

УДК 616-073.756.8:611.714:001.8
DOI 10.31654/2786-8478-2024-BN-4-60-76

Кучменко О. Б.

доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри біології
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
kuchmeh@yahoo.com
orcid.org/0000-0002-3021-8583

Шейко В. І.

доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри біології
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
interlycin@ukr.net
orcid.org/0000-0001-7932-4478

Мхітарян Л. С.

доктор медичних наук, професор,
професор кафедри біології
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
laurasmkhitaryan@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2347-0107

Гавій В. М.

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
gaviyv@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2804-0456

**ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ
ТОМОГРАФІЇ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧЕРЕПА ЛЮДИНИ**

У статті проаналізовано та узагальнено сучасні дослідження щодо застосування магнітно-резонансної томографії для краніометричного (цефалометричного) аналізу, щоб визначити ключові аспекти в оцінюванні її ефективності. У першій половині 2000-х рр. дослідники зосередилися на вивченні базових можливостей МРТ для краніометрії, встановивши її здатність надійно визначати класичні краніометричні точки та шви. Важливим етапом стало представлення нової послідовності МРТ «Чорна кістка» як неіонізуючої альтернативи КТ для тривимірної цефалометрії. У пізніх 2010-х – ранніх 2020-х рр. було досягнуто значного прогресу в оцінці МРТ для краніометрії. Порівняння МРТ з боковими цефалометричними рентгенограмами (БЦР) не виявило значущих відмінностей між вимірюваннями, підтвердивши можливість точної цефалометрії за допомогою МРТ без використання іонізуючого випромінювання. Дослідження А. Юершотта й колег продемонструвало високу геометричну точність і відтворюваність цефалометричних вимірювань на основі МРТ при 3 Тесла, підкресливши потенціал МРТ для точного 3D цефалометричного аналізу. МРТ показала низку переваг порівняно з традиційними методами, зокрема можливість отримувати додаткову інформацію про м'які тканини. Метод дає змогу вивчати вікові зміни об'єму та форми мозку, зміни товщини диплоє й розмірів черепа. Розширюється клінічне застосування МРТ в краніометрії, включаючи вивчення впливу статі, раси й краніометричних показників на велофарингеальну анатомію та планування ортодонтичного лікування. Перспективними напрямками розвитку є

метод UTE MRT та методи 3D цефалометричних вимірювань, засновані виключно на MRT. Ефективність і точність вимірювань зростає завдяки автоматизації аналізу MRT-зображень. Загалом MRT визнано надійною альтернативою рентгєнівським методам, особливо для повторних обстежень молодих пацієнтів. Проте необхідно оптимізувати протоколи та знижувати вартість MRT для широкого клінічного впровадження в краніометрії. Очікується, що роль MRT в краніометрії зростатиме завдяки розвитку технологій і методів аналізу, відкриваючи нові можливості для діагностики та планування лікування в різних галузях медицини.

Ключові слова: краніометрія, череп, морфологія та анатомія, адаптаційна морфологія, магнітно-резонансна томографія, цефалометрія.

Постановка проблеми. Основи ядерного магнітного резонансу заклали Ф. Блох та Е. Пурселл 1946 р., за що отримали Нобелівську премію з фізики 1952 р. Дослідження живих тканин розроблялись у 1950–1960-х рр., зокрема в роботах Е. Одеблада. Ключовим моментом стало впровадження в працях П. Лаутербура просторового кодування за допомогою градієнтів магнітного поля 1971 р., що відкрило шлях до отримання зображень. У 1980-х рр. було розроблено швидкі методи сканування та розпочалося клінічне застосування магнітно-резонансної томографії (MRT) [20]. Огляд розробок, спрямованих на застосування MRT для анатомо-морфологічних та функціонально-морфологічних досліджень, зокрема краніометричних (цефалометричних) досліджень допоможе систематизувати наявні знання визначити перспективні напрямки для подальших наукових робіт у цій галузі, що, в свою чергу, сприятиме вдосконаленню методів діагностики та лікування, а також розширенню розуміння анатомо-функціональних особливостей людського організму.

Аналіз попередніх досліджень. С. Вайд, А. Чандоркар, А. Атре, Д. Шах, Н. Вайд у статті про останні досягнення MRT голови та шиї, основи черепа й черепних нервів лише побіжно згадали про наявність методу MRT «Чорна кістка», який може бути застосований для цефалометрії [24]. М. Ашїрдізер, І. К. Сари Карабаг у огляді літератури про історичний розвиток морфологічних та анатомічних досліджень кісток черепа, а саме їх товщини та можливість застосовувати ці дані в судовій медицині, зокрема посилався на науковий доробок Х. Г. Хатіпоглу зі співавторами, присвячену зв'язку між товщиною диплоє черепа, краніометричними вимірюваннями й статтю, віком та індексом маси тіла людини (антропологічними індексами) [2]. Сенні-малай, М. Селварадж, О. П. Харбанда, Д. Кандасамі, К. Мохайдін проаналізували сучасний стан та перспективи MRT-цефалометрії. Автори дійшли висновку, що MRT-цефалометрія є перспективним методом для вивчення анатомо-функціональних та морфо-адаптаційних характеристик людського організму, зокрема області тіла голови (череп), але потребує подальших досліджень для оптимізації MRT-протоколів та ширшого впровадження методу в ортодонтичну практику [22].

Мета роботи: проаналізувати та узагальнити сучасні дослідження щодо застосування магнітно-резонансної томографії для краніометричного (цефалометричного) аналізу, щоб визначити ключові аспекти в оцінюванні її ефективності.

Виклад основного матеріалу. Т. Еврар, Ф. Коттон, Ф. Дюран-Дюбьєсф, К. Паше, М. Кюшера, Ф. Рамірес-Роцці, А. Бонмартен, А.-М. Гійар-Коста, В.-А. Чан Мін, Б. Валле, Ж.-К. Фроман комплексно дослідили розвиток черепного склепіння та мозкової паренхіми з віком, використовуючи MRT. Вони проаналізували MRT-зображення 126 здорових пацієнтів (61 жінка і 65 чоловіків) від 20 до 80 років, використовуючи MRT-сканер Intera 1,5 T (Philips Medical System). При цьому вимірювали різні параметри черепного склепіння: довжину (глабела-опістокраніон), ширину (еуріон-еуріон), висоту (базіон-вертекс), а також ширину третього шлуночка в площині передньої та задньої спайок (CA-CP). Було встановлено середні показники цих

вимірів, а також те, що розміри черепного склепіння (довжина, ширина, висота) залишаються стабільними протягом усього дорослого життя, не змінюючись значно від 20 до 80 років. Чоловіки мали більші розміри черепного склепіння, але ця різниця не була значущою після нормалізації за зростом. Дослідники запропонували індекс черепного склепіння, розрахований як (довжина + ширина + висота) / 3. Цей індекс корелює з ростом людини ($r = 0,64$) і має дуже низьку міжіндивідуальну варіабельність (стандартне відхилення < 4 мм). Середнє значення індексу становило $155,8 \pm 4,9$ мм. Натомість ширина третього шлуночка, яка є показником атрофії мозку, збільшується експоненціально з віком (коефіцієнт кореляції 0,79). На основі цих результатів, дослідники запропонували використовувати стабільні розміри черепного склепіння як базу для нормалізації вимірювань мозкової паренхіми, що зменшується з віком [3]. Це дослідження з використанням краніометрії надало важливі дані для розуміння вікових змін мозку та запропонувало новий підхід до нормалізації нейровізуалізаційних вимірювань.

Т. Еврар, Ф. Коттон, Ф. Рамірес-Роцці, А.-М. Гійар-Коста, В.-А. Чан Мінь, Б. Валле, Ж.-К. Фроман дослідили можливість використання магнітно-резонансної томографії (МРТ) для визначення краніометричних точок, черепних швів та відповідних відстаней. Автори провели проспективне дослідження з використанням МРТ-последовательностей SET2 та 3DFFE з товщиною зрізу 1 мм на контрольній групі з 126 дорослих від 20 до 80 років. Вони зосередилися на визначенні таких краніометричних точок: еуріон, опістокраніон, базіон, вертекс і глабела, а також коронального, лямбдоподібного й сагітального швів. Автори також провели кореляційне дослідження краніометричних відстаней на 5 сухих черепах, порівнюючи вимірювання, отримані за допомогою компаса й/або штангенциркуля, з вимірюваннями МРТ. Дослідники встановили, що черепні шви були видимі у 125 з 126 випадків, з'являючись як гіпоінтенсивні смуги на всіх послідовностях, особливо чітко на товстих зрізах. Краніометричні точки було успішно визначено в усіх пацієнтів. Техніка вимірювання відстаней склепіння черепа виявилася надійною та відтворюваною ($r = 0,9$). Тож було зроблено висновок, що МРТ головного мозку дає змогу надійно визначати класичні краніометричні точки та шви, що створює передумови для подальшого вивчення розмірів склепіння черепа [7]. Це дослідження надало важливі дані для розуміння можливостей МРТ у визначенні краніометричних точок та швів, а також запропонувало новий підхід до точного вимірювання розмірів черепного склепіння та його змін із віком.

