

Исследование температурного баланса головного мозга методом микроволновой радиотермометрии (обзор)

О. А. Шевелев^{1,2*}, М. В. Петрова^{1,2}, М. Ю. Юрьев¹, В. Т. Долгих¹,
Э. М. Менгисту^{1,2}, М. А. Жданова¹, И. З. Костенкова¹

¹ Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии,
Россия, 107031, г. Москва, ул. Петровка, д. 25, стр. 2

² Российский университет дружбы народов,
Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Для цитирования: О. А. Шевелев, М. В. Петрова, М. Ю. Юрьев, В. Т. Долгих, Э. М. Менгисту, М. А. Жданова, И. З. Костенкова. Исследование температурного баланса головного мозга методом микроволновой радиотермометрии. *Общая реаниматология*. 2023; 19 (1): 50–59. <https://doi.org/10.15360/1813-9779-2023-1-2129> [На русск. и англ.]

*Адрес для корреспонденции: Шевелев Олег Алексеевич, shevelev_o@mail.ru

Резюме

Цель обзора. Информировать врачей различных специальностей (анестезиологов-реаниматологов, неврологов, нейрохирургов, онкологов) о диагностических возможностях микроволновой радиотермометрии, позволяющей выявлять и анализировать особенности нарушений церебрального теплового баланса при повреждениях головного мозга.

Обзор содержит критический анализ информации 80 современных отечественных и зарубежных публикаций, находящихся в открытом доступе и найденных по ключевым словам.

В обзоре привели основные сведения о клинко-патофизиологических особенностях нарушений церебрального теплового баланса при повреждениях головного мозга. Подчеркнули пассивность и уязвимость механизмов регуляции церебрального термостатического гомеостаза, лежащих в основе развития различных уровней температурной гетерогенности коры больших полушарий в норме и при церебральных катастрофах. С патогенетических позиций постулировали концепцию о роли гипертермии в патогенезе повреждений головного мозга и процессах нарушения взаимосвязей в глобальных системах центральной регуляции. Привели доказательства связи между нарушением уровня сознания и степенью выраженности температурной гетерогенности коры больших полушарий. Подчеркнули, что существенное нарастание температурной гетерогенности с формированием очаговой гипертермии, сопровождается острейшим периодом ишемического инсульта, а в посткоматозных состояниях, повлекших развитие длительного нарушения сознания, температурная гетерогенность значимо понижается. Высказали предположение о том, что снижение повышенной и повышение сниженной температурной гетерогенности, например, с использованием температурных воздействий на кору больших полушарий, способно улучшить показатели уровня сознания у пациентов с поражениями головного мозга. Дали оценку диагностических возможностей различных технологий измерения церебральной температуры, включая микроволновую радиотермометрию (РТМ). Привели данные о достаточно высокой точности РТМ при измерении температуры коры больших полушарий в сравнении с инвазивными способами регистрации температуры мозга.

Заключение. С применением РТМ выявлена отчетливая суточная ритмика изменений температуры коры мозга у здоровых людей, грубо нарушающаяся при поражениях головного мозга. Поскольку РТМ является простым в исполнении, неинвазивным и объективным диагностическим инструментом, данную технологию целесообразно использовать в целях выявления скрыто протекающей церебральной гипертермии, для оценки уровня нарушения температурной гетерогенности, а также при исследовании циркадианной ритмики изменений температуры.

Ключевые слова: температурный баланс головного мозга; церебральные поражения; микроволновая радиотермометрия

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Microwave Radiothermometry in Evaluating Brain Temperature Changes (Review)

Oleg A. Shevelev^{1,2}, Marina V. Petrova^{1,2}, Mikhail Yu. Yuriev¹, Vladimir T. Dolgikh¹,
Elias M. Mengistu^{1,2}, Maria A. Zhdanova¹, Inna Z. Kostenkova¹

¹ Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology,
25 Petrovka Str., Bldg. 2, 107031 Moscow, Russia

² Peoples Friendship University of Russia,
6 Miklukho-Maclaya Str., 117198 Moscow, Russia

Summary

Aim. This review aims to inform physicians of different specialties (anesthesiologists, intensivists, neurologists, neurosurgeons, oncologists) about the diagnostic capabilities of microwave radiothermometry, which enables to identify and analyze features of alterations of cerebral temperature in brain damage.

