

ЛУКИН
МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

КОМПЬЮТЕРНАЯ И МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В
ВЫЯВЛЕНИИ СТРУКТУРНЫХ И ПЕРФУЗИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ГОЛОВНОГО МОЗГА У ДЕТЕЙ С КРАНИОСИНОСТОЗАМИ

3.1.25. Лучевая диагностика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Санкт-Петербург

2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр им. В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Научный руководитель: доктор медицинских наук, доцент
Ефимцев Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: Поздняков Александр Владимирович
доктор медицинских наук, профессор, заведующий
кафедрой медицинской биофизики ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный педиатри-
ческий медицинский университет» Минздрава
России

Ахадов Толибджон Абдуллаевич
доктор медицинских наук, профессор, руководитель
отделения лучевых методов диагностики ГБУЗ
«Научно-исследовательский институт неотложной
детской хирургии и травматологии – Клиника
доктора Рошаля» города Москвы

Ведущая организация: ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия
непрерывного профессионального образования»
Минздрава России

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в ____ час на заседании
диссертационного совета 21.1.028.03 при ФГБУ «Национальный медицинский
исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России (191014, Санкт-
Петербург, ул. Маяковского, д. 12)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского
научно-исследовательского нейрохирургического института им. А.Л. Поленова и на
сайте: <http://www.almazovcentre.ru>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор медицинских наук, профессор Иванова Наталия Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Краниосиностоз – это состояние преждевременного сращения одного или нескольких черепных швов, которое приводит к характерным деформациям черепа и асимметрии лица, и может сопровождаться функциональными нарушениями: повышением внутричерепного давления (ВЧД), гидроцефалией, возникновением и развитием когнитивных и других неврологических нарушений (Суфианов А.А. и соавт., 2013; Иванов В.П. и соавт., 2022; Slater B.J. et al., 2008; Kim H.J. et al., 2016; John J et al., 2025; Mavrantoni I et al., 2025; Ferreira JL et al., 2026).

По данным литературы, данная патология встречается с частотой 1:2000-2500 новорожденных (Озерова В.И. и соавт., 2009; Пушкарева А.С., 2024; Di Rocco F et al., 2019; Gomez DA et al., 2025).

В настоящее время интерес к краниосиностозам неуклонно растет, вследствие увеличения частоты (Лопатин А.В. и соавт., 2005; Суфианов А.М. и соавт., 2022; Neusel C. et al., 2018; Patel R.K. et al., 2025) и повышения уровня знаний о генетических причинах данной патологии (Назаренко Л.П. и соавт., 2019; Осипова Д. В. и соавт., 2022; Lattanzi W. et al., 2017; Chaisrisawadisuk S et al., 2026). В частности, в последние два десятилетия было обнаружено значительное увеличение диагностики краниосиностозов по сравнению с предыдущими годами (Kweldam C.F. et al., 2011). Ряд ученых зарегистрировали рост встречаемости краниосиностозов, в том числе по причине повышения осведомленности о данной патологии среди медицинских работников (Cornelissen M. et al., 2016; Tønne E. et al., 2020). Ежегодно в Российской Федерации рождается от 3500 до 5000 детей с этим заболеванием, что создаёт серьёзную медико-социальную проблему, требующую совместных усилий специалистов разного профиля, родителей и общества (Притыко А.Г. и соавт., 2000; Щербаков А.В. и соавт., 2019).

Несмотря на то, что диагноз является результатом физикального обследования, методы лучевой диагностики играют важную роль в подтверждении диагноза, планировании хирургического вмешательства и в послеоперационном периоде. Однако в современной литературе есть небольшое количество научных работ, посвящённых краниосиностозам, большая часть из которых посвящены одному конкретному методу или методике исследования. Публикаций, посвященных сопоставлению данных нескольких лучевых методов диагностики, мало. Работы, в которых было бы уделено внимание оценке мозгового кровообращения у детей с

краниосиностозами, единичные (Patel R.K. et al., 2025; Gomez D.A. et al., 2025; Matsushita C.M. et al., 2026).

Степень разработанности темы

На современном этапе в диагностике краниосиностоза и сопутствующей интракраниальной патологии применяются различные методы лучевой диагностики, в большей степени рентгеновская компьютерная (КТ) и магнитно-резонансная (МРТ) томографии (Рогинский В.В. и соавт., 2019; Massimi L. et al., 2019; Гаибов С. С. Х. и соавт., 2025; Zhu KJ et al., 2025).

Компьютерная томография с различными режимами реконструкции (MPR – Multiplanar Reconstruction, мультипланарная реконструкция; VRT – Volume rendering technique, техника объемного рендеринга), позволяет оценить свод и основание черепа, лицевой скелет, и является методом выбора при постановке диагноза и планировании оперативного лечения (Курмаева Е.А. и соавт., 2019; Rostamzad P et al., 2025). Кроме того, данный метод имеет большое значение для визуализации послеоперационных осложнений и оценке ремоделирования черепа в позднем послеоперационном периоде (Badve S.A., 2013; Rostamzad P et al., 2025).

Более детализированная оценка внутричерепных структур и отсутствие лучевой нагрузки являются ключевыми преимуществами МРТ (Мидленко А. И. и соавт., 2024; Collmann H et al., 2005; Udayakumaran S et al., 2025). Однако ограничения в визуализации костных структур, длительность и необходимость анестезиологического пособия способствуют менее широкому ее назначению по сравнению с КТ (Рещиков Д. А. и соавт., 2023; Spazzapan P et al., 2024).

В настоящее время очень мало публикации по проведению исследований с комплексной нейровизуализационной оценкой костных структур, непосредственно вещества головного мозга и мозгового кровотока до и после хирургической коррекции деформации черепа при краниосиностоze. Существующие публикации носят описательный характер, выполнены на малом количестве наблюдений.

Все вышеперечисленное обуславливает актуальность и неразработанность темы диссертации. Данная работа основана на комплексном подходе к применению методов нейровизуализации, включающем методы выявления как структурных (КТ, МРТ), так и перфузионных (динамическая контрастная МР-перфузия) изменений головного мозга у детей с краниосиностозами до и после хирургической коррекции.

Цель исследования

Улучшение диагностики структурных и перфузионных изменений головного мозга у детей с краниосиностозами до и после хирургической коррекции путем выполнения рентгеновской компьютерной и магнитно-резонансной томографии.

Задачи исследования

1. Уточнить степень и динамику структурных изменений костей черепа, а также перфузионных показателей головного мозга у детей с краниосиностозами до и после хирургической коррекции.
2. Определить нейровизуализационные маркеры тяжести нарушения мозгового кровотока у детей с краниосиностозами.
3. Определить прогностическую значимость морфометрических изменений по данным КТ и перфузионной МРТ в оценке эффективности хирургической коррекции у детей с краниосиностозами.
4. Разработать оптимальный алгоритм применения методов лучевой нейровизуализации у детей с краниосиностозами.

Научная новизна исследования

На основании данных КТ, с использованием морфометрических измерений, была проведена оценка степени деформации черепа у детей с краниосиностозами до и после оперативного лечения. Выявлено отклонение морфометрических показателей от нормальных значений и их полное или частичное восстановление после оперативного лечения ($p < 0,0001$).

На основании данных динамической контрастной МР-перфузии проведена оценка мозгового кровообращения у детей с краниосиностозами до и после оперативного лечения, и доказана значимость данной методики в оценке эффективности хирургической коррекции. Выявлено снижение перфузионных показателей головного мозга различной степени при краниосиностозах и их частичное или полное восстановление до нормальных значений после лечения ($p < 0,0001$).