Ф. Коттон, Ф. Рамірес-Роцці, Б. Валле, С. Паше, М. Ерм'є, А.-М. Гійар-Коста, Ж.-К. Фроман провели дослідження, щоб оцінити можливості використання МРТ у визначенні черепних швів, краніометричних точок і вимірювань. Вони проаналізували 150 МРТ-досліджень головного мозку здорових людей віком 20–49 років із європеїдної популяції, а також додатково вивчили 498 сухих черепів за допомогою дигітайзера для порівняння результатів. Для перевірки точності МРТ-методу автори додатково виміряли чотири сухих черепа за допомогою МРТ, циркуля та цифрового штангенциркуля. Дослідники встановили, що черепні шви на МРТ завжди проявляються як темні лінії, незалежно від використаної послідовності. Оптимальна візуалізація досягається при товщині зрізу 5 мм. Усі 11 досліджуваних краніометричних точок можна ідентифікувати на МРТ, хоча деякі з них (поріон, підочноямкову) виявити складніше. Вимірювання, отримані за допомогою МРТ, виявилися подібними до класичних антропометричних даних. Також було визначено середні значення основних вимірів (висота від вертекса до базіона; ширина між еуріонами; довжина від глабели до опістокраніона) й те, що на серединному T1-зваженому сагітальному зображенні можна визначити всі медіанні краніометричні орієнтири та розрахувати ключові вимірювання. Загалом результати МРТ-вимірювань добре узгоджувалися з даними, отриманими іншими методами, що, на думку авторів, відкриває нові можливості для антропологічних і медичних досліджень, даючи змогу проводити

краніометричний аналіз неінвазивним методом на живих суб'єктах [4]. Підсумовуючи, Ф. Коттон зі співавторами довели, що стандартне МРТ-дослідження головного мозку дає можливість достовірно оцінювати краніометричні точки та вимірювання.

Х. Г. Хатіпоглу, Х. Н. Озджан, У. С. Хатіпоглу та Е. Юксель провели комплексне дослідження, щоб оцінити зв'язок між товщиною диплое черепа, краніометричними вимірюваннями й такими характеристиками особи як стать, вік та індекс маси тіла (ІМТ). Автори дослідили МРТ-знімки 107 осіб (59 жінок і 48 чоловіків) від 21 до 81 року (середній вік $45,05 \pm 15,28$ років) з середнім ІМТ $25,51 \pm 4,44$. Вони вимірювали товщину диплое в ділянках глабели, брегми, лямбди, опістокраніону й еуріону, а також визначали довжини глабела-опістокраніон, вертекс-базіон, еуріон-еуріон та базіон-опістіон. У результаті дослідження було встановлено статистично значущу лінійну кореляцію між віком і товщиною диплое в усіх досліджуваних ділянках черепа й кореляцію між ІМТ та довжиною базіон-опістіон; статевий диморфізм у всіх краніометричних даних, включаючи відстані між ключовими точками черепа та його об'єм. Також виявлено було і зв'язок між товщиною диплое в різних точках склепіння черепа та можливість використання стандартного МРТ-дослідження головного мозку для отримання антропологічних орієнтирів і краніометричних даних. Загалом автори дійшли висновку, що на основі товщини диплое й краніометричних даних можливо визначити вік, стать та індекс маси тіла особи [9]. Це дослідження є дуже значущим як для судової медицини, так і для антропології, особливо у випадках ідентифікації людських останків або при аналізі черепно-мозкових травм.

Р. К. Ваннуччі, Т. Ф. Баррон, Д. Лерро, С. К. Антон та С. Дж. Ваннуччі, використовуючи МРТ, комплексно дослідили вікові зміни об'єму та форми мозку в молодих людей. Вони вивчили 118 осіб віком від 1 тижня до 18,7 року, зібравши широкий спектр даних, включаючи вік, стать, вагу, зріст, індекс маси тіла та окружність голови (ОФС). Дослідники провели по 20 краніометричних вимірювань для кожного учасника, завдяки чому визначили конкретні співвідношення та простежили статеві й вікові зміни форми та розміру мозку. Ключовим відкриттям стало те, що окружність голови сучасних дітей у середньому на 3,4% більша, ніж 40 років тому. Науковці припустили, що це пов'язано з загальним зростанням статури населення. Також виявили, що найбільш значні зміни об'єму та форми мозку відбуваються у віці немовляти. Важливо, що було встановлено існування статевого диморфізму як в об'ємі, так і в формі мозку та різної динаміки розвитку різних частин мозку. Автори також виявили, що конкретні краніометричні вимірювання точно віддзеркалюють зміни форми та розміру мозку з віком. Автори висловили сподівання, що їхня робота стане основою для досліджень розвитку мозку не лише в сучасних, але й у давніх популяціях [25]. Дослідження надало цінну базу даних краніометричних вимірювань сучасних немовлят, дітей, що відкриває нові можливості для вивчення еволюції та онтогенезу людського мозку.

В. Сабанджіоглуларі, М. І. Кошар, І. Шалк, Ф. Х. Ерділ, І. Озтопрак та М. Чімен, використовуючи МРТ, всебічно дослідили товщину диплое та розміри черепа в середньоанатолійській популяції. Вони проаналізували МР-зображення 305 пацієнтів (188 жінок і 117 чоловіків) від 4 до 90 років, середній вік яких становив $40,98 \pm 20,44$ років. Дослідники вимірювали товщину диплое в шести точках: середньо-лобова, передня й задня брегма, лямбда, опістокраніон та еуріон. Для визначення об'єму черепа вони вимірювали вісім відстаней між ключовими краніометричними точками. Зрештою, було виявлено статистично значущу позитивну кореляцію між віком і товщиною диплое в усіх точках вимірювання. Товщина диплое зростала з віком, особливо після 61 року. В досліджуваних обох статей товщина диплое в тім'яних кістках була меншою, ніж у лобових і потиличних. Череп у чоловіків виявився більшим за всіма краніометричними показниками. Відстань між глабелою й опістокраніоном зростала з віком в осіб обох статей, але висота базіон-вертекс зменшувалась у жінок із 61 року. Статистично значущої різниці між віковими групами за

максимальною шириною черепа виявлено не було, натомість довжина великого потиличного отвору зменшувалася з віком як у чоловіків, так і у жінок. Автори підкреслили, що ці результати можуть бути корисними для визначення статі та віку в судовій медицині, а також для планування хірургічних втручань на черепі та вибору кісткового трансплантата [21], що є цілком обґрунтовано. Це дослідження суттєво поглибило розуміння вікових змін товщини диплоє й розмірів черепа в середньоанатолійській популяції, а також містить важливі практичні пропозиції для судової медицини й хірургічного планування, зокрема для вибору кісткових трансплантатів.

К. А. Ілі, А. Г. Макінтайр, С. Р. Ватт-Сміт та С. Дж. Голдінг дослідили новий метод МРТ під назвою «Чорна кістка» для візуалізації черепно-лицьового скелета і встановили його потенціал у зниженні впливу іонізивного випромінювання. Вони розробили низькокутову градієнтну ехо-послідовність МРТ, яка забезпечує високий контраст між кістковою тканиною й м'якими тканинами, але зменшує контраст між окремими м'якими тканинами. Точність вимірювань за допомогою цієї послідовності, підтверджена на фантомі, показала середню розбіжність лише 0,32 мм порівняно з прямими анатомічними вимірюваннями. Автори дійшли висновку, що МРТ «Чорна кістка» має потенціал замінити КТ-сканування при візуалізації лицьового скелета, особливо для діагностики доброякісних станів у молодих пацієнтів, тим самим зменшуючи вплив радіації [5]. Наступного року ті самі автори представили метод МРТ «Чорна кістка» для тривимірного цефалометричного аналізу. Їхньою метою було знайти неіонізивну альтернативу КТ для цефалометрії. Методологія дослідження включала: отримання зображень «Чорної кістки», T1 та T2 зважених спін-ехо зображень у восьми пацієнтів; порівняння вимірювань на МРТ-зображеннях з бічними цефалограмами; оцінку простоти ідентифікації орієнтирів за десятибальною шкалою. Як було встановлено, візуалізація «Чорної кістки» перевершила зважену T1 і T2 візуалізацію щодо ідентифікації цефалометричних орієнтирів. На зважених T2 зображеннях деякі середньосагітальні цефалометричні орієнтири не можна було чітко ідентифікувати. Вимірювання на «Чорній кістці» показали найменшу розбіжність порівняно з бічною цефалограмою (1–2 мм). Розбіжності між вимірюваннями на МРТ й бічній цефалограмі частково пояснюються неточностями самої бічної цефалограми. Автори дійшли висновку, що МРТ «Чорна кістка» – це покращений метод ідентифікації цефалометричних орієнтирів порівняно зі звичайними послідовностями МРТ й може стати потенційною неіонізивною альтернативою КТ для тривимірної цефалометрії [6]. Отже, було обґрунтовано переваги послідовності МРТ «Чорна кістка» порівняно з традиційними T1 і T2-зваженими зображеннями для цефалометрії.

