report from Woldia, Northeast Ethiopia. *Animaw Lingerew, Melese Shenkut Abebe, Tilahun Dessie Alene. et. al. SAGE Open Medical Case Reports.* 2024; 12: 1-4. DOI: 10.1177/2050313X241271752.
3. Внукова Е.В., Саватеева О.И., Васильев И.С. и др. Вариативность клинических проявлений при окуло-аурикуло-вертебральном спектре (синдром Голденхара). *Вопросы детской диетологии.* 2023; 21(2): 53–62. DOI: 10.20953/1727-5784-2023-2-53-62.
4. Lanjekar A., Bagde L., Sathwane R. et.al. Oculo-auriculo-vertebraldysplasia: a rare case report. *International Journal of Research and Review.* 2020; 7(2):187-191. DOI: <https://doi.org/10.52403/ijrr>.
5. Имшенецкая Н.И., Топольницкий О.З., Смыслёнова М.В. и др. Анализ симптомокомплексов у пациентов с синдромом краниофациальной микросомии и их лечение. *Стоматология детского возраста и профилактика.* 2021; 21(4):245-250.
6. Ei Ei Hsu Hlaing, Yoshihito Ishihara, Chikako Hara, et.al. Modification of Dentofacial Growth Associated with Goldenhar Syndrome. *Acta medica Okayama.* September 2017. 71(5):437-443. DOI: 10.18926/AMO/55443.
7. Kabak SL, Savrasova NA, Zatochnaya VV. Hemifacial microsomia: skeletal abnormalities evaluation using CBCT (case report). *J Radiol Case Rep.* 2019; 13(11):1-9. DOI: 10.3941/jrcr.v13i11.3687.
8. Subramaniam P., Girish KL, et al.: Dental management of a child with goldenhar syndrome. *European Journal of General Dentistry.* 2014; 3(2):158. DOI: 10.4103/2278-9626.134849
9. Kunjumon SP, Mathew AK, Suma MS., et. al. Diagnostic imageology of Goldenhar syndrome: Report of a rare case. *Contemp Clin Dent.* 2023; 14:313-6. DOI: 10.4103/ccd.ccd_180_23.
10. Saccomanno S, Greco F, D'Alatri L, De Corso E, Pandolfini M, Sergi B, Pirroni T, Deli R. Role of 3D-CT for orthodontic and ENT evaluation in Goldenhar syndrome. *Acta Otorhinolaryngol Ital.* 2014;34(4):283-7. PMID: 25210224; PMCID: PMC4157534.
11. Польшина В.И., Решетов И.В., Серова Н.С. Комплексная лучевая диагностика у пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС). *REJR.* 2021; 11(1):88-102. DOI: 10.21569/2222-7415-2021-11-1-88-102.
12. Хомутова Е. Ю., Савченко Р. К., Хомутов А. Д., Бадамын А. М. Использование нового механического фиксатора нижней челюсти для открывания рта при проведении псевдодинамической и динамической магнитно-резонансной томографии височно-нижнечелюстных суставов. *REJR.* 2024; 14(3):131-144. DOI: 10.21569/2222-7415-2024-14-3-131-144.
13. Игнатъев Ю. Т., Хомутова Е. Ю., Савченко Р. К. Магнитно-резонансная томография височно-нижнечелюстных суставов с использованием головной катушки. *REJR.* 2016; 6 (1):29-34. DOI:10.18411/a-2016-003.
14. Кобец К. К., Андреев С. В., Бондарев А. Е., Бондаренко А. В. Применение объемной стереоанимации в челюстно-лицевой хирургии. *Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон".* 2022; 32:324-329 DOI:10.20948/graphicon-2022-324-329
15. Kobets K.K., Andreev S.V., Bondarev A.E. Stereoanimation in Maxillofacial Surgery. *Scientific Visualization.* 2022; 14 (1): 121-133. DOI:10.26583/sv.14.1.10.
16. Nardi C, Talamonti C, Pallotta S. Head and neck effective dose and quantitative assessment of image quality: a study to compare cone beam CT and multislice spiral CT. *Dentomaxillofac Radiol.* 2017; 46(7): 20170030. DOI: 10.1259/dmfr.20170030.
17. Хомутова Е.Ю., Скрипкин Д.А., Буркова А.М. Вопросы лучевой нагрузки при виртуальной колоноскопии. *Медицинская визуализация.* 2009; 2: 59-62. EDN KYCVWP.