Впервые было проведено сравнение морфометрических измерений, по данным КТ, с показателями мозгового кровотока, по данным динамической контрастной МР-перфузии у детей с краниосиностозами. Взаимосвязи основных перфузионных показателей головного мозга с морфометрическими параметрами черепа во всей выборке статистически значимо не выявлено, что свидетельствует о сложном характере взаимосвязи структурных и функциональных изменений ($p < -0,03 - 0,131$).

Выявлены специфические взаимосвязи между изменениями перфузионных и морфометрических показателей в различных группах краниосиностозов по отдельности, что доказывает необходимость персонализированного подхода к каждому пациенту и виду краниосиностоза ($p < 0,006 - 0,049$).

Впервые разработан оптимальный алгоритм применения методов лучевой нейровизуализации у детей с краниосиностозами.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Доказана значимость использования морфометрических измерений по данным КТ у детей с краниосиностозами, применение которых позволяет объективно оценить степень деформации черепа. Предложенный комплекс морфометрических параметров, включающий цефалический индекс, индекс асимметрии свода черепа, фронтальный угол и фронтальный стеноз, обеспечивает комплексную характеристику деформации, позволяет идентифицировать специфические различия между различными типами краниосиностоза и количественно оценить степень их выраженности ($p < 0,0001$).

Доказана значимость применения динамической контрастной МР-перфузии в оценке мозгового кровообращения у детей с краниосиностозами, применение которой позволяет объективно оценить показатели мозгового кровотока. Выявлено значимое снижение перфузионных показателей скорости мозгового кровотока (cerebral blood flow, CBF), объема мозгового кровотока (cerebral blood volume, rCBV) во всех группах, значимое повышение показателей среднего времени транзита (mean transit time, MTT), времени до пика (time to peak, TTP) в некоторых группах пациентов, с их частичной или полной нормализацией после оперативного лечения ($p < 0,0001$).

Обобщена МР- и КТ-семиотика структурных и перфузионных изменений головного мозга и костей черепа. Выявлено снижение показателей мозгового кровотока различной степени, в наиболее компримированных отделах головного мозга. В группах скафоцефалии, тригоноцефалии, брахицефалии, передней плагиоцефалии, оксипцефалии было выявлено снижение средних значений относительных перфузионных показателей в лобных долях rCBF (от $66,90 \pm 4,96\%$ до $82,06 \pm 11,53\%$), rCBV (от $57 \pm 2,61\%$ до $88,73 \pm 4,78\%$), повышение показателей rMTT (от $108,00 \pm 3,44\%$ до $117 \pm 1,80\%$), rTTP (от $103,80 \pm 3,82\%$ до $121,10 \pm 0,70\%$). В группах задней плагиоцефалии и комбинированных краниосиностозов было выявлено снижение средних значений относительных перфузионных показателей в затылочных долях rCBF (от $77,13 \pm 9,77\%$ до $77,71 \pm 10,53\%$), rCBV (от $57,33 \pm 2,61\%$ до $79,45 \pm 9,53\%$), повышение показателей rMTT (от $113,16 \pm 10,17\%$ до $115,64 \pm 3,84\%$), rTTP (от $108,33 \pm 1,15\%$ до $109,86 \pm 6,97\%$).

Полученные результаты позволили выработать оптимальный алгоритм диагностики структурных и перфузионных нарушений головного мозга и костей черепа путем применения различных методик КТ и МРТ.

Результаты могут быть применены в клинической практике врачами неврологами и нейрохирургами, как дополнительные критерии для принятия решения об хирургической коррекции.

Методология и методы исследования

Диссертационное исследование является когортным проспективным.

Методология исследования основывается на результатах КТ и МРТ -семиотики краниосиностозов, опубликованных в современной отечественной и зарубежной научной литературе. Проведён обзор и исследование актуальных источников по теме работы, постановка цели и задач исследования, сбор и обработка нейровизуализационных данных КТ и МРТ и их сопоставление у пациентов с краниосиностозами.

Объектом исследования являлись пациенты с установленным диагнозом краниосиностоз.

Исследование является ретро- и проспективным, когортным, по типу «случай-контроль», выполненное согласно принципам доказательной медицины и обработки научных данных.

В работе использовались методы сбора, обработки и анализа научных данных, отвечающие требованиям к научно-исследовательской работе.

Положения, выносимые на защиту

1. Проведение КТ головы, с выполнением морфометрических измерений, позволяет с высокой точностью определить степень деформации и динамику структурных изменений костей черепа у детей с краниосиностозами, с указанием всех необходимых размеров до и после оперативного лечения ($p < 0,0001$).

2. Проведение динамической контрастной МР-перфузии позволяет с высокой точностью оценить основные гемодинамические показатели в наиболее компримированных участках головного мозга у детей с краниосиностозами до и после оперативного лечения ($p < 0,0001$).

3. Применение комплексного лучевого исследования, включающее КТ и МРТ, дополненное методиками КТ-морфометрии и динамической контрастной МР-перфузии позволяет сравнить степень деформации костей черепа и показатели церебрального кровотока у детей с краниосиностозами до и после оперативного лечения ($p < 0,0001 - 0,009$).

Степень достоверности и апробация диссертационной работы

Степень достоверности результатов проведённого исследования обеспечивается достаточно большой и репрезентативной выборкой ($n=51$), использованием комплексного статистического анализа с установленным доверительным интервалом ($p < 0,05$), применением современных методов медицинской нейровизуализации и постпроцессинговой обработкой данных, включая проведение внутригруппового и межгруппового анализов. На основании полученных данных были сформулированы

выводы, практические рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы данного диссертационного исследования.

Апробация работы проведена на заседании Проблемной комиссии «Нейронауки» ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России от 26.11.2025 года, протокол №10-2025.

Основные результаты исследования были доложены и обсуждены на: XXIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Поленовские чтения» (СПб, 2024); Научно-практической конференции «Лучевая диагностика в перинатологии и педиатрии» (СПб, 2024); XXIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Поленовские чтения» (СПб, 2025); XVI Международном конгрессе «Невский радиологический форум» (СПб, 2025).

Внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в работу: отделений лучевой диагностики №1 и магнитно-резонансной томографии, а также используются в учебном процессе на кафедре лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России; отделения лучевой диагностики ГБУЗ «Детский городской многопрофильный клинический центр высоких медицинских технологий им К.А. Раухфуса»; кабинета магнитно-резонансной томографии СПб ГБУЗ «Детская городская больница Святой Ольги»; клиники и отделения лучевой диагностики с кабинетом компьютерной томографии, а также используются в учебном процессе кафедры современных методов диагностики и радиолучевой терапии им. профессора С.А. Рейнберга ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России; отделения лучевой диагностики «Детского городского многопрофильного специализированного центра высоких медицинских технологий» (Детская городская больница №1).

Личный вклад автора

Цель и план диссертации, ее основные идеи и содержание разработаны совместно научным руководителем на основе многолетних целенаправленных исследований. Автор самостоятельно сформулировал обосновал актуальность темы диссертации, цель, задачи и этапы научного исследования. Лично автором была создана электронная база данных пациентов. Диссертант лично обследовал 51 пациента, проводя им комплексную МРТ головного мозга, дополненную динамической контрастной МР-перфузией, провел оценку результатов КТ.