І. Горбенко, К. Миколайчик, І. Яровий, Т. Кубік і К. Калужинський розробили новий автоматичний метод визначення краніометричних орієнтирів та вимірювання товщини м'яких тканин на основі МРТ-даних. Їхній метод базується на нежорсткій реєстрації цільового зображення до шаблону. Методологія дослідження включала: створення трьох шаблонів МРТ для різних діапазонів індексу маси тіла; визначення 20 пар орієнтирів на черепі й на поверхні обличчя для кожного шаблону; валідацію методу на 18 МРТ-зображеннях дорослих жінок європеїдної раси з ІМТ в діапазоні 20–25 кг/м². Автори довели, що їхній метод дає змогу автоматично визначати 20 пар краніометричних орієнтирів на поверхні черепа та обличчя. Отримані значення товщини м'яких тканин виявилися близькими до результатів, отриманих ультразвуковим методом, також вдалося прискорити локалізацію краніометричних орієнтирів і мінімізувати вплив оператора, усуваючи похибки, пов'язані з контактом з суб'єктом або недостатніми вміннями оператора. Загалом автори підкреслили новизну свого методу, який виконує зворотне перетворення на наборі краніометричних точок, а не на поверхні шаблону обличчя, що відрізняє його від попередніх підходів до реконструкції обличчя [8]. Отже, було обґрунтовано переваги запропонованого методу порівняно з традиційним ультразвуковим.

Дж. Л. Перрі, Д. П. Кюн і Кс. Фанг комплексно дослідили вплив статі, раси та краніометричних показників на велофарингеальну анатомію. Вони вивчили 88 дорослих із трьох расових груп. Методологія включала використання високороздільного тривимірного МРТ-сканування для отримання точних зображень. Дослідники детально вимірювали м'яз-підіймач м'якого піднебіння, м'яке піднебіння та краніофациальні структури. Важливим аспектом їхнього підходу стало використання окружності голови як коваріати для контролю впливу загального розміру черепа на аналізи. Результати показали, що висота піднебіння, лінійна основа черепа, висота й ширина обличчя значно варіюються залежно від статі (в чоловіків значення більші, ніж у жінок). Значення лінійної основи, кут основи черепа та ширина обличчя значно варіювалися залежно від раси. Показники м'яза-підіймача, за винятком кутових, значно варіювалися залежно від статі, на відміну від раси. Довжина й товщина м'якого піднебіння значно варіювалися залежно від раси та статі. Це дослідження стало першим, яке вивчало вплив раси та статі на морфологію м'яза-підіймача [19], що робить його особливо цінним для розуміння анатомічних варіацій у різних популяціях. Також воно суттєво доповнює попередні праці з краніометрії.

А. Гайль, Е. Л. Гонсалес, Т. Гільгенфельд, М. Прагер, Й. Градль, А. Зоммер, М. Бендцус, С. Гайланд, К. Люкс і С. Цінглер дослідили МРТ для повного латерального цефалометричного аналізу та встановили її ефективність порівняно з традиційними боковими цефалометричними рентгенограмам (БЦР, «золотий стандарт»). Автори провели проспективне дослідження за участю 20 дітей та підлітків, яким було показане ортодонтичне лікування. Вони використали спеціально розроблену МРТ-методику з поверхневою котушкою та оптимізованою 3D-послідовністю. Отримані дані МРТ були трансформовані в бічну цефалограму за допомогою спеціального алгоритму сегментації. У ході дослідження вчені порівняли результати МРТ з БЦР за допомогою спеціалізованого ортодонтичного програмного забезпечення. Статистичний аналіз проводився з використанням двостороннього критерію суми рангів Вілкоксона та коефіцієнтів внутрішньокласової кореляції. Науковці не виявили значущих відмінностей між вимірюваннями за допомогою БЦР та МРТ для всіх відстаней та кутів, визначених на основі референтних точок. Окрім того, обидва методи продемонстрували відмінну міжекспертну та внутрішньоекспертну надійність. Тож було зроблено висновок, що представлений метод МРТ дає змогу проводити точну цефалометрію без значущих відмінностей від БЦР. Це відкриває можливість проведення латерального цефалометричного аналізу на основі МРТ, забезпечуючи короткий час дослідження без іонізувального випромінювання [11]. В роботі містяться важливі докази того, що МРТ може бути ефективною альтернативою традиційним БЦР для повного латерального цефалометричного аналізу.

А. Гайль, Е. Л. Гонсалес, Т. Гільгенфельд, Ф. Кіккінґередер, М. Бендцус, С. Гайланд, А.-К. Озга, А. Зоммер, К. Дж. Люкс та С. Цінглер провели проспективне дослідження, щоб оцінити, чи є МРТ еквівалентною БЦР у цефалометричному аналізі. Автори оптимізували методику МРТ для короткого часу сканування, високої роздільної здатності, високого контрасту та геометричної точності. Для дослідження вони використали 20 пацієнтів (середній вік \pm SD, 13,95 років \pm 5,34), яким перед ортодонтичним лікуванням провели МРТ та БЦР. Дослідники обробили МРТ-дані для отримання бокових цефалограм. Два незалежних спостерігача двічі провели цефалометричний аналіз для обох методів з інтервалом у 4 тижні. Автори ідентифікували 8 двосторонніх і 10 серединно-сагітальних орієнтирів та розрахували 24 широко використовувані вимірювання (14 кутів, 10 відстаней). Вони провели статистичний аналіз за допомогою внутрішньокласового коефіцієнта кореляції (ICC), аналізу Бленда-Альтмана та двох односторонніх тестів (TOST) у межах заздалегідь визначеного еквівалентного діапазону $\pm 2^\circ/\text{мм}$. Дослідники підтвердили геометричну точність методу МРТ за допомогою фантомних вимірювань. Вони встановили, що за винятком міжрізцевого кута ($p = 0,17$), всі вимірювання були статистично еквівалентними

($p < 0,05$), й дійшли висновку, про можливість планувати ортодонтичне лікування без радіаційного опромінення на основі МРТ. Автори також визначили, що високороздільні ізотропні набори даних МРТ можуть бути перетворені на бокові цефалограми, що дає змогу проводити надійні вимірювання, які застосовуються в ортодонтичній практиці, з високою узгодженістю з відповідними вимірюваннями на БЦР [10]. Тож було доведено, що МРТ може бути надійною альтернативою БЦР для цефалометричного аналізу в ортодонтичній практиці.

А. Юершотт, К. Фройдльсперґер, Д. Вебер, Й. М. Е. Йенде, М. А. Салім, С. Цінґлер, К. Й. Лукс, М. Бендцус, С. Гайланд, Т. Гільґенфельд провели ґрунтовне дослідження *in vivo*, щоб валідувати геометричну точність і відтворюваність цефалометричних вимірювань на основі орієнтирів з використанням високороздільної 3D МРТ при 3 Тесла. Спершу для валідації точності було проведено 96 кутових і 96 лінійних вимірювань на фантомі в 3 різних положеннях, що дало змогу оцінити точність вимірювань у контрольованих умовах. На етапі дослідження *in vivo* було проведено МРТ-сканування на 3 добровольцях у п'яти різних положеннях голови. Для кожного сканування визначено 27 орієнтирів (19 кутів і 26 відстаней), що дало змогу оцінити відтворюваність вимірювань у реальних умовах. У результаті всі МРТ-вимірювання фантома показали статистичну еквівалентність ($p < 0,001$) та відмінну узгодженість з еталонними значеннями. Цефалометричний аналіз *in vivo* був високо відтворюваним серед п'яти різних положень голови в усіх учасників дослідження, без статистичних відмінностей для всіх кутів і відстаней ($p > 0,05$). Діапазони між максимальними й мінімальними значеннями *in vivo* були послідовно меншими за 2° та 2 мм відповідно, що вказує на високу точність методу. Дослідники використовували 3D MSVAT-SPACE послідовність, оптимізовану для краніофасіальної МРТ. Важливо, що час сканування становив 7:01 хв., а загальний час обстеження – близько 10 хв., що робить метод практичним для клінічного застосування. Це дослідження демонструє, що МРТ дає змогу проводити точний і відтворюваний 3D цефалометричний аналіз без опромінення, що цінно для широкого клінічного застосування в ортодонції й щелепно-лицьовій хірургії, особливо для молодих пацієнтів, яким часто потрібні повторні обстеження. Орім того, завдяки відсутності іонізивного випромінювання відкривається перспектива вивчати здорових осіб для встановлення референтних значень, що може суттєво вплинути на розуміння нормальної анатомії та її варіацій [16]. Отже, це дослідження дуже важливе для оцінювання МРТ як надійного методу для 3D цефалометрії.