References:

- Giordano L, Turatti G. The goldenharsyndrome. *EJCO* 2016; 4. doi:10.12889/2016_E0026
- Animaw Lingerew, Melese Shenkut Abebe, Tilahun Dessie Alene. et. al. A 3-month-old male infant with Goldenharsyndrome: A clinical case report from Woldia, Northeast Ethiopia. *SAGE Open Medical Case Reports*. 2024; 12: 1-4. doi: 10.1177/2050313X241271752
- Vnukova EV., Savateeva OL., Vasiliev IS., et al. Variability of clinical manifestations of oculo-auriculo-vertebral spectrum (Goldenhar syndrome). *Vopr. det. dietol. (Pediatric Nutrition)*. 2023; 21(2): 53-62 doi: 10.20953/1727-5784-2023-2-53-62 (in Russian)
- Lanjekar A, Bagde L, Sathwane R et.al. Oculo-auriculo-vertebraldysplasia: a rare case report. *International Journal of Research and Review*. 2020; 7(2):187-191 Journal's doi: <https://doi.org/10.52403/ijrr>
- Imshenetskaya NI., Topolnitskiy OZ., Smyslenova MV., et al. Analysis of signs and symptoms in patients with craniofacial microsomia and their treatment. *Pediatric dentistry and dental prophylaxis*. 2021; 21(4):245-250 doi:<https://doi.org/10.33925/1683-3031-2021-21-4-245-250> (in Russian).
- Ei Ei Hsu Hlaing, Yoshihito Ishihara, Chikako Hara, and Hiroshi Kamioka. Modification of Dentofacial Growth Associated with Goldenhar Syndrome. *Acta medica Okayama*. 2017; 71(5):437-443. doi: 10.18926/AMO/55443
- Kabak SL, Savrasova NA, Zatochnaya VV. Hemifacial microsomia: skeletal abnormalities evaluation using CBCT (case report). *J Radiol Case Rep*. 2019; 13(11):1-9 doi: 10.3941/jrcr.v13i11.3687.
- Subramaniam P., Girish KL, et al.: Dental management of a child with goldenhar syndrome. *European Journal of General Dentistry*. 2014. 3(2):158 doi: 10.4103/2278-9626.134849
- Kunjumon SP, Mathew AK, Suma MS, Iqbal MZ. Diagnostic imageology of Goldenhar syndrome: Report of a rare case. *ContempClin Dent*. 2023; 14: 313-336 doi: 10.4103/ccd.ccd_180_23.
- Saccomanno S, Greco F, D'Alatri L, De Corso E, Pandolfini M, Sergi B, Pirroni T, Deli R. Role of 3D-CT for orthodontic and ENT evaluation in Goldenhar syndrome. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2014; 4(4):283-7 PMID: 25210224; PMCID: PMC4157534.
- Polshina V.I., Reshetov I.V., Serova N.S. Complex radiodiagnosis in patients with dysfunction of the temporomandibular joint (TMJ). *REJR*. 2021; 11 (1): 88-102 doi: 10.21569/2222-7415-2021-11-1-88-102 (in Russian)
- Khomutova EYu., Savchenko RK, Badamshin AM., Khomutov AD. Use of a new mechanical fixation of the mandible for opening the mouth when carrying out dynamic magnetic resonance imaging of the temporomandibular joints. *REJR*. 2024; 11 (3): 131-144. doi 10.21569/2222-7415-2024-11-3-131-144 (in Russian)
- Ignatiev YuT., Khomutova EYu., Savchenko RK. Magnetic resonance imaging of the temporomandibular joints using a head coil. *REJR*. 2016; 1(1): 29-34. doi:10.18411/a-2016-003 (in Russian)
- Kobets KK., Andreev SV., Bondarev AE., Bondarenko AV. Application of volumetric stereoanimation in maxillofacial surgery. *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Vision "Graphicon."* 2022; 32: 324-329. doi:10.20948/graphicon-2022-324-329 (in Russian).
- Kobets K.K., Andreev S.V., Bondarev A.E. Stereoanimation in Maxillofacial Surgery. *Scientific Visualization*. 2022; 14 (1):121-133 doi:10.26583/sv.14.1.10.
- Nardi C, Talamonti C, Pallotta S. Head and neck effective dose and quantitative assessment of image quality: a study to compare cone beam CT and multislice spiral CT. *Dentomaxillofac Radiol*. 2017; 46(7):20170030 doi: 10.1259/dmfr.20170030.
- Khomutova E.Yu., Skripkin D.A., Burkova A.M. Questions of radiation exposure at virtual colonoscopy. *Medical Visualization J*. 2009; 2: 59-62 (in Russian).

SYNOVIAL LIPOMATOSIS IN A 36-YEAR-OLD FEMALE WITH CHRONIC LEFT KNEE PAIN AND MECHANICAL SYMPTOMS

Sayf Aldeen Kassab Bashi¹, Moamer Abdulghafoor Ibrahim², Ahmed Salih Alshewered³

1 – Department of Orthopedics, Mosul General Hospital, Nineveh Health Directorate, Ministry of Health. Mosul, Iraq.

2 – University of Mosul. Mosul, Iraq.

3 – Misan Radiation Oncology Center, Misan Health Directorate, Ministry of Health. Misan, Iraq.

Synovial lipomatosis, or lipoma arborescens, is a rare, benign intra-articular disorder characterized by diffuse villous proliferation of synovial tissue due to fatty infiltration. This condition often presents with nonspecific symptoms such as chronic knee pain, intermittent swelling, and mechanical dysfunction, including locking.

Materials and methods. Herein, we present the case of a 36-year-old female with chronic left knee pain, intermittent swelling, and episodes of locking.

Results. Magnetic resonance imaging (MRI) suggested intra-articular pathology, which was confirmed by histopathological examination after arthroscopy and biopsy. The patient underwent arthroscopic synovectomy. Postoperatively, she was satisfied with her outcome, with improved pain relief and function in her right knee.