The review displays a critical analysis of 80 recent Russian and foreign open access publications found by keywords.

The review presents major clinical features and pathophysiological mechanisms of cerebral thermal balance disruptions in brain lesions. Slow responsiveness and vulnerability of cerebral thermal homeostasis regulation mechanisms that underlie development of different temperature heterogeneity levels in the cerebral cortex in healthy brain and brain lesions are highlighted. The authors postulate their concept about the critical role of hyperthermia in the pathogenesis of brain damage and disruption of interconnections in the global central regulation system. A body of evidence explaining direct association between the depth of consciousness impairment and degree of cerebral cortex temperature heterogeneity manifestation is presented. It is emphasized that a significant increase in temperature heterogeneity with areas of focal hyperthermia accompanies an acute period of ischemic stroke, while in post-comatose state usually associated with prolonged impairment of consciousness, the temperature heterogeneity significantly subsides. It has been suggested that lowering of an increased and rising of the reduced temperature heterogeneity, for example by using temperature exposure, can improve altered level of consciousness in patients with brain damage. The diagnostic capabilities of various technologies used for cerebral temperature measurement, including microwave radiothermometry (MWR), are evaluated. Data on high accuracy of MWR in measurement of the cerebral cortex temperature in comparison with invasive methods are presented.

Conclusion. In healthy individuals MWR revealed a distinct daily rhythmic changes of the cerebral cortex temperature, and badly violated circadian rhythms in patients with brain lesions. Since MWR is an easy-to-perform, non-invasive and objective diagnostic tool, it is feasible to use this technology to detect latent cerebral hyperthermia and assess the level of temperature heterogeneity disruption, as well as to study the circadian rhythm of temperature changes.

Key words: *brain temperature balance; cerebral lesions; microwave radiothermometry; MWR*

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Read the full-text English version at www.reanimatology.com

Введение

Температура тела является важнейшим интегральным показателем общего состояния организма, его функциональной активности и состоятельности систем регуляции. Температурный гомеостаз теплокровных характеризуется весьма высокой термогетерогенностью, свойственной как отделам гомойотермного ядра, так и тепловой оболочке [1]. Температура поверхностных тканей в большой степени зависит от температуры окружающей среды, а в отделах теплового центра, включающего внутренние органы, спинной и головной мозг, различия в температуре определяются уровнем локальной метаболической активности и интенсивности кровотока, обеспечивающего элиминацию избытка теплоты во внешнюю среду [2]. Кровеносная система нивелирует градиенты внутренней температуры в наиболее крупных магистральных сосудах — в аорте и легочной артерии, до $37 \pm 0,1^\circ\text{C}$ в норме, в покое и в термонейтральных условиях, что не исключает внутриорганный термогетерогенность, наиболее ярко себя проявляющую в головном мозге [3].

Уровень церебрального кровотока определяется механизмами ауторегуляции и его изменения, обусловленные внутренними потребностями, оказываются относительно независимыми от системного кровообращения в известных пределах вариаций артериального давления [4]. Относительная независимость церебрального кровообращения от системного создает основы относительной независимости регуляции церебральной и базальной температуры, значения которых могут существенно различаться [5, 6].

Между глубокими и поверхностными структурами мозга, а также областями, вовлеченными в возбуждение и находящимися в относительном покое, разница температуры может достигать нескольких градусов [7].

Регистрация температуры является ценным инструментом диагностики и прогноза течения различных церебральных заболеваний [8]. При нейрогенной лихорадке часто развивается скрытая церебральная гипертермия, которая может не проявляться в повышении базальной температуры, что может стать причиной недооценки ее вклада в определение тяжести течения и исхода заболевания [9, 10]. Расстройства теплового баланса связаны с тяжестью повреждения головного мозга, и церебральная температура является важным маркером его повреждения [11, 12].

Применение термометрии головного мозга в клинической практике оказывается ограниченным в силу методических проблем. Использование инвазивных методик термометрии допустимо только у нейрохирургических пациентов. Это наиболее точный метод терморегистрации, однако имплантированные термодатчики дают представление о температуре только в области измерения и не позволяют оценить степень выраженности нарушений теплового баланса головного мозга в целом [13]. При инвазивной регистрации температуры используют не только терморезисторы, но и технологии применения датчиков регистрации радиоионизации [14], оптоволоконной техники [15], которые пока находятся в стадии разработки.