К. Масперо, А. Абате, Ф. Беллінчіоні, Д. Каваґнетто, В. Лантері, А. Коста й М. Фарронато, порівняли тривимірний цефалометричний аналіз, виконаний за допомогою 3 Т МРТ та конусно-променевого КТ. Це дослідження мало на меті оцінити, чи може МРТ забезпечити порівнянну якість інформації без радіаційного опромінення. Дослідження дало змогу виявити високий рівень узгодженості між вимірюваннями на КПКТ та відповідними вимірюваннями на 3 Т МРТ. Для всіх лінійних і кутових вимірювань статистично значущої різниці між двома методами відзначено не було. Натомість виявилось, що 3 Т МРТ забезпечує достатню точність та надійність для клінічних цілей, однак дещо менш продуктивна порівняно з КПКТ. Отже, МРТ показало потенціал стати альтернативою КПКТ для тривимірного цефалометричного аналізу. Результати підтверджують, що МРТ можна використовувати в ортодонції та щелепно-лицьовій хірургії для діагностики, планування лікування й моніторингу прогресу, адже так можна значно знизити кумулятивне радіаційне навантаження на пацієнтів, особливо при частих повторних обстеженнях. Однак, дослідники також підкреслили необхідність у подальших дослідженнях із більшими вибірками для підтвердження отриманих результатів у різних аспектах цефалометричного аналізу. Це, на думку авторів, має поглибити оцінки можливості використання МРТ замість КПКТ для 3D цефалометричного аналізу в клінічній практиці [18]. Робота є важливим кроком у розвитку неіонізивних методів діагностики

в ортодонції та щелепно-лицьовій хірургії. Вона демонструє потенціал МРТ як безпечної та ефективною альтернативи, відкриваючи нові можливості для покращення догляду за пацієнтами.

А. Юершотт, М. А. Салім, Т. Гільгенфельд, К. Фройдльсперґер, С. Цінґлер, К. Й. Лукс, М. Бендцус, С. Гайланд поглиблено оцінили надійність визначення 3D цефалометричних орієнтирів *in vivo* з використанням МРТ. Методологія дослідження була ретельно розроблена. В дослідженні за допомогою МРТ-апарата 3 Тесла взяли участь 16 пацієнтів ортодонтичного профілю, застосовувалася 3D послідовність з високою роздільною здатністю 0,5 мм. На кожному МРТ-скані було визначено 44 цефалометричних орієнтири. Аналіз проводили двічі два незалежні спостерігачі, що дало змогу оцінити як внутрішньо-, так і міжекспертну надійність. Внутрішньо- та міжекспертна узгодженість оцінювалася за допомогою середніх похибок вимірювань та внутрішньокласових коефіцієнтів кореляції (ВКК). Похибки вимірювань розраховувалися як евклідові відстані та відстані для координат x , y та z . В результаті 3D цефалометричні орієнтири на основі МРТ показали високу надійність, порівнянню з попередніми дослідженнями *in vivo* з використанням КПКТ/МСКТ. Внутрішньо- та міжекспертні ВКК вказали на відмінну узгодженість. Спостерігалися чіткі відмінності в надійності між різними орієнтирами, що добре відповідало специфічним формам орієнтирів. Тож МРТ дає змогу надійно визначати 3D цефалометричні орієнтири *in vivo*, з високою внутрішньо- та міжекспертною узгодженістю. Це відкриває шлях до використання МРТ для планування лікування та моніторингу в ортодонції та щелепно-лицьовій хірургії без радіаційного опромінення. Особливо важливо, що це дослідження підкреслює потенціал МРТ як безпечної альтернативи для пацієнтів, які потребують повторних цефалометричних аналізів, передусім для дітей та підлітків [14]. Ця робота надала суттєві докази того, що МРТ може надійно використовуватися для визначення 3D цефалометричних орієнтирів, що важливо при плануванні лікування й моніторингу в ортодонції та щелепно-лицьовій хірургії.

А. Юершотт, К. Фройдльсперґер, С. Цінґлер, М. А. Салім, Й. М. Е. Йенде, К. Й. Лукс, М. Бендцус, С. Гайланд, Т. Гільгенфельд порівняли 3D цефалометричний аналіз на основі МРТ та КПКТ. У їхньому дослідженні взяли участь 12 пацієнтів (8 чоловіків, 4 жінки; середній вік \pm стандартне відхилення 26,1 року \pm 6,6), яким провели 3D МРТ та КПКТ перед ортогнатичною операцією. Для кожного набору даних визначили 27 цефалометричних орієнтирів, на основі яких виміряли 17 кутів і 18 відстаней. 3D цефалометричний аналіз проводили двічі для кожної модальності два незалежні спостерігачі, що забезпечило надійність результатів. Статистичний аналіз включав обчислення евклідових відстаней, коефіцієнтів внутрішньокласової кореляції (ІСС), аналіз Бланда-Альтмана й тестування еквівалентності з використанням лінійної моделі змішаних ефектів. Важливо, що було встановлено попередньо визначену межу еквівалентності $\pm 1^\circ/1$ мм. Аналіз надійності для КПКТ проти МРТ показав високу узгодженість між методами. Евклідові відстані для орієнтирів були порівнянні між КПКТ та МРТ. ІСС для кутів та відстаней теж показали високу узгодженість між методами. Аналіз Бланда-Альтмана (як для кутів, так і для відстаней) продемонстрував високий рівень відповідності між КПКТ і МРТ. У лінійній моделі змішаних ефектів середні значення вимірювань КПКТ та МРТ були еквівалентні. На підставі цих результатів помітно, що МРТ може стати надійною неіонізивною альтернативою для планування й моніторингу лікування в ортодонції та щелепно-лицьовій хірургії, зберігаючи високу діагностичну точність порівняно з КПКТ [13]. Це дослідження засвідчило, що МРТ має діагностичну точність, необхідну для планування і моніторингу лікування в ортодонції та щелепно-лицьовій хірургії.

А. Т. П. Б. Сілва, Л. Т. П. Б. Сілва, А. Е. Н. Р. Віейра, С. І. Е. Мело, Ж. Ж. С. Насіменто, К. Ф. Мелу Жуніор, С. К. Васконселус і С. А. Араужу-Нету дослідили відтворюваність трьох ключових краніометричних параметрів на основі МРТ: кута каналу схилю (ССА), базального кута Велкера (WBA) та відстані від одонтоїдного виростка до

лінії Чемберлена (DOCL). Вони залучили до дослідження двох студентів-медиків і двох досвідчених радіологів, які вимірювали на МРТ-знімках черепи дорослих пацієнтів. Дослідники встановили середні значення для ССА, WBA і DOCL, які виявили надзвичайно високий рівень узгодженості вимірювань як для студентів після базової підготовки, так і для досвідчених радіологів. Інтракласовий коефіцієнт кореляції (ICC) для всіх параметрів свідчить про відмінну відтворюваність результатів. Автори також відзначили, що внутрішньоспостережувальна узгодженість була високою для всіх параметрів. Це дослідження показало, що вимірювання ССА, WBA та DOCL на МРТ мають високу відтворюваність незалежно від рівня досвіду спостерігачів. Автори дійшли висновку, що після базового навчання студенти можуть ефективно брати участь у краніометричному аналізі на основі МРТ без втрати якості чи точності вимірювань, що може зменшити залежність від висококваліфікованих спеціалістів у ситуаціях, коли необхідно швидко отримати точні діагностичні дані [23]. В цій роботі було продемонстровано, що МРТ є надійним інструментом краніометричного аналізу в клінічній практиці.

К. Абкай, Й. Гурфар, Й. Глокенгіссер, Й. Ульриці, Е. Гелль, М. К. Закс, П. Зааке, Г. Й. Менцель та М. Шламманн дослідили новий метод ультракороткого часу ехо (UTE) МРТ і встановили, що він є перспективною альтернативою рентгенівській цефалометрії без опромінення. Для дослідження автори використовували метод UTE МРТ та порівнювали результати з традиційними рентгенівськими знімками. Вони встановили, що UTE МРТ дає змогу отримати високоякісні зображення як твердих, так і м'яких тканин, придатні для цефалометричного аналізу. Автори також виявили, що точність та відтворюваність ідентифікації анатомічних орієнтирів на UTE МРТ-зображеннях порівнянна з традиційними рентгенівськими знімками. Дослідники встановили, що метод особливо перспективний для пацієнтів, які потребують частого обстеження або мають протипоказання до рентгенівського опромінення. Вони також виявили, що UTE МРТ забезпечує кращі контраст і візуалізацію структур порівняно зі звичайними МРТ-послідовностями завдяки коротшому часу ехо. Автори продемонстрували високу надійність вимірювань цефалометричних кутів та лінійних параметрів на основі UTE МРТ-зображень. Втім, дослідники зазначили, що широке клінічне застосування UTE МРТ в ортодонції потребує подальшого скорочення часу сканування й зниження вартості процедури [1]. Завдяки цій роботі було підтверджено, що метод UTE МРТ може стати ефективною неіонізивною альтернативою традиційній рентгенівській цефалометрії.