Discussion. In this case, the patient presented with chronic knee pain, intermittent swelling, and occasional mechanical locking, which are hallmark symptoms of intra-articular pathology. However, the imaging findings, including MRI and ultrasound, were insufficient to establish a definitive diagnosis. MRI is typically considered the gold standard for diagnosing synovial lipomatosis due to its ability to visualize the characteristic villous synovial projections with fatty infiltration, which appear hyperintense on T1- and T2-weighted images and suppress on fat-saturated sequences [2]. Ultrasound, while being a more accessible and cost-effective modality, is often limited in its ability to provide clear differentiation from other synovial pathologies such as pigmented villonodular synovitis (PVNS), synovial chondromatosis, or rheumatoid synovitis. In this case, the imaging findings were nonspecific, highlighting the diagnostic challenges in identifying synovial lipomatosis without histopathological correlation.

Conclusion. This case report highlights the clinical manifestations, diagnostic challenges, and therapeutic options for synovial lipomatosis, emphasizing the importance of early recognition and timely intervention.

Keywords: orchiopexy, synovial lipomatosis, knee arthroscopy, lipoma arborescens, arthroscopy, knee pain.

Corresponding author: Ahmed Salih Alshewered, e-mail: ahmedsalihdr2008@yahoo.com

For citation: Sayf Aldeen Kassab Bashi, Moamer Abdulghafoor Ibrahim, Ahmed Salih Alshewered. Synovial lipomatosis in a 36-year-old female with chronic left knee pain and mechanical symptoms. REJR 2026; 16(1):237-242. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-237-242.

Received: 08.09.25

Accepted: 15.10.25

СИНОВИАЛЬНЫЙ ЛИПОМАТОЗ У 36-ЛЕТНЕЙ ПАЦИЕНТКИ С ХРОНИЧЕСКОЙ БОЛЬЮ В ЛЕВОМ КОЛЕННОМ СУСТАВЕ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СИМПТОМАМИ

Сайф Альдин Кассаб Баши¹, Моамер Абдулгафур Ибрагим²,
Ахмед Салих Альшеверед³

1 – Отделение ортопедии, Генеральная больница Мосула, Директорат здравоохранения Найнавы, Министерство здравоохранения.
г. Мосул, Ирак.

2 – Университет Мосула. г. Мосул, Ирак.

3 – Центр радиационной онкологии Майсана, Директорат здравоохранения Майсана, Министерство здравоохранения.
г. Майсан, Ирак.

Синовиальный липоматоз или липома арборесценс (древовидная липома), представляет собой редкое доброкачественное внутрисуставное заболевание, характеризующееся диффузной ворсинчатой пролиферацией синовиальной ткани вследствие жировой инфильтрации. Это состояние часто проявляется такими неспецифическими симптомами, как хроническая боль в коленном суставе, интермиттирующий отек и механическая дисфункция, включая блокаду (заклинивание).

Материалы и методы. В данной статье представлен клинический случай 36-летней пациентки с хронической болью в левом коленном суставе, интермиттирующим отеком и эпизодами блокады.

Результаты. Магнитно-резонансная томография (МРТ) позволила предположить внутрисуставную патологию, которая была подтверждена гистопатологическим исследованием после артроскопии и биопсии. Пациентке была выполнена артроскопическая синовэктомия. В послеоперационном периоде она была удовлетворена результатом, отметив уменьшение болевого синдрома и улучшения функции правого коленного сустава.

Обсуждение. В данном случае пациентка предъявляла жалобы на хроническую боль в коленном суставе, интермиттирующий отек и периодическую механическую блокаду, что является характерными симптомами внутрисуставной патологии. Однако визуализирующие методы, включая МРТ и ультразвуковое исследование, оказались недостаточными для установления окончательного диагноза. МРТ обычно считается «золотым стандартом» диагностики синовиального липоматоза благодаря способности визуализировать характерные ворсинчатые выросты синовиальной оболочки с жировой инфильтрацией, которые выглядят гиперинтенсивными на T1- и T2-взвешенных изображениях и подавляются на последовательностях с подавлением жирового сигнала [2]. Ультразвуковое исследование, будучи более доступным и экономически эффективным методом, часто ограничено в своей способности обеспечивать четкую дифференцировку от других синовиальных патологий, таких как пигментный вилонодулярный синовит (ПВНС), синовиальный хондроматоз или ревматоидный синовит. В данном случае результаты визуализации были неспецифическими, что подчеркивает диагностические трудности при выявлении синовиального липоматоза без гистопатологического подтверждения.

Заключение. Данный клинический случай освещает клинические проявления, диагностические трудности и варианты лечения синовиального липоматоза, подчеркивая важность раннего распознавания и своевременного вмешательства.

Ключевые слова: синовиальный липоматоз, артроскопия коленного сустава, липома арборесценс (древовидная липома), артроскопия, боль в коленном суставе.

Контактный автор: Ахмед Салих Альшеверед, e-mail: ahmedsalihdr2008@yahoo.com

Для цитирования: Сайф Альдин Кассаб Баши, Моамер Абдулгафур Ибрагим, Ахмед Салих Альшеверед. Синовиальный липоматоз у 36-летней пациентки с хронической болью в левом коленном суставе и механическими симптомами. REJR 2026; 16(1):237-242. DOI: 10.21569/2222-7415-2026-16-1-237-242.