Наиболее современным и информативным методом является протонная ЯМР-спектроскопия [16], которая позволяет неинвазивно по-

лучить данные о температуре в объеме мозга, но данная технология трудозатратна и мало пригодна для мониторинга [17]. Ранее разработанный метод термоэнцефалоскопии, основанный на регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) кожи головы в инфракрасном диапазоне, позволяет выявить относительно разогретые и охлажденные области проекций коры головного мозга, но не дает представления об истинных значениях температуры [18]. Разработана радиометрическая термометрия с помощью датчиков, размещенных на коже лба, также требующая тщательной валидации [19].

Более простым в исполнении и информативным является метод регистрации температуры, основанный на определении мощности собственного ЭМИ глубоких тканей в СВЧ-диапазоне, — микроволновая радиотермометрия (РТМ) [20]. При РТМ локацию ЭМИ можно проводить в любой области тела и в различные промежутки времени [21, 22]. Это безопасный метод, не оказывающий какого-либо патогенного воздействия на пациента. В настоящее время он ограниченно применяется в исследовательских целях, для диагностики ряда заболеваний, сопровождающихся локальным повышением температуры [23] и для контроля глубины терапевтической гипотермии [24].

Цель обзора — информировать врачей различных специальностей (анестезиологов-реаниматологов, неврологов, нейрохирургов, онкологов) о диагностических возможностях микроволновой радиотермометрии, позволяющей выявлять и анализировать особенности нарушений церебрального теплового баланса при повреждениях головного мозга.

Микроволновая радиотермометрия в медицине

Первые микроволновые радиометры были созданы для радиоастрономии в середине XX в. [25], а принцип радиотермометрии вскоре был использован в медицине для ранней диагностики рака молочной железы [26].

В отличие от популярной инфракрасной термографии, позволяющей оценивать изменения температуры только поверхностных слоев кожи [27], измерение мощности собственного ЭМИ тканей человека в микроволновом диапазоне ($\lambda = 3\text{--}60$ см, частота 109–1010 Гц) дает возможность определить значения внутренней температуры.

В радиодиапазоне интенсивность излучения прямо пропорциональна температуре, поэтому, измерив мощность ЭМИ, зарегистрированного с помощью специальных антенн, располагаемых непосредственно на поверхности кожи биологического объекта, можно неинва-

зивно расчетным путем получить информацию о его внутренней температуре.

В медицинской литературе наибольшее распространение получили термины «радио-яркостная» и «внутренняя» температура, которые совпадают с истинной термодинамической температурой [28]. При расчете значений радиояркостной температуры учитывают показатели диэлектрической проницаемости тканей биологического объекта, которые обуславливают затухание распространения электромагнитной волны, определяя глубину измерения.

Ткани с низким содержанием воды характеризуются малой величиной диэлектрической проницаемости и малыми потерями мощности излучения. В этой связи оболочки головного мозга, плоские кости черепа, надкостница, апоневроз условно рассматривают как «радиопрозрачные» ткани, в наименьшей степени искажающие регистрируемые сигналы.

Ткани с большим содержанием воды (кровь, мышечная ткань, внутренние органы, кожа, вещество головного мозга) характеризуются большими значениями диэлектрической проницаемости и затухания сигнала [29].

Распространение излучения в биологических тканях зависит от его частоты: в частности, глубина измерения температуры внутренних тканей в сантиметровом диапазоне около 3 ГГц достигает 5–7 сантиметров. Точность измерения, проверенная в сопоставлении с имплантированными термодатчиками, составляет $\pm 0,2^\circ\text{C}$ [30].

Проведение РТМ с антенной диаметром около 30 мм позволяет регистрировать ЭМИ в объеме ткани, достигающем 1500–1800 мм³, а расчетные значения температуры соответствуют усредненной температуре во всем объеме. Имплантированные термодатчики дают сведения о температуре в значительно меньшем объеме ткани, с чем, по-видимому, связаны указанные расхождения в результатах.