Ж. Чжан, Х. Лі, С. Чжао, Х. Квон, А. Вассу, Ф. Верглі та С. П. Бартлетт дослідили можливість використання МРТ для отримання 3D-зображень черепа людини як альтернативи КТ. Автори розробили метод МРТ з ультракоротким часом ехо (UTE), який використовує подвійний радіочастотний імпульс та подвійне ехо для селективної візуалізації кісткової тканини. Вони встановили, що ця техніка дає змогу отримати високоякісні 3D-зображення черепа за клінічно прийнятний час сканування (6 хв.), забезпечуючи чітку візуалізацію краніофасціальних кісткових структур. Важливою складовою дослідження була оцінка точності нової техніки МРТ за допомогою краніометричних вимірювань. Дослідники порівняли показники, отримані за допомогою МРТ, КТ та прямих вимірювань на кадаверному черепі. Було виміряно 8 анатомічних відстаней, включаючи максимальну довжину й ширину черепа, висоту орбіт, висоту грушоподібного отвору, відстань між виличними дугами, висоту нижньої щелепи та ширину верхньої щелепи. Порівняння вимірювань, отриманих за допомогою МРТ та КТ, показало середню абсолютну різницю 2 мм та середню відсоткову різницю 4,5%. Коефіцієнти узгодженості Ліна між вимірюваннями МРТ та КТ становили 0,999 та 0,992 для двох окремих зразків, що вказує на високу узгодженість між методами. У дослідженні на п'яти здорових дорослих добровольцях середня відсоткова різниця між вимірюваннями МРТ й КТ коливалася від 2,3% до 5,0%, а коефіцієнти конкордації Ліна – від 0,998 до 1,000. Автори також виявили, що метод

дає змогу візуалізувати черепні шви, особливо лямбдоподібний, хоча й з менш чітко, ніж КТ. Дослідники дійшли висновку, що метод показує хорошу надійність порівняно з КТ, але необхідні подальші дослідження для підвищення точності 3D-реконструкцій та оцінки методу для сканування педіатричних пацієнтів. Автори підкреслили, що розробка цього методу МРТ може стати важливим кроком у створенні безпечної альтернативи КТ для візуалізації кісткових структур черепа, особливо для дітей і пацієнтів, які потребують частих повторних обстежень [26]. У цій статті було показано, що метод UTE МРТ здатен забезпечити високоякісні 3D-зображення черепа, що робить його перспективною альтернативою КТ.

К. Мерц, Т. Чепура, Б. Плевіг, Д. Хаддад, Д. Вебер, М. Шмід, У. Гіршфельдер та Л. Гельц дослідили новий метод цефалометричного аналізу на основі МРТ-зображень без необхідності складної постобробки даних та встановили його ефективність порівняно з традиційним методом на основі бокових цефалограм. Автори використали три препарати голови трупів для дослідження. МРТ-сканування проводилося на 3T сканері з використанням спеціальної послідовності для орієнтації зображення. Дослідники розробили метод автоматичного вирівнювання МРТ-зображення відносно франкфуртської горизонталі для уникнення спотворень при вимірюваннях. П'ять експертів проводили цефалометричний аналіз як на МРТ-зображеннях, так і на традиційних бокових цефалограмах. Автори встановили високу міжекспертну надійність для обох методів та виявили, що середня різниця між вимірюваннями на МРТ та цефалограмах становила менше за 1°. Дослідники статистично підтвердили еквівалентність методів для 12 з 13 досліджуваних кутів. Вони також встановили, що МРТ-цефалометрія дає змогу уникнути опромінення пацієнта, що особливо важливо для дітей та підлітків, та має потенціал для використання в ортодонції, особливо для початкової й фінальної діагностики, а також для пацієнтів зі знімними ортодонтичними апаратами. Автори виявили основні обмеження методу, включаючи високу вартість МРТ, тривалий час сканування і неможливість застосування для пацієнтів з металевими конструкціями в ротовій порожнині. Дослідники дійшли висновку, що метод МРТ-цефалометрії показав клінічну порівнянність з традиційним методом та має потенціал для зменшення довічного ризику стохастичного радіаційного пошкодження у пацієнтів, але необхідні подальші дослідження для оптимізації МРТ-послідовностей та скорочення часу сканування [17]. Це дослідження дало змогу встановити, що метод МРТ-цефалометрії є клінічно порівняним з традиційним методом на основі бокових цефалограм, при цьому забезпечуючи переваги в ортодонції, особливо в контексті обстежень дітей і підлітків.

К. Е. Циммерман, П. Кханделвал, Л. Се, Х. Лі, Х. К. Сон, П. А. Юшкевич, А. Вассу, С. П. Бартлетт та Ф. В. Верглі дослідили автоматичний конвеєр сегментації мульти-атласу для використання на зображеннях черепного склепіння та оцінили узгодженість краніометричних вимірювань між 3D-рендерингами черепа на основі МРТ та КТ. Автори використали дані МРТ з послідовністю імпульсів Dual-RF, Dual-echo, 3D UTE, отримані на 3 T апараті у 30 здорових учасників, а також низькодозові зображення КТ, спеціально зроблені з грудня 2018 по січень 2020 рр. Дослідники об'єднали чотириточкові дані МРТ, щоб отримати вибіркові кісткові зображення, та використали автоматизовану сегментаційну систему з багатьма атласами. Дослідники визначили середні коефіцієнти подібності Dice й узгодженості Ліна (LCC), встановили, що вимірювання на основі МРТ відрізнялися від вимірювань на основі КТ на 0,73–1,2 мм для ключових краніометричних показників. Автори дійшли висновку, що досягли хорошої узгодженості між 3D-рендерингами черепного склепіння на основі КТ та автоматизованої МРТ, усуваючи трудомістку ручну сегментацію, що можна застосувати в черепно-лицьовій хірургії, а також для візуалізації травм, що зачіпають як кістки, так і м'які тканини [27]. Це дослідження довело, що автоматизована

сегментація з використанням мульти-атласу на основі МРТ відкриває нові порівняно з КТ можливості в клінічній практиці, зокрема черепно-лицьовій хірургії.

С. Цзян, Дж. Пей, Дж. Лю, С. Ляо та Ф. Цзя розробили новий метод 3D цефалометричних вимірювань, що базується виключно на МРТ, без використання КТ. Автори застосували технологію синтезу КТ-подібних зображень з МРТ-сканів за допомогою методу Double U-Net CycleGAN. Для реєстрації та злиття зображень дослідники програмне забезпечення 3D Slicer, що дало змогу провести точні вимірювання на синтезованих КТ-подібних зображеннях. Дослідники створили протокол для встановлення серединної сагітальної площини на основі МРТ, використовуючи методи, розроблені в нейронауках. Вони також розробили систему координат і референтну рамку, що базується виключно на МРТ-даних. Автори створили протокол цефалометричного аналізу, який поєднує переваги візуалізації м'яких і твердих тканин. Вони встановили, що метод має потенційне застосування для вивчення росту та розвитку черепно-лицьової ділянки, аналізу мальформацій, планування лікування та оцінки його результатів. Дослідники виявили такі переваги методу: відсутність іонізуючого випромінювання, повна інформація про м'які тканини, стандартизація встановлення серединної сагітальної площини. Однак, також, зазначили обмеження: протокол розроблено на основі даних лише одного добровольця, тож потрібна подальша валідація на більшій вибірці. Автори дійшли висновку, що в разі успішної валідації, цей метод може значно змінити підхід до цефалометричного аналізу в ортодонції, щелепно-лицьовій хірургії та інших суміжних галузях, пропонуючи безпечнішу та інформативнішу альтернативу наявним [12]. Ця робота свідчить про те, що новий метод 3D цефалометричних вимірювань, розроблений на основі МРТ без використання КТ, має великий потенціал у клінічній практиці, проте для підтвердження його ефективності потрібна валідація на більшій вибірці пацієнтів.