Статья получена: 08.09.25

Статья принята: 15.10.25

Synovial lipomatosis is a rare, benign but distinct pathological condition characterized by the proliferation of mature adipose tissue within the synovial membrane, leading to villous and frond-like projections. First described by Hoffa in 1904 [1], it is most frequently observed in the knee joint, although other joints such as the shoulder, elbow, and hip may also be affected [2].

The etiology remains uncertain, but chronic inflammation, trauma, or degenerative joint disease is considered a potential trigger [3].

Clinically, it manifests as chronic pain, intermittent swelling, and mechanical symptoms, which may mimic other intra-articular pathologies. MRI plays a pivotal role in diagnosis, while arthroscopy combined with histopathology confirms the diagnosis and guides management. This report underscores the diagnostic and therapeutic approach to synovial lipomatosis in a young adult patient presenting with mechanical knee symptoms.

Case presentation.

Our patient is a 36-year-old female [body mass index (BMI): 27 kg/m²], who presented to our clinic with a long-standing history of left knee pain with intermittent swelling and locking epi-

sodes.

On presentation to our clinic, the patient's main complaints were chronic swelling with mechanical symptoms, specifically popping, catching, and locking while performing daily activities. Pain was exacerbated by physical activities such as prolonged walking, stair climbing, and squatting. She had a history of knee trauma 5 years ago. No history of fever or systemic symptoms. No prior history of joint disease or surgical interventions. No family history of autoimmune or inflammatory joint disorders.

Examination of her knee revealed mild knee effusions with no instability with varus and valgus stress testing. In addition, the patient had a negative posterior and anterior drawer and Lachman's maneuver. She had normal patellar tracking and mildly restricted extension with pain. Flexion was full but accompanied by discomfort. Positive McMurray and Thessaly tests, suggestive of intra-articular pathology.

Diagnostic workup.

X-Ray (Left Knee).

No bony abnormalities or significant degenerative changes, fractures, avascular necrosis, or osteochondral lesions.

Ultrasound report.

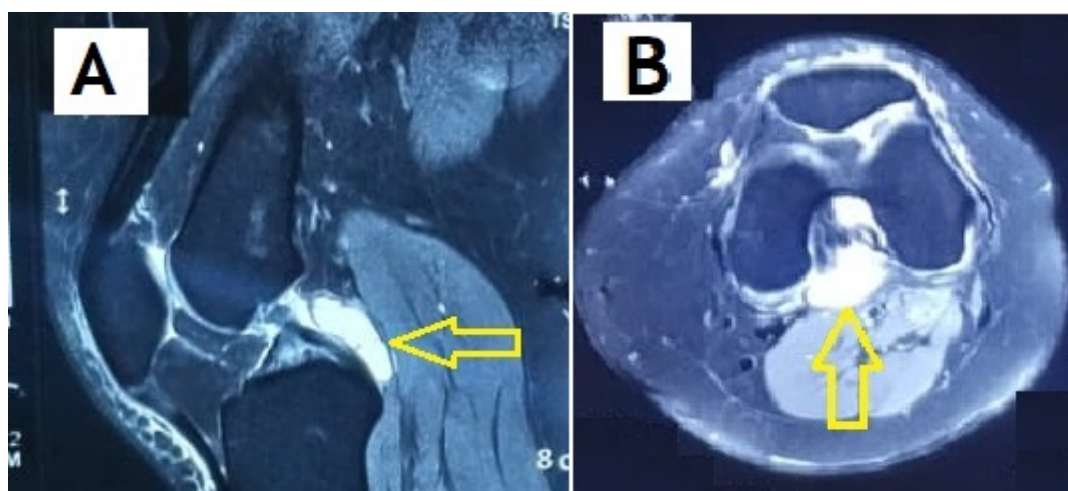


Fig. 1 (Рис. 1)

Fig. 1. MRI, left knee.

A – sagittal view, B – axial view, demonstrating a multiloculated intra-articular cystic lesion (largest: 26x22x16 mm) seen posterior between ACL and PCL. The cyst is high signal in T2, low in T1, and contrast shows septal and wall enhancement (yellow arrow).

Рис. 1. МРТ левого коленного сустава.

А – сагиттальная плоскость, В – аксиальная плоскость, демонстрирующие многокамерное внутрисуставное кистозное образование (наибольшие размеры: 26x22x16 мм), расположенное сзади между передней крестообразной связкой (ПКС) и задней крестообразной связкой (ЗКС). Киста имеет высокий сигнал на Т2-взвешенных изображениях, низкий – на Т1-взвешенных, при контрастировании отмечается усиление перегородок и стенки (желтая стрелка).

Evidence of soft tissue mass in the posterior recess adjacent to the posterior root of the medial meniscus under the medial head of the gastrocnemius muscle suggests suspicion of either soft tissue chondroma or focal pigmented villonodular synovitis.

MRI report.