Личный вклад автора изучение литературы, сбор, обобщение, анализ полученных данных и написание диссертации – 100%.

Публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 18 печатных работ, из них 3 публикации в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, а также входящих в библиографическую базу данных Scopus. Регистрация базы данных № 2026620506 «Регистр магнитно-резонансных и компьютерно-топографических с исследованиями головного мозга у детей с краниосиностозами» от 03.02.2026г.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием пациентов методов исследования, главы с результатами исследования, обсуждения, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка литературы (231), включающего 57 отечественных и 174 зарубежных источников. Работа иллюстрирована 28 таблицами, 26 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Общая характеристика обследованных пациентов

Работа выполнена на кафедре лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Минздрава России в период с 2023 по 2026 годы.

Исследование является ретро-и- проспективным, когортным, по типу «случай-контроль».

В исследование были включены 51 ребенок. Возраст пациентов составил от 3 до 96 месяцев. Средний возраст пациентов – 18,82 месяцев.

Распределение пациентов по группам выполнялось в зависимости от выявленного вида краниосиностоза:

- 11 (22%) – сагиттального шва (скафоцефалия, «С»);
- 13 (25%) – метопического шва (тригоноцефалия, «Т»);
- 3 (5,9%) – сагиттального и бикоронарного синостоза (оксицефалия, «О»);
- 10 (20%) – коронарного шва с одной стороны (передняя плагиоцефалия, «ПП»);
- 3 (5,9%) – бикоронарного синостоза (брахицефалия, «Б»);
- 3 (5,9%) – одностороннего лямбдовидного синостоза (задняя плагиоцефалия, «ЗП»);
- 8 (16%) – комбинированного синостоза («К»).

Компьютерную томографию выполняли на аппарате Somatom Definition Force (Siemens) – две рентгеновских трубки, 384 среза.

После получения нативных КТ-изображений проводили оценку костных структур, состояния швов черепа и металлоконструкций с построением мультипланарных (Multiplanar reformation (MPR)) и трехмерных (3D) реконструкций - VRT (Volume Rendering Technique, техника объемной визуализации) и SSD (Shaded Surface Display, отображение затененной поверхности) с помощью специализированного программного обеспечения (Рисунок 1).

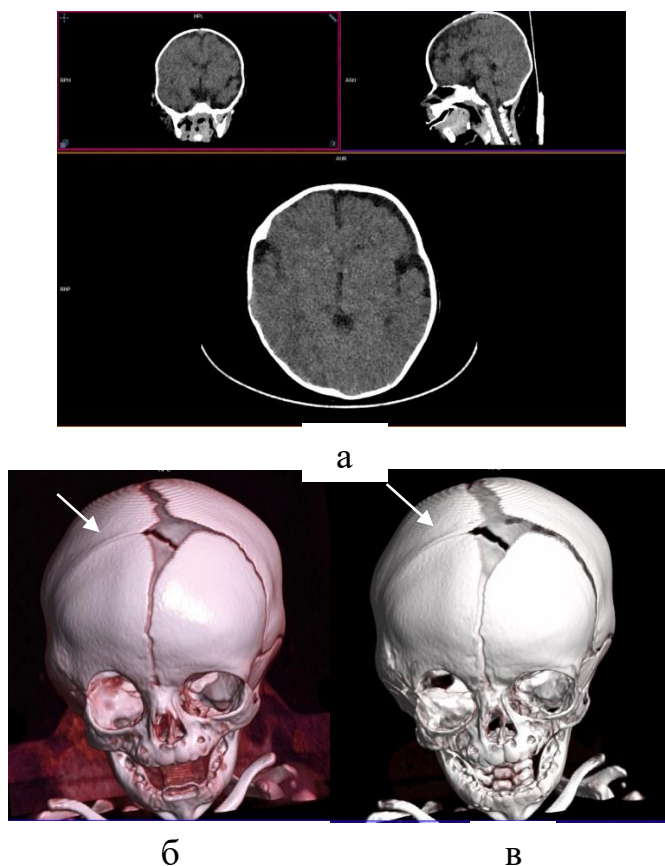


Рисунок 1 – Построение MPR-реконструкции (а), VRT (б) и SSD (в) реконструкций по данным КТ головы пациентки с правосторонним коронарным краниосиностомозом (пораженный шов указан стрелкой) (пациентка В., 9 месяцев №ИБ 55807/А17)

На полученных аксиальных изображениях, в режиме «костного окна» проводили измерения черепа для дальнейших расчетов морфометрических показателей:

- Цефалический индекс (ЦИ) рассчитывается как отношения поперечного размера черепа (бипариетального размера) к продольному (лобно-затылочному), выраженная в процентах (Рисунок 2а).

- Индекс асимметрии свода черепа (ИАСЧ) рассчитывается путем деления разницы длин двух отрезков, проведенных под углом 30 градусов относительно

средней линии, на длину более протяженного из этих отрезков, выраженное в процентах (Рисунок 2б).

- Фронтальный угол (ФУ) строится между точками птерион (точка на боковой поверхности черепа, в месте соединения швов между теменной, височной и клиновидной костями) и назион (антропометрическая точка на черепе, являющаяся местом пересечения носолобного шва) (Рисунок 2в).

- Фронтальный стеноз (ФС) рассчитывается как отношение межпаритетального расстояния к межкоронарному (Рисунок 2г).

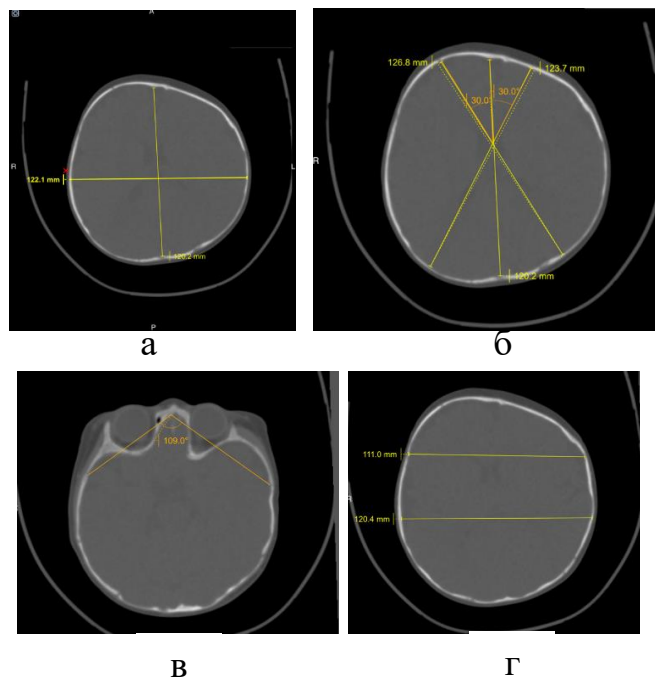


Рисунок 2 – Проведение измерений для оценки цефалического индекса (а), индекса асимметрии свода черепа (б), фронтального угла (в), фронтального стеноза

Магнитно-резонансную томографию головного мозга выполняли на аппарате с индукцией магнитного поля 1,5 Тл (Magnetom Espree, Siemens), с использованием головной радиочастотной катушки Head Coil, с внутривенным болюсным введением парамагнитного контрастного вещества в дозировке 0,1 ммоль/кг. Пациенты находились в состоянии медикаментозного сна. МРТ головного мозга выполняли по стандартному протоколу исследования (Таблица 1), в двух временных точках – до и после оперативного лечения.