Висновки. Магнітно-резонансна томографія пройшла тривалий шлях впровадження в галузі краніометрії, демонструючи значний прогрес протягом останніх десятиліть. Ця еволюція почалася в першій половині 2000-х рр., коли дослідники зосередилися увагу на вивченні базових можливостей МРТ для краніометрії з метою використання в різних напрямках біології та медицини. Вони встановили, що МРТ дає змогу надійно визначати класичні краніометричні точки та шви, а також достовірно оцінювати анатомо-морфологічні вимірювання за допомогою стандартного МРТ-дослідження головного мозку. З часом дослідники почали активніше порівнювати МРТ з традиційними методами. Важливим кроком стало представлення 2012 р. нової послідовності МРТ «Чорна кістка» як потенційної неіонізуючої альтернативи КТ для тривимірної цефалометрії. Це відкрило нові перспективи для використання МРТ у морфо-функціональних дослідженнях та діагностичних характеристик органів, систем людського організму без ризику радіаційного опромінення. Наступний етап розвитку припав на 2010-ті – ранні 2020-ті рр., коли було досягнуто значного прогресу в оцінці МРТ для краніометрії з подальшим застосуванням результатів у різних напрямках біологічної, медичної науки та суміжних галузей знань. Було порівняно МРТ та бокові цефалометричні рентгенограми (БЦР), при чому не виявилось значущих відмінностей між вимірюваннями. Це дослідження підтвердило можливість точної цефалометрії за допомогою МРТ без використання іонізуючого випромінювання. Підтвердились і еквівалентність МРТ та БЦР для більшості цефалометричних вимірювань, що відкрило шлях до планування ортодонтичного лікування на основі МРТ. Важливий внесок у розвиток МРТ-краніометрії зробили А. Юершотт та колеги, які провели ґрунтовне дослідження *in vivo*. Вони продемонстрували високу геометричну точність і відтворюваність цефалометричних вимірювань на основі МРТ при 3 Тесла, підкресливши потенціал МРТ для точного і відтворюваного 3D цефалометричного аналізу без опромінення.

Дослідники знаходили все нові й нові аргументи на користь методу, оцінюючи надійність і точність МРТ. Вони відзначили, що дані, отримані за допомогою МРТ,

добре узгоджується з тим, які вдалося здобути традиційними методами бічної цефалометричної рентгенограми і конуснопроменевої комп'ютерної томограми, для цефалометричного аналізу. Окрім того, порівняно з традиційними методами МРТ продемонструвала низку переваг, зокрема можливість отримувати додаткову інформацію про м'які тканини. Було визначено, що інноваційні можливості МРТ в анатомії, морфології та функціональній фізіології не зводяться суто до вимірювань, адже метод дає змогу вивчати вікові зміни об'єму та форми мозку, зміни в кістковій тканині скелета області голови, товщини диплоє й розмірів черепа. Завдяки розробці автоматичних методів визначення краніометричних орієнтирів відкрилися нові перспективи ефективного аналізу даних.

Розширюється й клінічне застосування МРТ в краніометрії: метод використовують для визначення ступеня впливу статі, раси (етногеографічної популяції людства) й краніометричних показників та велофарингеальної анатомії. Завдяки високій відтворюваності результатів МРТ-краніометрії створює підґрунття для більш широкого застосування в науковій та медикобіологічній практиці.

Перспективними напрямками розвитку МРТ-краніометрії є зокрема метод UTE МРТ (МРТ з ультракоротким часом ехо) як альтернатива рентгенівській цефалометрії, а також методи 3D цефалометричних вимірювань, засновані виключно на МРТ. Ефективність і точність вимірювань зростає завдяки автоматизації аналізу МРТ-зображень.

Загалом, потенціал МРТ в краніометрії з часом оцінюють усе позитивніше. Від вивчення базових можливостей методу дослідники перейшли до його активного порівняння з традиційними техніками і, зрештою, визнали МРТ як надійну альтернативу рентгенівським методам, передусім завдяки відсутності іонізуючого випромінювання, що робить МРТ безпечною для повторних обстежень, особливо в молодих пацієнтів.

Втім, попри значний прогрес, автори визнають, що слід і надалі оптимізувати протоколи та знижувати вартість МРТ для її широкого клінічного впровадження. Проте можна очікувати, що роль МРТ в дослідженні індивідуальних, популяційних анатомо-фізіологічних особливостей, функціональних особливостей, зумовлених специфічністю морфології зростатиме завдяки неухильному розвитку технологій і методів аналізу.

Перспективною є систематизація праць, накопичених даних про використання методу МРТ, як в прикладних, так і фундаментальних дослідженнях, що створить основу для вирішення питань морфологічного, фізіолого-функціонального та діагностичного характеру.

Література

1. Abkai C., Hourfar J., Glockengieser J., Ulrici J., Hell E., Sachs M. C., Saake P., Mentzel H. J., Schlamann M. Ultra-Short Time to Echo (UTE) MRI for Cephalometric Analysis: Potential of an X-Ray Free Fast Cephalometric Projection Technique // Plos One. 2021. Vol. 16 (12). P. e0261964. DOI: 10.1371/journal.pone.0261964
2. Aşirdizer M., Sarı Karabağ İ. Historical Development of Skull Thickness Measurements and Usability of These Measurements in Forensic Medicine: A Traditional Literature Review // *Turkiye Klinikleri Journal of Forensic Sciences – Legal and Medical*. 2021. № 18 (3). P. 242–50.
3. Cotton F., Euvrard T., Durand-Dubief F., Pachai C., Cucherat M., Ramirez Rozzi F., Bonmartin A., Guihard-Costa A. M., Tran Minh V. A., Vallee B., Froment J. C. Évolution comparative de la voûte crânienne et du parenchyme cérébral avec l'âge : étude préliminaire en IRM // *Journal of Neuroradiology*. 2004. Vol. 31. P. 131–137.
4. Cotton F., Ramirez Rozzi F., Vallee B., Pachai C., Hermier M., Guihard-Costa A.-M., Froment J.-C. Cranial Sutures and Craniometric Points Detected on MRI // *Surgical and Radiologic Anatomy*. 2005. Vol. 27. P. 64–70. DOI: 10.1007/s00276-004-0283-6

5. Eley K. A., McIntyre A. G., Watt-Smith S. R., Golding S. J. «Black Bone» MRI: a Partial Flip Angle Technique for Radiation Reduction in Craniofacial Imaging // *British Journal of Radiology*. 2012. Vol. 85(1011). P. 272–278. DOI: 10.1259/bjr/95110289
6. Eley K. A., Watt-Smith S. R., Golding S. J. «Black Bone» MRI: a Potential Non-Ionizing Method for Three-Dimensional Cephalometric Analysis – a Preliminary Feasibility Study // *Dentomaxillofacial Radiology*. 2013. Vol. 42(8). P. 20130236. DOI: 10.1259/dmfr.20130236
7. Euvrard T., Cotton F., Ramirez-Rozzi F., Guillard-Costa A.-M., Tran Minh V.-A., Vallée B., Froment J.-C. Craniometrie: partie 1. Reperage des points de craniometrie, des sutures craniennes et des distances qui en decoulent, par IRM. Validation – etude de faisabilite // *Journal de Radiologie*. 2004. Vol. 85 (9). P. 1345–1346. DOI: 10.1016/S0221-0363(04)77120-6
8. Gorbenko I., Mikołajczyk K., Iarovyi I., Kubik T., Kałużyński K. A New Method of Automatic Craniometric Landmarks Definition and Soft Tissue Thickness Measurement Based on MRI Data // *Information Technologies in Biomedicine*. 2014. Vol. 3. P. 115–126.
9. Hatipoglu H. G., Ozcan H. N., Hatipoglu U. S., Yuksel E. Age, Sex and Body Mass Index in Relation to Calvarial Diploe Thickness and Craniometric Data on MRI // *Forensic Science International*. 2008. Vol. 182 (1–3). P. 46–51. DOI: 10.1016/j.forsciint.2008.09.014
10. Heil A., Gonzalez E. L., Hilgenfeld T., Kickingereeder P., Bendszus M., Heiland S., Ozga A.-K., Sommer A., Zingler S. Lateral Cephalometric Analysis for Radiographs: A Feasibility Study in Children and Adolescents // *PLoS One*. 2017. Vol. 12(3). P. e0174524. DOI: 10.1371/journal.pone.0174524
11. Heil A., Gonzalez E. L., Hilgenfel T., Prager M., Gradl J., Sommer A., Bendszus M., Heiland S., Lux C., Zingler S. MRT-basierte laterale Kephalmetrie vs. Fernrontgenseitenbildanalyse--Vergleich im Rahmen einer prospektiven Machbarkeitsstudie // *Clinical Neuroradiology*. 2016. Vol. 26 (S1). P. S50+.
12. Jiang X., Pei J., Liu J., Liao X., Jia F. An MRI-Only Three-Dimensional Cephalometry Protocol Based on the Integrated and Modular Architecture of the Human Head // *Current Notes of Medical Imaging*. 2023. Nov 6. DOI: 10.2174/0115734056258953231026094236
13. Juerchott A., Freudlsperger C., Weber D., Jende J. M. E., Saleem M. A., Zingler S., Lux C. J., Bendszus M., Heiland S., Hilgenfeld T. In Vivo Comparison of MRI- and CBCT-Based 3D Cephalometric Analysis: Beginning of a Non-Ionizing Diagnostic Era in Craniomaxillofacial Imaging? // *European Radiology*. 2020. Vol. 30. P. 1488–1497. DOI: 10.1007/s00330-019-06540-x
14. Juerchott A., Freudlsperger C., Zingler S., Saleem M. A., Jende J. M. E., Lux C. J., Bendszus M., Heiland S., Hilgenfeld T. In Vivo Reliability of 3D Cephalometric Landmark Determination on Magnetic Resonance Imaging: a Feasibility Study // *Clinical Oral Investigations*. 2020. Vol. 24. P. 1339–1349.
15. Juerchott A., Saleem M. A., Hilgenfeld T., Freudlsperger C., Zingler S., Lux C. J., Bendszus M., Heiland S. 3D Cephalometric Analysis Based on MRI Data: Initial Results and Reliability of Landmark Identification // *Orthodontics & Craniofacial Research*. 2020. Vol. 23(4). P. 256–262. DOI: 10.1111/ocr.12369
16. Juerchott A., Saleem M. A., Hilgenfeld T., Freudlsperger C., Zingler S., Lux C. J., Bendszus M., Heiland S. 3D Cephalometric Analysis Using Magnetic Resonance Imaging: Validation of Accuracy and Reproducibility // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8 (1). P. 13029. DOI: 10.1038/s41598-018-31384-8
17. März K., Chepura T., Plewig B., Haddad D., Weber D., Schmid M., Hirschfelder U., Gözl L. Cephalometry without Complex Dedicated Postprocessing in an Oriented Magnetic Resonance Imaging Dataset: a Pilot Study // *European Journal of Orthodontics*. 2021. Vol. 43 (6). P. 614–621.
18. Maspero C., Abate A., Bellincioni F., Cavagnetto D., Lanteri V., Costa A., Farronato M. Comparison of a Tridimensional Cephalometric Analysis Performed on 3T-MRI Compared with CBCT: a Pilot Study in Adults // *Progress in Orthodontics*. 2019. Vol. 20 (1). P. 40. DOI: 10.1186/s40510-019-0293-x
19. Perry J. L., Kuehn D. P., Fang X. Anthropometric Analysis of the Velopharynx and Related Craniometric Dimensions in Three Adult Populations Using MRI // *The Cleft Palate-Craniofacial Journal*. 2016. Vol. 53 (1). DOI: 10.1597/14-015