There is a multi-loculated intra-articular cystic lesion seen posteriorly between the ACL and PCL. The cyst has a high signal in T2 and a low signal in T1; post-contrast shows septal and wall enhancement, suggestive of intra-articular complicated ganglion cysts (fig. 1). MRIs were negative for bony, meniscal, or ligament pathology.

Diagnosis.

The clinical presentation and imaging studies were inconclusive in establishing a definitive diagnosis. Consequently, the decision was made to proceed with diagnostic arthroscopy. Intraoperatively, villous and frond-like synovial proliferation was observed located posterior to the posterior cruciate ligament (fig. 2). The articular surfaces appeared normal, with no evidence of chondromalacia or cartilage damage. The hypertrophic lipomatous-like projections were systematically debrided, and representative samples were obtained and sent for histopathological evaluation to confirm the di-

agnosis.

Gross description revealed multiple pieces of tissue, whitish yellow in colour, soft in consistency. Microscopic description demonstrated villous proliferation of the synovium with extensive replacement of the subsynovial stroma by mature adipose tissue, the surface lined by a thin layer of synoviocytes with scattered areas of focal hyperplasia, and no evidence of atypia. Features consistent with benign synovial lipomatosis /lipoma arborescens (fig. 3).

Postoperative Care and Follow-Up.

Immediate Postoperative Care Pain was managed with NSAIDs and acetaminophen. Early mobilization with a physiotherapy regimen was initiated to improve ROM and strengthen periarticular muscles.

Outcome.

At the 4-week follow-up, the patient reported significant improvement in pain and swelling.

Discussion.

Synovial lipomatosis, also referred to as lipoma arborescens, is a rare benign condition characterized by diffuse villous proliferation of synovial tissue with adipose infiltration. It commonly affects the knee joint but can also involve other synovial-lined joints such as the hip, shoulder, or elbow. While the exact pathogenesis remains unclear, it has been hypothesized to result from chronic synovial irritation or inflammation secondary to trauma, degenerative joint disease, or other predisposing factors [3]. Despite its characteristic imaging features, the diagnosis of synovial lipomatosis occasionally requires histopathological confirmation, especially in cases where imaging is inconclusive.

In this case, the patient presented with chronic knee pain, intermittent swelling, and occasional mechanical locking, which are hallmark symptoms of intra-articular pathology. However, the imaging findings, including MRI and ultrasound, were insufficient to establish a definitive diagnosis. MRI is typically considered the gold standard for diagnosing synovial lipomatosis due to its ability to visualize the characteristic villous synovial projections with fatty infiltration, which appear hyperintense on T1- and T2-weighted images and suppress on fat-saturated sequences [2]. Ultrasound, while being a more accessible and cost-effective modality, is often limited in its ability to provide clear differentiation from other synovial pathologies such as pigmented villonodular synovitis (PVNS), synovial chondromatosis, or rheumatoid synovitis. In this case, the imaging findings were nonspecific, highlighting the diagnostic challenges in identifying synovial lipomatosis

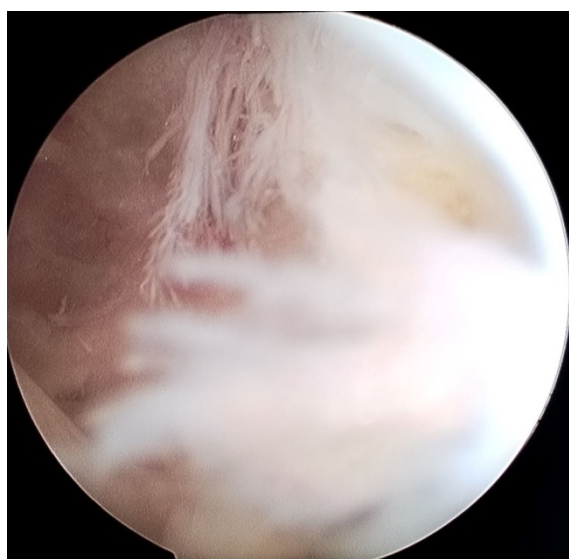


Fig. 2 (Рис. 2)

Fig. 2. Knee arthroscopic view of villous.

frond-like proliferation of fatty tissue replacing the subsynovial layer of the joint.

Рис. 2. Артроскопический вид коленного сустава.

ворсинчатая, перистая (листовидная) пролиферация жировой ткани, замещающая подсиновальный слой сустава.