Таблица 1 – Используемые импульсные последовательности и плоскости сканирования при проведении МРТ головного мозга

Локалайзеры в трех плоскостях (localizer)
T2-ВИ в аксиальной плоскости (T2_tse_tra)
TIRM-ВИ в аксиальной плоскости (T2_TIRM_tra)
T2-ВИ в корональной плоскости (T2_tse_cor)
T1-ВИ в аксиальной плоскости (T1_tse_tra)
T1-MPRAGE в сагиттальной плоскости (T1_MPRAGE_sag_iso)

Стандартный протокол сканирования дополняли динамической контрастной T2*-MP-перфузии (DSC-перфузия) - «ep2d_perf» (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры импульсной последовательности динамическая контрастная T2*-MP-перфузия

Время исследования	1:59
Размер вокселя	1,8x1,8x5,0 мм ³
Геометрия	FoV – 230 мм (матрица 128x128), 550 срезов, толщина среза – 5,0 мм, гол поворота – 90°
Временные параметры	TR – 1960 мс, TE – 51 мс

Построение цветных перфузионных карт скорости мозгового кровотока (Cerebral blood flow - CBF), объема мозгового кровотока (Cerebral blood volume - CBV), время достижения пиковой концентрации (Time to peak - TTP) и время транзита контрастного вещества (Mean transit time - MTT) осуществляли с помощью системы syngo.via (Siemens).

После получения перфузионных карт, ручным способом проводилась разметка зон интереса (Region of Interest, ROI) – кортикально-субкортикальные отделы наиболее подверженные компрессии и наиболее интактные доли головного мозга противоположного полушария головного мозга. Зона интереса выстраивалась в размере не менее 1 см², при исключении из нее крупных сосудов и ликворных пространств. Показатели перфузии в зонах компрессии рассчитывались относительно («r» - relative) интактных зон, принятых за 100% (Рисунок 3).

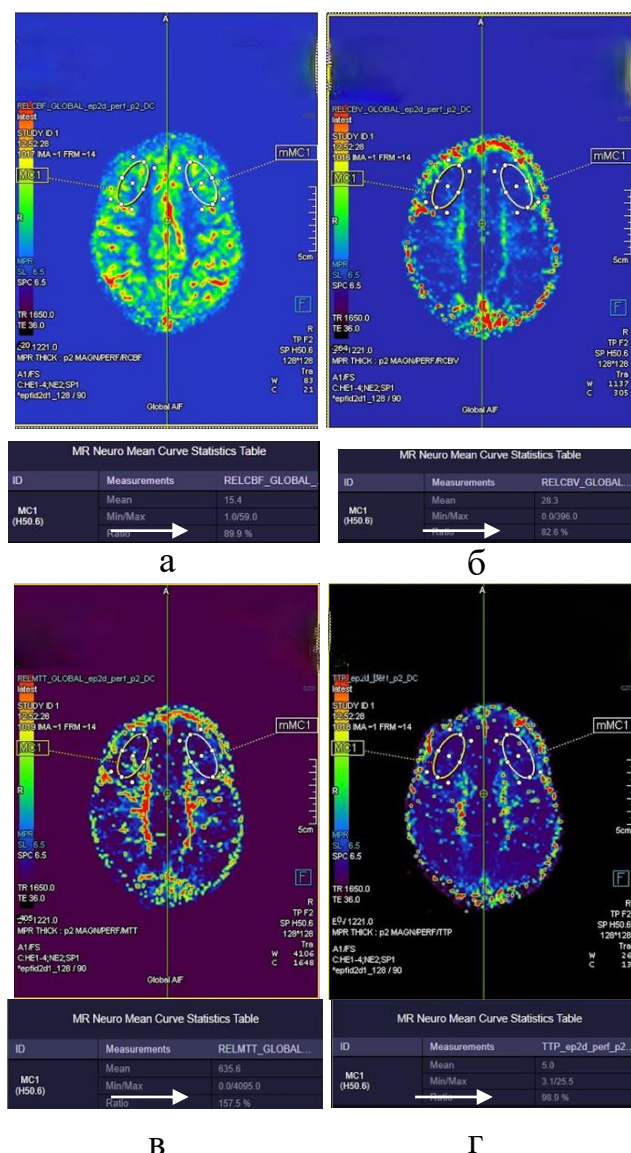


Рисунок 3 – Построение цветных перфузионных карт CBF (а), CBV (б), MTT (в), TTP (г) и разметка зон интереса у пациента с правосторонним коронарным краниосиностозом, с получением относительных показателей (указаны стрелками на рисунке) (пациент О., 17 месяцев №ИБ 68347/А16)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа морфометрических параметров черепа по данным КТ и перфузионных показателей головного мозга по данным МРТ у детей краниосиностозами до и после операции

Проведенный анализ данных КТ-морфометрии и динамической контрастной T2*-МР-перфузии в двух временных точках демонстрирует высокую эффективность оперативного лечения, оказавшую статистически значимое влияние на подавляющее большинство исследуемых параметров у 51 пациента (Таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение показателей КТ и МРТ до и после оперативного лечения у детей с краниосиностозами в двух временных точках

Параметр	Метод анализа	Среднее изменение	95% доверительный интервал	Размер эффекта	p
rCBF	Парный t-тест	+18,02	[15,89; 20,15]	2,38	< 0,001
rCBV	Критерий Уилкоксона	+15,30	[14,30; 19,65]	0,87	< 0,001
rMTT	Критерий Уилкоксона	-7,30	[-9,35; -6,05]	0,87	< 0,001
rTTP	Критерий Уилкоксона	-3,90	[-7,95; -3,65]	0,87	< 0,001
ИАСЧ	Критерий Уилкоксона	-2,01	[-3,08; -1,79]	0,87	< 0,001
ФС	Критерий Уилкоксона	-0,09	[-0,13; -0,07]	0,76	< 0,001
ФУ	Парный t-тест	+7,41	[4,95; 9,88]	0,85	< 0,001
ЦИ	Парный t-тест	-0,41	[-2,92; 2,10]	-0,05	0,743
Примечание: rCBF — скорость мозгового кровотока; rCBV — объем мозгового кровотока; rMTT — среднее время транзита; rTTP — время до пика; ИАСЧ — индекс асимметрии свода черепа; ФС — фронтальный стеноз; ФУ — фронтальный угол; ЦИ — цефалический индекс					

Наиболее выраженные положительные изменения наблюдаются в показателях мозгового кровотока: rCBF и rCBV продемонстрировали сильный и достоверный прирост, в то время как время транзита rMTT и время до пика rTTP — значимое сокращение, что указывает на нормализацию показателей церебральной гемодинамики. Одновременно с этим отмечается существенное улучшение морфометрических характеристик черепа, выраженное в снижении ИАСЧ и показателя ФС, что свидетельствует об уменьшении деформации. Увеличение ФУ дополнительно подтверждает положительные структурные изменения. При этом цефалический индекс ЦИ, являющийся общей мерой пропорций черепа, остался статистически неизменным, что связано с его измерениями, так как он является «двусторонним» («two-sided») и должен оцениваться для каждого вида деформации черепа отдельно в конкретной группе.