В современных компьютеризированных устройствах, например, «РТМ-01-РЭС» (ООО «РТМ-Диагностика», Россия), предусмотрен автоматический расчет радиояркостной температуры, основанный на численном решении уравнения Максвелла [31]. Процедура измерения достаточно проста. Устанавливают антенну, плотно прижимая ее к поверхности кожи в проекции ткани или органа, температуру которых требуется измерить. В течение 3–5 сек проводят измерение и получают данные в «°C». Положение антенны можно последовательно менять, проводя измерения в определенных областях, получая профиль распределения внутренней температуры в разрешающей глубине локации.

РТМ в качестве диагностического и исследовательского инструмента приобретает все

большую популярность при исследовании температуры головного мозга [32, 33], а также при различных патологических процессах, которые манифестируют себя повышенным тепловыделением [34]. В частности, РТМ-технология успешно применяется для диагностики рака молочной железы и других злокачественных новообразований [28].

Поскольку воспаление является одним из ключевых звеньев возникновения, развития и прогрессирования атеросклеротических процессов, применение РТМ позволяет выявлять высокую температурную неоднородность в пораженных сонных артериях [35, 36]. Увеличение тепловыделения в очаге воспаления при пиелонефрите, почечнокаменной болезни и воспалительных заболеваниях предстательной железы обнаруживается при РТМ [37, 38]. РТМ может быть использована для ранней диагностики различных воспалительных процессов и для наблюдения за их динамикой [39], включая пневмонию при COVID-19 [40]. Корреляция между уровнем боли и результатами РТМ-исследования отмечена при диагностике мышечно-суставных расстройств, заболеваниях опорно-двигательного аппарата и головной боли при остеохондрозе шейного отдела позвоночника [41, 42].

Применение РТМ показало, что в условиях нормы и в покое температура коры мозга ниже базальной температуры, а при физических нагрузках ее температура повышается и оказывается выше аксиальной на 0,3–1,0°C. После легких черепно-мозговых травм (ЧМТ), полученных в поединках спортсменов-боксеров, формируются очаги фокальной гипертермии с температурой 37,5–39°C [43].

Особенности затухания распространения волн ЭМИ в тканях ограничивает разрешающую способность метода при регистрации температуры головного мозга, позволяя оценивать температуру только коры больших полушарий.

Регуляция церебрального температурного баланса

Температура головного мозга в большой степени определяется уровнем базальной температуры, однако механизмы церебральной терморегуляции имеют особенности, отличающие их от регуляции в других органах теплового центра организма. Высокий уровень теплопродукции и ограниченные пассивные пути теплоотведения создают условия для накопления теплоты в головном мозге, особенно ярко проявляющие себя при физической гипертермии, лихорадке и церебральной патологии [44, 45].

Масса головного мозга составляет около 2% от массы тела взрослого человека, а его

вклад в общую теплопродукцию организма достигает 20% в норме в покое [7]. Базовый церебральный метаболизм обеспечивается потреблением почти 20% всей глюкозы, кислорода и сердечного выброса [46].

Церебральный кровоток неоднороден, и для адекватного обеспечения серого вещества требуется около 80 мл крови на 100 г/мин, белого вещества ~20 мл/100 г/мин, при среднем гемодинамическом обеспечении всего мозга 50–65 мл/100 г/мин. При возбуждении церебральный кровоток может существенно увеличиваться, достигая 140 мл/100 г/мин, что обеспечивает возрастающие потребности в кислороде и субстрате, а также элиминацию избытка метаболической теплоты [47].

Температура притекающей к головному мозгу крови оказывается на 0,2–0,3°C ниже, чем в аорте, а оттекающей — на 0,2–0,3°C выше [48]. Охлаждение притекающей крови происходит за счет противоточного теплообмена, организованного плотными контактами внутренних сонных артерий и сосудов системы яремных вен, собирающих охлажденную во внешней среде кровь от слизистых оболочек верхних дыхательных путей и носоглотки, кожи головы и шеи. Кроме того, эмиссарные вены доставляют охлажденную кровь от кожи головы в синусы твердой мозговой оболочки непосредственно к поверхности мозга [49]. В результате этого поверхность коры головного мозга охлаждается, что защищает этот универсальный «биологический компьютер» от перегрева.

Мозговой кровоток в значительной степени компенсирует локальное выделение тепла в одних отделах мозга, усиливая ее накопление в других [50, 51]. Тепловыделение, сопровождающее возбуждение, — динамичный, но достаточно инертный процесс. Вызванный температурный ответ на сенсорную стимуляцию развивается с частотой около 0,005–0,008 Гц [52].