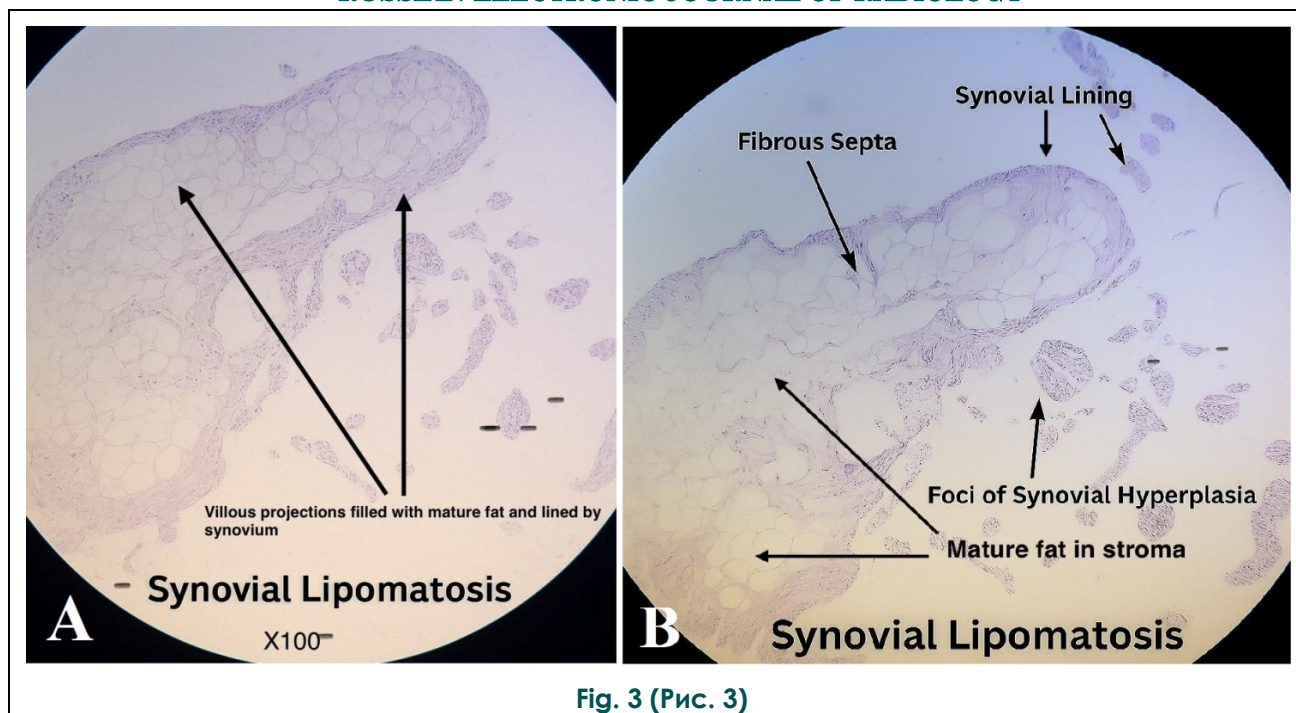


Fig. 3 (Рис. 3)

Fig. 3. Photomicrographs.

Villous projections filled with mature fat and lined by synovial hyperplasia (Hematoxylin / eosin, 100 x) (black arrows).

Рис. 3. Микрофотографии.

Ворсинчатые выросты, заполненные зрелой жировой тканью и выстланные гиперплазированным синовием (гематоксилин и эозин, увеличение $\times 100$) (черные стрелки).

without histopathological correlation.

The decision to proceed with diagnostic arthroscopy was pivotal in this case. Arthroscopy allowed direct visualization of the intra-articular pathology, revealing small, multi-villous projections located posterior to the posterior cruciate ligament (PCL). Importantly, the articular surfaces were found to be normal, with no evidence of chondromalacia or cartilage damage, thus ruling out other degenerative or inflammatory joint conditions. Synovial biopsy obtained during arthroscopy provided the definitive diagnosis. Histopathological examination demonstrated hypertrophic synovial tissue with adipose infiltration, consistent with synovial lipomatosis. These findings confirmed the diagnosis, which could not be reliably established through imaging alone.

The role of arthroscopy in the diagnosis and management of synovial lipomatosis is well established, particularly in cases with inconclusive imaging or atypical presentations [5]. Beyond its diagnostic utility, arthroscopy also serves as a therapeutic intervention, enabling partial or complete synovectomy to reduce mechanical symptoms and inflammation. In this case, arthroscopic debridement of hypertrophic lipomatous synovial projections provided symp-

tomatic relief and prevented further intra-articular damage.

This case underscores the limitations of imaging modalities in certain presentations of synovial lipomatosis and highlights the critical role of arthroscopy and biopsy in establishing a definitive diagnosis. Early recognition and intervention are essential to prevent long-term complications such as joint damage and impaired function. Although synovial lipomatosis is a benign condition, its chronic nature and potential to cause mechanical dysfunction necessitate timely diagnosis and management. Arthroscopic synovectomy, as performed in this case, remains the treatment of choice, offering excellent symptom relief and functional recovery [2, 5].

Conclusion.

This case highlights the diagnostic challenges associated with synovial lipomatosis, particularly in the context of inconclusive imaging findings. It emphasizes the importance of arthroscopy and histopathology in confirming the diagnosis and guiding appropriate management. Clinicians should maintain a high index of suspicion for synovial lipomatosis in patients with chronic knee symptoms and unexplained intra-articular pathology, even when

imaging is nondiagnostic.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Financial support.

The authors declare they received no financial support for the research, authorship, or publication of this article.