Результаты сравнения морфометрических показателей по данным КТ с показателями перфузии головного мозга по данным МРТ у детей с краниосиностозами

Взаимосвязь количественных данных морфометрических измерений черепа у пациентов с краниосиностозом по КТ и перфузионных показателей головного мозга по данным МРТ была изучена при помощи метода корреляции Спирмена. Были вычислены показатели изменчивости каждого параметра КТ и МРТ (Δ – дельта) у 51 пациента, с последующим их сравнением (Таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение морфометрических показателей черепа по данным КТ и перфузионных показателей головного мозга по данным МРТ у детей с краниосиностозами до и после оперативного лечения

Параметр	$\Delta rCBF$	$\Delta rCBV$	$\Delta rMTT$	$\Delta rTTP$	ΔFU	ΔFC	ΔIAC	ΔCI
$\Delta rCBF$	1	0,573	-0,184	-0,132	0,06	-0,042	0,133	0,131
$\Delta rCBV$	0,573	1	-0,233	-0,218	-0,03	0,061	0,031	0,125
$\Delta rMTT$	-0,184	-0,233	1	0,31	0,12	0,032	0,004	-0,011
$\Delta rTTP$	-0,132	-0,218	0,31	1	0,137	0,07	-0,053	0,103
ΔFU	0,06	-0,03	0,12	0,137	1	0,016	0,35	0,193
ΔFC	-0,042	0,061	0,032	0,07	0,016	1	-0,074	0,205
ΔIAC	0,133	0,031	0,004	-0,053	0,35	-0,074	1	0,114
ΔCI	0,131	0,125	-0,011	0,103	0,193	0,205	0,114	1

Примечание: Δ (дельта) – показатель, отображающий разницу конкретного показателя до и после оперативного лечения

Из таблицы 4 следует, что обнаружена статистически значимая умеренная положительная корреляция между $\Delta rCBF$ и $\Delta rCBV$ ($\rho = 0,573$). Параметры времени, такие как $\Delta rMTT$ и $\Delta rTTP$, демонстрируют слабую отрицательную корреляцию с объемными параметрами ($\Delta rCBV$) и слабую положительную корреляцию друг с другом ($\rho = 0,31$), что также соответствует их физиологической природе. Наиболее важным результатом является то, что между большинством перфузионных ($\Delta rCBF$, $\Delta rCBV$, $\Delta rMTT$, $\Delta rTTP$) и морфометрических (ΔFU , ΔFC , ΔIAC , ΔCI) показателей не выявлено значимых корреляций. Все коэффициенты находятся в диапазоне слабых и очень слабых связей (от -0,218 до 0,137). Единственное исключение - слабая положительная корреляция наблюдается между ΔFU и ΔIAC ($\rho = 0,35$), что указывает на некоторую согласованность в изменении этих морфометрических характеристик после операции. На следующем этапе оценивали взаимосвязь между морфометрическими показателями и показателями перфузии отдельно в каждой группе пациентов (Таблица 5).

Таблица 5 – Значимые корреляции сравнения морфометрических показателей черепа по данным КТ и перфузионных показателей головного мозга по данным МРТ у детей с краниосиностозами до и после оперативного лечения

Группа	Параметр 1	Параметр 2	r	p
ПП	$\Delta rCBF$	ΔFC	0,793	0,006
С	$\Delta rCBF$	$\Delta rCBV$	0,755	0,007
Т	$\Delta rCBF$	ΔFU	-0,691	0,009
К	$\Delta rCBF$	$\Delta rCBV$	0,81	0,015
К	ΔFC	ΔIAC	0,79	0,02
С	ΔFU	ΔCI	0,62	0,042
К	ΔFU	ΔCI	-0,719	0,045
Т	$\Delta rCBV$	ΔCI	0,554	0,049

На основе данных корреляционного анализа выявлены специфические взаимосвязи между изменениями перфузионных и морфометрических показателей в различных группах краниосиностозов. В группах С и К наблюдается сильная положительная корреляция между динамикой $\Delta rCBF$ и $\Delta rCBV$, что подтверждает ожидаемую физиологическую взаимозависимость этих параметров. В группе ПП обнаружена особенно сильная связь между улучшением $\Delta rCBF$ и изменением ΔFC , что может указывать на ключевую роль данной морфометрической коррекции в нормализации перфузии именно при этом типе синостоза. В то же время, в группе Т выявлена отрицательная корреляция между $\Delta rCBF$ и ΔFU , предполагая, что изменение ФУ может по-разному влиять на гемодинамику. Противоречивые корреляции между ΔFU и ΔCI в группах С (положительная) и К (отрицательная), которая вероятно также связана с «двусторонним» характером показателя ЦИ.

Проведенный корреляционный анализ демонстрирует, что хирургическое лечение краниосиностозов обеспечивает комплексное улучшение как морфометрических параметров черепа, так и показателей церебральной перфузии. При этом общий анализ не выявил значимых прямых корреляций между изменениями формы черепа и показателями гемодинамики, что свидетельствует об относительной независимости этих процессов. Подтверждена ожидаемая физиологическая взаимосвязь между перфузионными параметрами CBF и CBV . Стратификация данных по типам краниосиностоза выявила специфические взаимосвязи, наиболее выраженные в группе ПП, где обнаружена сильная корреляция между CBF и FC . Противоречивый характер корреляций между изменениями ФУ и ЦИ в разных группах указывает на разнонаправленное влияние хирургической коррекции.

На основе проведенного исследования нами был предложен комплексный алгоритм диагностики краниосиностозов (Рисунок 4).

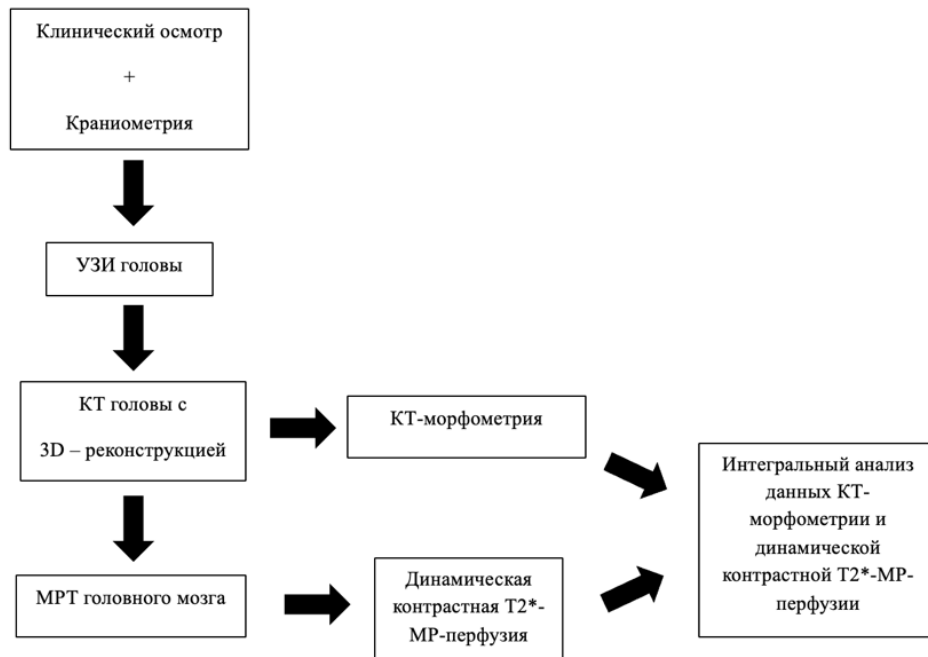


Рисунок 4 – Алгоритм обследования пациентов с краниосиностозами

Данный подход к диагностике позволяет получить все необходимые данные для лечащего врача о виде краниосиностоза, степени деформации черепа и возможных перфузионных нарушениях головного мозга в наиболее компримированных отделах.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Проведённое сравнение показателей до и после оперативного лечения (Рисунок 5) позволило выявить чёткую динамику, характеризующуюся улучшением перфузионных характеристик и нормализацией морфометрических показателей.