20. Rinck P. A. A Short History of Magnetic Resonance Imaging // *Spectroscopy Europe*. 2008. Vol. 20 (1). P. 7–9.
21. Sabancıoğulları V., Koşar M. İ., Şalk İ., Erdil F. H., Öztoprak İ., Çimen M. Diploe Thickness and Cranial Dimensions in Males and Females in Mid-Anatolian Population: An MRI study // *Forensic Science International*. 2012. Vol. 219 (1–3). P. 289.e1-289.e7. DOI: 10.1016/j.forsciint.2011.11.033
22. Sennimalai K., Selvaraj M., Kharbanda O. P., Kandasamy D., Mohaideen K. MRI-Based Cephalometrics: a Scoping Review of Current Insights and Future Perspectives // *Dentomaxillofacial Radiology*. 2023. Issue 52. P. 20230024.
23. Silva A. T. P. B., Silva L. T. P. B., Vieira A. E. N. R., Melo C. I. E., Nascimento J. J. C., Mello Júnior C. F., Vasconcelos S. C., Araújo-Neto S. A. Craniometric Parameters for the Evaluation of Platybasia and Basilar Invagination on Magnetic Resonance Imaging: a Reproducibility Study // *Radiologia Brasileira*. 2020. Vol. 53 (5). DOI: 10.1590/0100-3984.2019.0068
24. Vaid S., Chandorkar A., Atre A., Shah D., Vaid N. Recent Advances in MRI of the Head and Neck, Skull Base and Cranial Nerves: New and Evolving Sequences, Analyses and Clinical Applications // *British Journal of Radiology*. 2019. Vol. 92 (1104). P. 20190513. DOI: 10.1259/bjr.20190513
25. Vannucci R. C., Barron T. F., Lerro D., Antón S. C., Vannucci S. J. Craniometric Measures During Development using MRI // *NeuroImage*. 2011. Vol. 56(4). P. 1855–1864. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.03.044
26. Zhang R., Lee H., Zhao X., Kwon H., Vassough A., Wehrli F., Bartlett S. P. Bone-Selective MRI as a Nonradiative Alternative to CT for Craniofacial Imaging // *Original Investigation*. 2020. Vol. 27 (11). P. 1515–1522.
27. Zimmerman C. E., Khandelwal P., Xie L., Lee H., Song H. K., Yushkevich P. A., Vossough A., Bartlett S. P., Wehrli F. W. Automatic Segmentation of Bone Selective MR Images for Visualization and Craniometry of the Cranial Vault // *Academic Radiology*. 2022. Vol. 29 (Supplement 3). P. S98–S106. DOI: 10.1016/j.acra.2021.03.010

References

1. Abkai, C., Hourfar, J., Glockengießer, J., Ulrici, J., Hell, E., Sachs, M. C., Saake, P., Mentzel, H. J. & Schlamann, M. (2021). Ultra-Short Time to Echo (UTE) MRI for Cephalometric Analysis: Potential of an X-Ray Free Fast Cephalometric Projection Technique. *Plos One*, 16 (12), e0261964. DOI: 10.1371/journal.pone.0261964 [in English].
2. Aşirdizer, M. & Sarı Karabağ, İ. (2021). Historical Development of Skull Thickness Measurements and Usability of These Measurements in Forensic Medicine: A Traditional Literature Review. *Türkiye Klinikleri: Journal of Forensic Sciences – Legal and Medical*, 18 (3), 242–50 [in English].
3. Cotton, F., Euvrard, T., Durand-Dubief, F., Pachai, C., Cucherat, M., Ramirez Rozzi, F., Bonmartin, A., Guihard-Costa, A. M., Tran Minh, V. A., Vallee, B. & Froment, J. C. (2004). Évolution comparative de la voûte crânienne et du parenchyme cérébral avec l'âge: étude préliminaire en IRM [Comparative Evolution of the Cranial Vault and Cerebral Parenchyma with Age: A Preliminary MRI Study]. *Journal of Neuroradiology*, 31, 131–137 [in French].
4. Cotton, F. & Ramirez Rozzi, F. & Vallee, B., Pachai, C., Hermier, M., Guihard-Costa, A.-M., Froment, J.-C. (2005). Cranial Sutures and Craniometric Points Detected on MRI. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 27, 64–70. DOI: 10.1007/s00276-004-0283-6 [in English].
5. Eley, K. A., McIntyre, A. G., Watt-Smith, S. R. & Golding, S. J. (2012). «Black Bone» MRI: a Partial Flip Angle Technique for Radiation Reduction in Craniofacial Imaging. *British Journal of Radiology*, 85 (1011), 272–278. DOI: 10.1259/bjr/95110289 [in English].
6. Eley, K. A., Watt-Smith, S. R. & Golding, S. J. (2013). «Black Bone» MRI: a Potential Non-Ionizing Method for Three-Dimensional Cephalometric Analysis – a Preliminary Feasibility Study. *Dentomaxillofacial Radiology*, 42 (8), 20130236. DOI: 10.1259/dmfr.20130236 [in English].
7. Euvrard, T. Cotton, F., Ramirez-Rozzi, F., Guillard-Costa, A.-M., Tran Minh, V.-A., Vallée, B. & Froment, J.-C. (2004). Craniometrie: partie 1. Reperage des points de craniometrie, des sutures craniennes et des distances qui en decoulent, par IRM. Validation – etude de

faisabilite [Cranioimetry: Part 1. Localization of Cranioimetric Points, Cranial Sutures and the Resulting Distances, by MRI. Validation – Feasibility Study]. *Journal de Radiologie*, 85 (9), 1345–1346. DOI: 10.1016/S0221-0363(04)77120-6 [in French].

8. Gorbenko, I. Mikołajczyk, K., Iarovy, I., Kubik, T. & Kalużyński, K. (2014). A New Method of Automatic Cranioimetric Landmarks Definition and Soft Tissue Thickness Measurement Based on MRI Data. *Information Technologies in Biomedicine*, 3, 115–126 [in English].

9. Hatipoglu, H. G., Ozcan, H. N., Hatipoglu, U. S. & Yuksel, E. (2008). Age, Sex and Body Mass Index in Relation to Calvarial Diploe Thickness and Cranioimetric Data on MRI. *Forensic Science International*, 182 (1–3), 46–51. DOI: 10.1016/j.forsciint.2008.09.014 [in English].

10. Heil, A. Gonzalez, E. L. Hilgenfeld, T., Kickingereeder, P., Bendszus, M., Heiland, S., Ozga, A.-K., Sommer, A. & Zingler, S. (2017). Lateral Cephalometric Analysis for Radiographs: A Feasibility Study in Children and Adolescents. *PLoS One*, 12 (3), e0174524. DOI: 10.1371/journal.pone.0174524 [in English].