References:

1. Braun S, Zaucke F, Brenneis M, Rapp AE, Pollinger P, Sohn R, Jenei-Lanzl Z, Meurer A. The Corpus Adiposum Infrapatellare (Hoffa's Fat Pad)-The Role of the Infrapatellar Fat Pad in 1- Osteoarthritis Pathogenesis. *Biomedicines*. 2022 May 5;10(5):1071. doi: 10.3390/biomedicines10051071. PMID: 35625808; PMCID: PMC9138316.
2. Vilanova JC, Barceló J, Villalón M, Aldomà J, Delgado E, Zapater I. MR imaging of lipoma arborescens and the associated lesions. *Skeletal Radiol*. 2003 Sep;32(9):504-9. doi: 10.1007/s00256-003-0654-9. Epub 2003 Jun 17. PMID: 12811424.
3. Thavasianantham K, Raagul TS, Ganesh A, Elangovan P, P H, Regunathan PS. Unusual Presentation of Synovial Lipomatosis Mimicking Septic Arthritis of the Knee: A Case Report. *Cureus*. 2024 Apr 11;16(4):e58075. doi: 10.7759/cureus 58075. PMID: 38738069; PMCID: PMC11088535.
4. Rao S, Rajkumar A, Elizabeth MJ, Ganesan V, Kuruville S. Pathology of synovial lipomatosis and its clinical significance. *J Lab Physicians*. 2011 Jul;3(2):84-8. Doi: 10.4103/0974-2727.86839. PMID: 22219560; PMCID: PMC3249723.
5. Malkoc M, Korkmaz Ö. Results of Arthroscopic Synovectomy for Treatment of Synovial Lipomatosis (Lipoma Arborescens) of the Knee. *J Knee Surg*. 2018 Jul;31(6):536-540. Doi: 10.1055/s-0037-1604440. Epub 2017 Jul 24. PMID: 28738431.

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ В ЖУРНАЛЕ

REJR

Российский Электронный Журнал Лучевой Диагностики (REJR, www.rejr.ru) принимает к публикации оригинальные статьи, обзоры литературы, описания клинических случаев, лекции. Публикации принимаются по электронному адресу: rejr@rejr.ru

Публикации должны соответствовать тематике журнала, т.е. специальности 3.1.25-Лучевая диагностика.

Публикации в журнале бесплатны.

Все статьи проходят двойное слепое рецензирование членами редакционного совета, а также ведущими специалистами по соответствующим научным и клиническим направлениям.

Требования к публикациям составлены согласно "Единым требованиям к рукописям, представляемым в биомедицинские журналы (Ann Intern Med 1997;126:36-47)".

Статьи принимаются на двух языках: русском и английском.

Требования к подаче статьи.

Список необходимых документов (все материалы направляются в редакцию по электронной почте единым письмом на официальный адрес журнала):

- Текст рукописи.
- Официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, с визой руководителя на первой странице.
- Согласие всех авторов и подписи всех авторов на первой странице статьи.
- Авторам необходимо заявить о наличии или отсутствии потенциального конфликта интересов (например, конкурирующие интересы, которые, по мнению автора, могут иметь прямое или опосредованное влияние на публикационный процесс) (см. рекомендации ICJME).

Требования к оформлению статей.

Статья должна быть напечатана шрифтом Times New Roman № 12 через 1,5 интервала.

Страницы должны быть пронумерованы.

На первой странице необходимо указать фамилию и инициалы автора (авторов), название статьи, полное название учреждения (учреждений), в котором выполнена работа, город, страна. Обязательно следует указать, в каком учреждении работает каждый из авторов. Авторам рекомендуется предоставлять ссылку на свой цифровой профиль в ORCID.

При наличии четырех и более авторов необходимо указать творческий вклад

каждого в написание статьи.

Резюме к статье должно иметь следующую структуру (объем текста авторского резюме не должно превышать 500 слов):

- Актуальность
 - * Цель
 - * Материалы и методы
 - * Результаты
 - * Обсуждение
 - * Заключение
- (* - обязательные рубрики)

Подзаголовки резюме выделяются жирным шрифтом. Для обзорных статей строгая структура резюме не обязательна.

После резюме указываются ключевые слова (при выборе ключевых слов рекомендуется руководствоваться словарем ключевых слов MeSH) и данные контактного автора (e-mail для обратной связи).

Текст оригинальной статьи должен иметь следующие разделы: актуальность, цель, материалы и методы, результаты, обсуждение, заключение, список литературы.

Текст случаев из практики должен иметь следующие разделы: актуальность, данные истории болезни, данные клинического, лабораторного и лучевого обследования пациента, обсуждение полученных результатов, заключение, список литературы.

Разделы статьи, которые представляются **на русском и английском языках:**

- Титульная часть
- Резюме
- Ключевые слова
- Подписуемые подписи
- Список литературы

Требования к оформлению подписуемых подписей.

После каждого рисунка необходимо предоставлять подписуемые подписи на русском и английском языках. Необходимо соблюдать общий план описания: указать вид рисунка (схема, диаграмма, фотография, рентгенограмма, эхограмма и т.д.), при описании диагностических изображений необходимо указать метод исследования, проекции/режим реконструкции/методику исследования, область исследования, подробное описание изображения, при необходимости, с указаниями на рисунке стрелками или другими обозначениями.

В случае использования в статье, в том числе в рисунках и подписуемых подписях, информации, которая была ранее опубликована, автор обязан указать источник и автора цитируемой информации.