Перфузионные параметры $rCBF$ и $rCBV$ после операции значительно увеличивались в ряде групп, в то время как показатели $rMTT$, $rTTP$ снижались, что свидетельствует о тенденции к нормализации мозгового кровотока.

Морфометрические показатели также продемонстрировали положительные изменения: отмечалось снижение ИАСЧ, уменьшение ФС и повышение ФУ. Особенно выраженные и статистически значимые изменения зарегистрированы в группах ЗП и С для ЦИ, в группах Т, ПП, С и К для $rCBF$ и $rCBV$, а также в группах Т, ПП и С для $rMTT$ и $rTTP$.

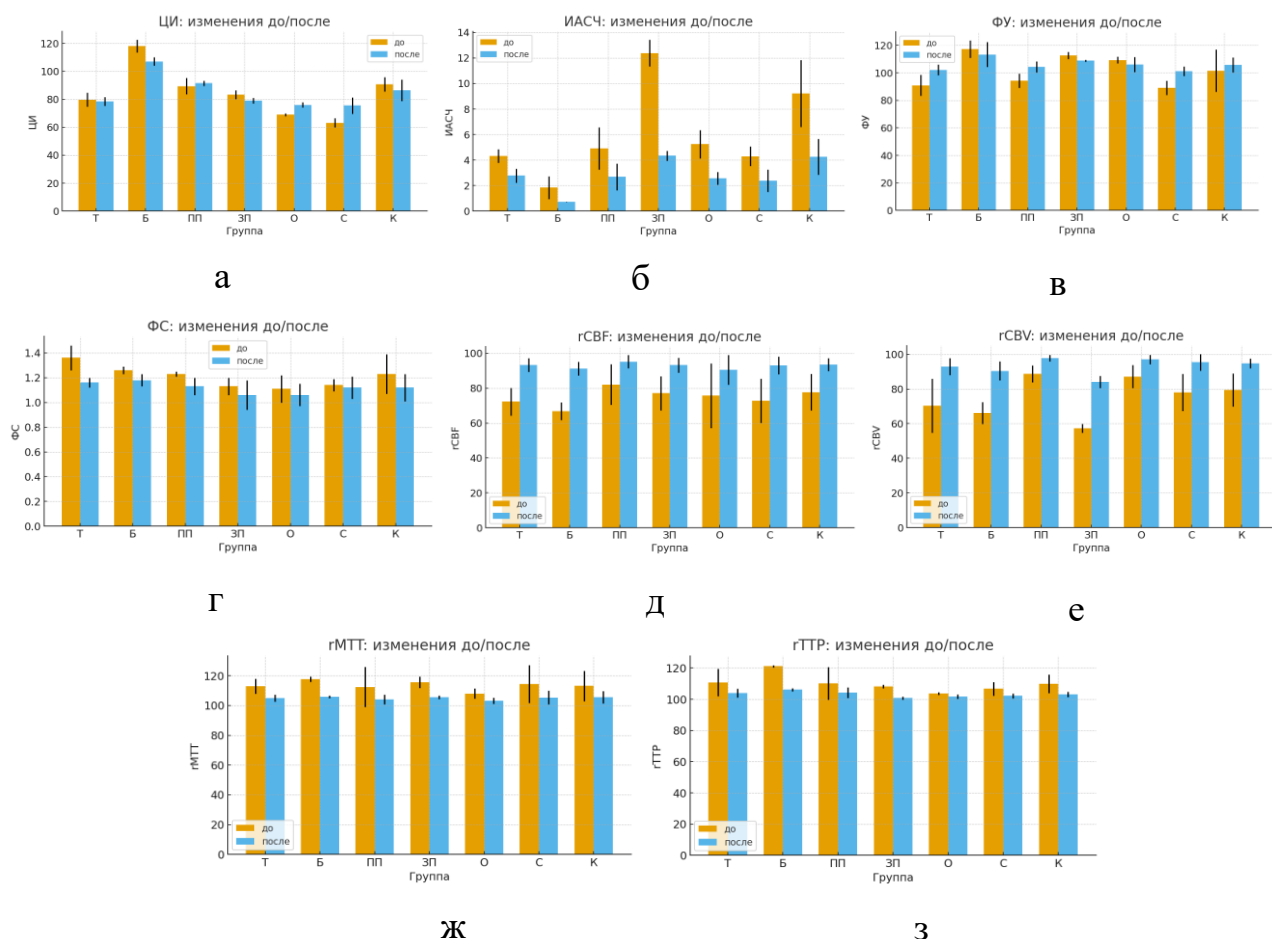


Рисунок 5 – Столбчатые диаграммы средних значений по группам до и после операции

Примечание: а – цефалический индекс (ЦИ); б – индекс асимметрии свода черепа (ИАСЧ); в – фронтальный угол (ФУ); г – фронтальный стеноз (ФС); д – скорость мозгового кровотока (гСВФ); е – объем мозгового кровотока (гСВВ); ж – среднее время транзита (гМТТ); з – время до пика (гТТР)

Применение диаграммы размаха (ящики с усами) позволило оценить индивидуальную динамику показателей (Рисунок 6), из которого следует, что в гСВФ и гСВВ большинство линий направлены вверх, медианы смещены вправо/вверх, разброс уменьшается — это соответствует нормализации данных параметров после вмешательства. Для гМТТ и гТТР линии в основном идут вниз, а распределения смещаются к меньшим значениям, что отражает снижение данных показателей. ИАСЧ демонстрирует выраженное снижение почти у всех пациентов. ФС уменьшается умеренно и становится более однородной. ФУ в целом повышается (особенно заметно у Т, ПП и С), хотя у части групп (Б, ЗП, О) наблюдается умеренное снижение. Для ЦИ отмечается гетерогенность: рост у С и О, умеренное повышение у ПП и снижение у Б, ЗП и К, что связано с его «двусторонним» характером.

В сумме диаграмма показывает, что большая часть пациентов демонстрирует улучшение перфузионных и морфометрических показателей после операции.