11. Heil, A. Gonzalez, E. L. Hilgenfeld, T., Prager, M., Gradl, J., Sommer, A., Bendszus, M., Heiland, S., Lux, C. & Zingler, S. (2016). MRT-basierte laterale Kephalmetrie vs. Fernrontgenseitenbildanalyse–Vergleich im Rahmen einer prospektiven Machbarkeitsstudie [MRI-based Lateral Cephalometry vs. Lateral Cephalometric Radiograph Analysis – Comparison in the Context of a Prospective Feasibility Study]. *Clinical Neuroradiology*, 26 (S1), S50+ [in German].

12. Jiang, X. & Pei, J. & Liu, J., Liao, X., Jia, F. (2023). An MRI-Only Three-Dimensional Cephalometry Protocol Based on the Integrated and Modular Architecture of the Human Head. *Current Medical Imaging*. DOI: 10.2174/0115734056258953231026094236 [in English].

13. Juerchott, A. Freudsperger, C. Weber, D., Jende, J. M. E., Saleem, M. A., Zingler, S., Lux, C. J., Bendszus, M., Heiland, S. & Hilgenfeld, T. (2020). In Vivo Comparison of MRI- and CBCT-Based 3D Cephalometric Analysis: Beginning of a Non-Ionizing Diagnostic Era in Craniomaxillofacial Imaging? *European Radiology*, 30, 1488–1497. DOI: 10.1007/s00330-019-06540-x [in English].

14. Juerchott, A., Freudsperger, C., Zingler, S., Saleem, M. A., Jende, J. M. E., Lux, C. J., Bendszus, M., Heiland, S. & Hilgenfeld, T. (2020). In Vivo Reliability of 3D Cephalometric Landmark Determination on Magnetic Resonance Imaging: a Feasibility Study. *Clinical Oral Investigations*, 24, 1339–1349 [in English].

15. Juerchott, A., Saleem, M. A., Hilgenfeld, T., Freudsperger, C., Zingler, S., Lux, C. J., Bendszus, M. & Heiland, S. (2020). 3D Cephalometric Analysis Based on MRI Data: Initial Results and Reliability of Landmark Identification. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 23 (4), 256–262. DOI: 10.1111/ocr.12369 [in English].

16. Juerchott, A., Saleem, M. A., Hilgenfeld, T., Freudsperger, C., Zingler, S., Lux, C. J., Bendszus, M. & Heiland, S. (2018). 3D Cephalometric Analysis Using Magnetic Resonance Imaging: Validation of Accuracy and Reproducibility. *Scientific Reports*, 8 (1), 13029. DOI: 10.1038/s41598-018-31384-8 [in English].

17. März, K., Chepura, T., Plewig, B., Haddad, D., Weber, D., Schmid, M., Hirschfelder, U. & Gözl, L. (2021). Cephalometry without Complex Dedicated Postprocessing in an Oriented Magnetic Resonance Imaging Dataset: a Pilot Study. *European Journal of Orthodontics*, 43 (6), 614–621 [in English].

18. Maspero, C., Abate, A., Bellincioni, F., Cavagnetto, D., Lanteri, V., Costa, A. & Farronato, M. (2019). Comparison of a Tridimensional Cephalometric Analysis Performed on 3T-MRI Compared with CBCT: a Pilot Study in Adults. *Progress in Orthodontics*, 20 (1), 40. DOI: 10.1186/s40510-019-0293-x [in English].

19. Perry, J. L., Kuehn, D. P. & Fang, X. (2016). Anthropometric Analysis of the Velopharynx and Related Cranioimetric Dimensions in Three Adult Populations Using MRI. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 53 (1). DOI: 10.1597/14-015 [in English].

20. Rinck, P. A. (2008). A Short History of Magnetic Resonance Imaging. *Spectroscopy Europe*, 20 (1), 7–9 [in English].

21. Sabancıoğulları, V., Koşar, M. İ., Şalk, İ., Erdil, F. H., Öztoprak, İ. & Çimen, M. (2012). Diploe Thickness and Cranial Dimensions in Males and Females in Mid-Anatolian Population:

An MRI study. *Forensic Science International*, 219 (1–3), 289.e1-289.e7. DOI: 10.1016/j.forsciint.2011.11.033 [in English].

22. Sennimalai, K., Selvaraj, M., Kharbanda, O. P., Kandasamy D. & Mohaideen, K. (2023). MRI-Based Cephalometrics: a Scoping Review of Current Insights and Future Perspectives. *Dentomaxillofaciliar Radiology*, 52, 20230024 [in English].

23. Silva, A. T. P. B., Silva, L. T. P. B., Vieira, A. E. N. R., Melo, C. I. E., Nascimento, J. J. C., Mello Júnior, C. F., Vasconcelos, S. C. & Araújo-Neto, S. A. (2020). Craniometric Parameters for the Evaluation of Platybasia and Basilar Invagination on Magnetic Resonance Imaging: a Reproducibility Study. *Radiologia Brasileira*, 53 (5). DOI: 10.1590/0100-3984.2019.0068 [in English].

24. Vaid, S., Chandorkar, A., Atre, A., Shah, D. & Vaid, N. (2019). Recent Advances in MRI of the Head and Neck, Skull Base and Cranial Nerves: New and Evolving Sequences, Analyses and Clinical Applications. *British Journal of Radiology*, 92 (1104), 20190513. DOI: 10.1259/bjr.20190513 [in English].

25. Vannucci, R. C., Barron, T. F., Lerro, D., Antón, S. C. & Vannucci, S. J. (2011). Craniometric Measures During Development using MRI. *NeuroImage*, 56 (4), 1855–1864. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.03.044 [in English].

26. Zhang, R., Lee, H., Zhao, X., Kwon, H., Vassough, A., Wehrl, F. & Bartlett, S. P. (2020). Bone-Selective MRI as a Nonradiative Alternative to CT for Craniofacial Imaging. *Original Investigation*, 27 (11), 1515–1522 [in English].

27. Zimmerman, C. E., Khandelwal, P., Xie, L., Lee, H., Song, H. K., Yushkevich, P. A., Vossough, A., Bartlett, S. P. & Wehrl, F. W. (2022). Automatic Segmentation of Bone Selective MR Images for Visualization and Craniometry of the Cranial Vault. *Academic Radiology*, 29 (Supplement 3), S98–S106. DOI: 10.1016/j.acra.2021.03.010 [in English].

Kuchmenko O.

doctor of biological sciences, professor,
Head of the Department of Biology,
Mykola Gogol Nizhyn State University
kuchmeh@yahoo.com
orcid.org/0000-0002-3021-858

Sheiko V.

doctor of biological sciences. professor,
Professor of the Department of Biology
Mykola Gogol Nizhyn State University
interlycin@ukr.net
orcid.org/0000-0001-7932-4478

Mkhitarian L.

doctor of medical sciences, professor,
Professor of the Department of Biology
Mykola Gogol Nizhyn State University
laurasmkhitarian@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2347-0107

Havii V.

candidate of biological sciences, associate professor,
Associate Professor of the Department of Biology
Mykola Gogol Nizhyn State University
gaviyv@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2804-0456

REVIEW OF RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING FOR HUMAN SKULL MEASUREMENT

The article analyzes and summarizes current research on the use of magnetic resonance imaging for craniometric (cephalometric) analysis to identify key aspects in evaluating its effectiveness. In the first half of the 2000s, researchers focused on studying the basic capabilities of MRI for craniometry, establishing its ability to reliably identify classical craniometric points and sutures. An important milestone was the introduction of the new MRI sequence «Black Bone» as a non-ionizing alternative to CT for three-dimensional cephalometry. In the late 2010's – early 2020's, significant progress was made in evaluating MRI for craniometry. Comparison of MRI with lateral cephalometric radiographs (LCR) revealed no significant differences between measurements, confirming the possibility of accurate cephalometry using MRI without ionizing radiation. Research by A. Urshottle and colleagues demonstrated high geometric accuracy and reproducibility of cephalometric measurements based on 3 Tesla MRI, highlighting the potential of MRI for accurate 3D cephalometric analysis. MRI showed a number of advantages compared to traditional methods, including the ability to obtain additional information about soft tissues. The method allows studying age-related changes in brain volume and shape, changes in diploe thickness and skull size. The clinical application of MRI in craniometry is expanding, including studying the effects of gender, race, and craniometric indicators on velopharyngeal anatomy and planning orthodontic treatment. Promising directions of development include the UTE MRI method and 3D cephalometric measurement methods based exclusively on MRI. The effectiveness and accuracy of measurements are increasing due to the automation of MRI image analysis. Overall, MRI is recognized as a reliable alternative to X-ray methods, especially for repeated examinations of young patients. However, it is necessary to optimize protocols and reduce the cost of MRI for widespread clinical implementation in craniometry. It is expected that the role of MRI in craniometry will grow due to the development of technologies and analysis methods, opening new possibilities for diagnosis and treatment planning in various fields of medicine.

Key words: craniometry, skull, morphology, physical anthropology, magnetic resonance imaging, cephalometry.

**Стаття до редакції надійшла 03.12.2024 року
Рецензія на статтю надійшла 18.12.2024 року**