Список литературы (на русском и английском языках) составляют по правилам оформления пристатейных списков литературы (библиография) для авторов с учетом «Единых требований к рукописям, представляемым в биомедицинские журналы» Международного комитета редакторов медицинских журналов (Uniform Requirements for Manuscripts Submitted to Biomedical Journals). Биб-

лиографические ссылки должны быть пронумерованы, в тексте они даются в квадратных скобках. Ссылки указываются в порядке упоминания в тексте статьи.

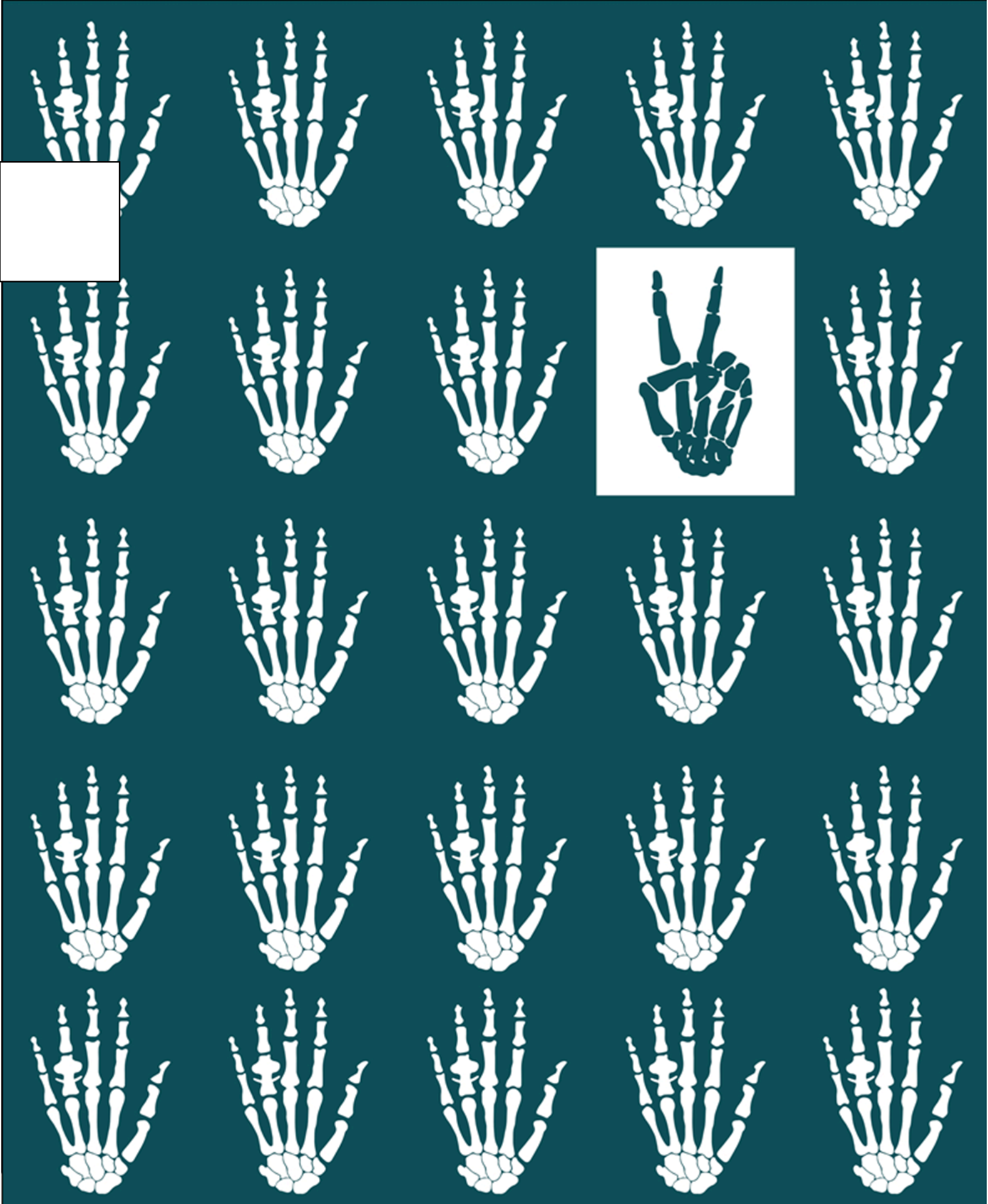
Автор полностью берет на себя ответственность за возможный плагиат текста, рисунков и др. Любое нарушение авторских прав будет рассмотрено согласно алгоритму COPE. При рассмотрении полученных авторских материалов Редакция руководствуется «Едиными требованиями к рукописям, представляемым в биомедицинские журналы» (Intern. committee of medical journal editors. Uniform requirements for manuscripts submitted to biomedical journals //Ann. Intern. Med. 1997; 126: 36–47), принципами EASE и «Singapore Statement on Research Integrity».

Статьи, представленные с нарушением правил оформления, не рассматриваются.

Корректурa авторам не высылаeтся.

Редакция оставляет за собой право при необходимости проводить коррекцию и редактуру текста без уведомления авторов.

Авторы не имеют право представлять одну статью на публикацию в несколько научных изданий.



REJR

Том 16 №1 2026 год.