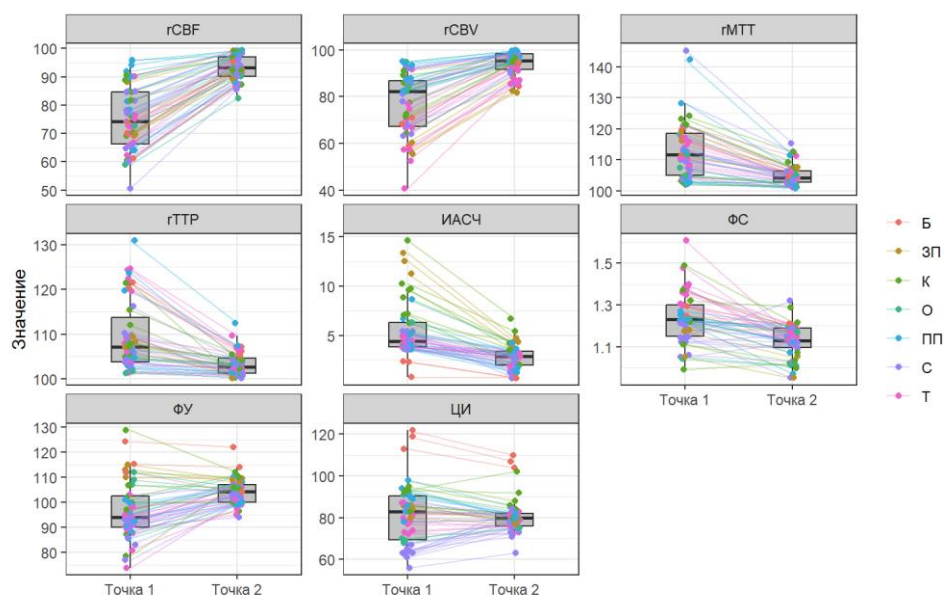


Рисунок 6 – Диаграммы размаха (ящики с усами) – индивидуальная динамика показателей

Примечание: скорость мозгового кровотока (rCBF); объем мозгового кровотока (rCBV); среднее время транзита (rMTT); время до пика (rTTP); цефалический индекс (ЦИ); индекс асимметрии свода черепа (ИАСЧ); фронтальный угол (ФУ); фронтальный стеноз (ФС)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено комплексное лучевое обследование 51 пациента с различными формами краниосиностозов до и после хирургического лечения, включавшее КТ-морфометрию и динамическую контрастную T2*-МР-перфузию (DSC-перфузию). Все пациенты были разделены на группы согласно типу синостоза: скафоцефалия (С, n=11), тригоноцефалия (Т, n=13), оксифефалия (О, n=3), передняя плагиоцефалия (ПП, n=10), брахицефалия (Б, n=3), задняя плагиоцефалия (ЗП, n=3) и комбинированный синостоз (К, n=8). Такое разделение позволило в дальнейшем выявить специфические морфометрические и перфузионные паттерны, характерные для каждого типа деформации.

Дооперационный анализ выявил характерные изменения: наиболее низкий ЦИ отмечен при скафоцефалии ($63,18 \pm 3,19\%$), наиболее высокий — при брахицефалии ($118,00 \pm 4,58\%$), а самые высокие показатели индекса асимметрии свода черепа зафиксированы при задней плагиоцефалии ($12,38 \pm 1,05\%$) и комбинированных формах краниосиностозов ($9,22 \pm 2,63\%$).

Дооперационные МР-перфузионные исследования выявили снижение скорости и объема мозгового кровотока во всех группах, наиболее выраженное при

брахицефалии и задней плагиоцефалии, с одновременным увеличением времени транзита и времени до пика в некоторых группах.

При проведении сравнительного анализа данных до и после оперативного лечения выявлена высокая эффективность хирургической коррекции, которая привела не только к ожидаемому улучшению морфометрических параметров, но и к значительной нормализации показателей церебральной перфузии. Статистически значимое улучшение морфометрических показателей отмечено: по ЦИ — в группах скафоцефалии и задней плагиоцефалии, по ИАСЧ — в группах тригоноцефалии, передней плагиоцефалии, скафоцефалии и комбинированных форм, по ФС — в группах тригоноцефалии, скафоцефалии и комбинированных форм. Наиболее выраженная положительная динамика перфузионных параметров наблюдалась в отношении $rCBF$ и $rCBV$, которые достоверно увеличились, а $rMTT$ и $rTTP$ снизились практически во всех группах, приблизившись к нормальным значениям. Сравнительный анализ 51 пациента без деления на группы подтвердил высокую эффективность оперативного лечения с крупным размером эффекта по большинству параметров: прирост $rCBF$ составил +18,02%, $rCBV$ +15,30%, при значимом снижении показателей асимметрии черепа.

Таким образом, в результате проведенного научного исследования разработан и внедрен в клиническую практику комплексный алгоритм лучевой диагностики краниосиностозов, сочетающий КТ-морфометрию и МР-перфузию; выявлены характерные морфометрические и перфузионные паттерны для различных типов краниосиностозов; доказана высокая эффективность хирургического лечения в плане нормализации как анатомических параметров черепа, так и показателей церебральной гемодинамики; установлены сложные взаимоотношения между морфометрическими и перфузионными изменениями.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный унифицированный алгоритм КТ-морфометрии позволил объективно оценить и дифференцировать степень деформации черепа: наиболее тяжелые нарушения формы (по показателям цефалического индекса и фронтального стеноза) выявлены при скафоцефалии и брахицефалии, индекс асимметрии свода черепа с очень тяжелой степенью деформации (12,38%) зафиксирована при задней плагиоцефалии. Послеоперационная КТ продемонстрировала статистически значимую положительную динамику структурных изменений: увеличение цефалического индекса в группах скафоцефалии (с 63,18% до 75,45%, $p < 0,0001$) и задней плагиоцефалии (с 83,33% до 79,00%, $p < 0,0001$); улучшение индекса

асимметрии свода черепа в группах тригоноцефалии (с 4,33% до 2,78%, $p<0,001$), передней плагиоцефалии (с 4,90% до 2,69%, $p<0,0001$) и комбинированного синостоза (с 9,22% до 4,26%, $p<0,0001$); коррекцию фронтального стеноза в группах тригоноцефалии (с 1,36 до 1,16, $p<0,0001$) и комбинированного синостоза (с 1,23 до 1,12, $p<0,01$).

2. При применении динамической контрастной T2*-МР-перфузии до операции определено значимое снижение относительных показателей rCBF и rCBV во всех группах, наиболее выраженное при брахицефалии ($66,80 \pm 4,96\%$ и $66,10 \pm 6,32\%$ соответственно), а также повышение rMTT и rTTP. После операции выявлена достоверная нормализация перфузионных параметров: rCBF увеличился на 18,02% (95% ДИ: 15,89-20,15, $p<0,001$), rCBV на 15,30% (95% ДИ: 14,30-19,65, $p<0,001$), rMTT снизился на 7,30% (95% ДИ: -9,35 до -6,05, $p<0,001$), rTTP снизился на 3,90% (95% ДИ: -7,95 до -3,65, $p<0,001$).

3. Ключевыми нейровизуализационными маркерами тяжести нарушения мозгового кровотока являются количественные параметры динамической контрастной T2*-МР-перфузии: до операции у всех пациентов наблюдалось значимое снижение относительной скорости мозгового кровотока (rCBF) и объема мозгового кровотока (rCBV), а также повышение среднего времени транзита (rMTT) и времени до пика (rTTP). Наибольшая тяжесть нарушений была маркирована в группе с брахицефалией (значения rCBF и rCBV составляли всего $66,80 \pm 4,96\%$ и $66,10 \pm 6,32\%$ от нормы, соответственно). После операции определено значимое улучшение rCBF в группах передней плагиоцефалии (с 82,06% до 95,17%, $p<0,0001$), скафоцефалии (с 72,70% до 93,05%, $p<0,0001$) и комбинированного синостоза (с 77,71% до 93,44%, $p<0,0001$).

4. Комплексное применение КТ и МРТ позволило установить отсутствие значимых прямых корреляций между изменениями морфометрических и перфузионных показателей при анализе всей выборки ($p>0,05$), что свидетельствует об относительной независимости этих процессов. Однако стратификация данных по типам синостозов выявила специфические взаимосвязи: сильную корреляцию между динамикой rCBF и ФС в группе передней плагиоцефалии ($r=0,793$, $p=0,006$) и умеренные корреляции в других группах ($p<0,009-0,049$). Это доказывает целесообразность комплексного подхода: КТ-морфометрия точно оценивает анатомический результат (коррекцию формы черепа), в то время как перфузионная МРТ объективно оценивает функциональный результат на уровне восстановления церебрального кровотока.

5. На основе комплексного анализа результатов исследования был разработан и внедрен в клиническую практику оптимальный пошаговый алгоритм применения методов лучевой диагностики у детей с краниосиностозами, включающий КТ и МРТ, с применением методик КТ-морфометрии и динамической контрастной T2*-МР-перфузии на до- и послеоперационном этапе, для интегральной оценки результатов морфометрических и перфузионных показателей, и результатов оперативного лечения.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработанный алгоритм, включающий комплексный протокол лучевой диагностики краниосиностозов целесообразно внедрить в работу специализированных отделений детской нейрохирургии и лучевой диагностики многопрофильных стационаров, имеющих в своем составе современные компьютерные и магнитно-резонансные томографы.

2. Для объективной количественной оценки степени деформации черепа рекомендуется использовать разработанный унифицированный алгоритм КТ-морфометрии с расчетом четырех ключевых показателей: цефалического индекса (ЦИ), индекса асимметрии свода черепа (ИАСЧ), фронтального угла (ФУ) и фронтального стеноза (ФС). Данный подход позволяет стандартизировать оценку и мониторинг эффективности хирургического лечения.

3. Для оценки церебральной гемодинамики и выявления скрытых перфузионных нарушений целесообразно включить в стандартный протокол МРТ динамической контрастной T2*-перфузии с последующим расчетом относительных показателей (rCBF, rCBV, rMTT, rTTP) в зонах максимальной компрессии мозга относительно интактных отделов.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Перспективным представляется изучение корреляции перфузионных параметров с показателями внутричерепного давления и отдаленными нейрокогнитивными исходами для разработки прогностических моделей.

Особое внимание следует уделить разработке автоматизированных алгоритмов обработки данных на основе машинного обучения для интеграции морфометрических и перфузионных показателей в единый диагностический комплекс.

Перспективным направлением является также изучение церебральной гемодинамики с применением функциональной МРТ в состоянии покоя для оценки функциональной связности мозга до и после операции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лукин, М.В. Возможности динамической контрастной МР-перфузии головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин, А.А. Медеников, Г.Е. Труфанов // Российский нейрохирургический журнал имени профессора А.Л. Поленова. – 2023. – Т. 15, № S1. – С. 123.
2. Лукин, М.В. Методика проведения динамической контрастной МР-перфузии головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин, А.А. Медеников, А.Ю. Ефимцев // Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов: сборник тезисов, «Человек и его здоровье», 2023. – С. 125-126.
3. Лукин, М.В. Динамическая контрастная МР-перфузия головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин, А.А. Медеников, А.Ю. Ефимцев // Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов: сборник тезисов, «Человек и его здоровье», 2023. – С. 127-128.
4. Лукин, М.В. Перфузионные изменения головного мозга у детей с краниосиностозами по данным магнитно-резонансной перфузии / М.В. Лукин, А.Ю. Ефимцев // Российский нейрохирургический журнал имени профессора А.Л. Поленова. – 2024. – Т. 16, – С. 87.
5. МР-диагностика в выявлении перфузионных изменений головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин // Научно-практический рецензируемый журнал Трансляционная медицина., Приложение 2. – 2024. – С. 89.
6. Оценка перфузионных нарушений головного мозга у детей с краниосиностозами методом магнитно-резонансной томографии / М.В. Лукин // Журнал «Ultravision in Medicine and Biology» Материалы XII междисциплинарного конгресса по заболеваниям органов головы и шеи. – Сборник тезисов. – 2024. – С. 60.
7. Нейротехнология визуализации перфузионных показателей головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин, А.Ю. Ефимцев, Г.Е. Труфанов // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Учения академика И.П. Павлова в современной системе нейронаук» – СПб., 2024. – С. 144-145.
8. Лукин, МВ. Перфузионная магнитно-резонансная томография головного мозга у детей с краниосиностозами / М. В. Лукин // Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов: Сборник тезисов. – Санкт-Петербург: «Человек и его здоровье», 2024. – С. 134. –
9. Лукин, М.В. Особенности методики магнитно-резонансной перфузии головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин // Актуальные проблемы

лучевой диагностики: Материалы Международной научно-практической конференции. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2024. – С. 126-130.

10. Лукин, М.В. Метод высокопольной магнитно-резонансной томографии в выявлении перфузионных нарушений головного мозга у детей с краниосиностозами / М. В. Лукин // Актуальные проблемы лучевой диагностики: Материалы Международной научно-практической конференции, Курск, 18 октября 2024 года. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2024. – С. 130-135.

11. Выявление перфузионных нарушений головного мозга у детей с краниосиностозами методом магнитно-резонансной томографии / М.В. Лукин // Научно-практический журнал «Университетская клиника». – Донецк. – 2024. – С. 541.

12. Динамическая контрастная магнитно-резонансная перфузия головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин, Я.А. Филин, А.В. Звездин [и др.] // **Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье. – 2024. – Т. 14, № 6. – С. 151-158.**

13. Лукин, М.В. Оценка показателей мозгового кровотока у детей с краниосиностозами методом магнитно-резонансной томографии / М.В. Лукин // Невский радиологический форум: Сборник тезисов XVI международного конгресса. – Санкт-Петербург: Балтийский медицинский образовательный центр, 2025. – С. 30-31.

14. Применение методики динамической контрастной МР-перфузии в оценке мозгового кровотока у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин // Научно-практическая конференция с международным участием «Лучевая диагностика: Смоленск-зима. – 2025». – С. 24.

15. Диагностика перфузионных нарушений головного мозга у детей с краниосиностозами методом магнитно-резонансной томографии / М.В. Лукин, Я.А. Филин, Д.А. Береговский [и др.] // **Известия Российской Военно-медицинской академии. – 2025. – Т. 44, № 2. – С. 127-134.**

16. Применение метода магнитно-резонансной томографии в выявлении перфузионных нарушений головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин // Российский нейрохирургический журнал имени профессора А.Л. Поленова. – 2025. – Т. 17. – С.16.

17. Лукин, М.В. Перспективы использования методики динамической контрастной МР-перфузии головного мозга у детей с краниосиностозами / М.В. Лукин // Радиология - 2025 : XIX Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов. – М.: ООО «МЕДИ Экспо», 2025. – С. 6.

18. Компьютерная и магнитно-резонансная томография в выявлении структурных и перфузионных изменений головного мозга у детей с краниосиностозами / И.С. Палеева, М.В. Лукин, Н.С. Гладышев [и др.] // **Медицинская визуализация.** – 2026. – Т. 30, № 1. – С. 20-32.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИАСЧ – индекс асимметрии свода черепа

КТ – компьютерная томография

МР – магнитно-резонансный (ая, ое, ые)

МРТ – магнитно-резонансная томография

ФС – фронтальный стеноз

ФУ – фронтальный угол

ЦИ – цефалический индекс

CBF – cerebral blood flow (скорость мозгового кровотока)

CBV – cerebral blood volume (объема мозгового кровотока)

MTT – mean transit time (среднее время транзита)

TTP – Time to peak (время до пика).

MPR (МПР) – Multiplanar reformation (мультипланарная реконструкция)