Любой возбуждающий процесс, сопровождая пищевое и половое поведение, эмоции, аффект, боль, сенсорную стимуляцию, повышает церебральную температуру, в первую очередь, коры головного мозга, обеспечивая нарастание температурной гетерогенности [53]. Радиальные и межполушарные градиенты в период возбуждения могут достигать 1,5–2,5°C [54].

Использование в экспериментах имплантированных термодатчиков позволило выявить существенные различия церебральной и базальной температуры, причем температура подкорковых структур оказывается выше температуры тела на 0,1–0,5°C с наибольшими значениями в гиппокампе [53, 55, 56]. По данным протонной ЯМР-спектроскопии, у здоровых людей температура коры оказывается ниже тем-

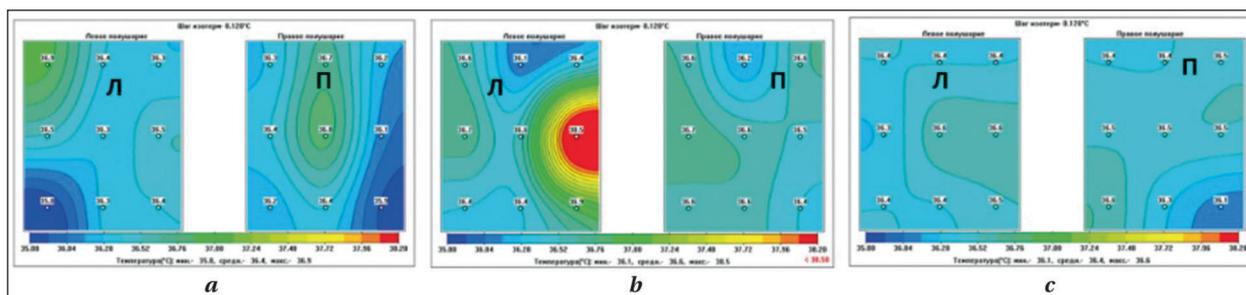


Рис. Примеры карт распределения температуры в коре левого (Л) и правого (П) полушарий здорового индивидуума в покое (а), пациента в первые сутки развития ишемического инсульта (b) и пациента в хроническом критическом состоянии (с) [69].

пературы полости рта, барабанной перепонки и кожи над височной артерией [57]. При сопоставлении теоретических моделей с данными клинических и экспериментальных исследований показана отчетливая зависимость процессов тепловыделения и накопления тепла от интенсивности локального кровообращения [58].

При черепно-мозговой травме, ишемических и геморрагических инсультах часто развивается нейтрогенная лихорадка, которая может протекать скрыто без изменений базальной температуры, ухудшая прогноз и исходы заболевания [59–61]. При ЧМТ температура мозга оказывается выше базальной на 1–3°C [62].

Тепловая реакция мозга на повреждение инициируется реакциями эксайтотоксичности и развитием локального нейтрогенного воспаления. Высвобождение провоспалительных цитокинов в области повреждения, действуя на нейроны центров терморегуляции гипоталамуса, обеспечивает коррекцию «set point», перестраивая термостат организма на более высокий уровень регуляции [63, 64].

Уязвимость механизмов поддержания теплового гомеостаза мозга связана со многими факторами. Головной мозг имеет форму, близкую к шарообразной, что способствует накоплению теплоты, а его положение в полости черепа, термоизолирующего от внешней среды, ухудшает условия теплоотдачи. Энергичность общего и локального кровотока определяется не нарастанием температуры, а внутренними потребностями, связанными с возбуждением. То есть мозг не имеет активных механизмов терморегуляции. Пути пассивного охлаждения поверхности мозга за счет притока крови по эмиссарным венам не способны адекватно компенсировать рост тепловыделения, а температура мозга не влияет на реакции системного кровообращения, участвующие в терморегуляции.

Структурная, функциональная и гемодинамическая гетерогенность мозга лежит в основе его температурной гетерогенности, изменения которой могут свидетельствовать о развитии и тяжести патологического процесса.

Температурная гетерогенность мозга при церебральной патологии

Применение протонной ЯМР-спектроскопии при инфаркте головного мозга позволило обнаружить нарастание температурной гетерогенности между областью ишемического поражения и симметричными отделами контралатерального полушария [17]. Диагностическую информацию несут не только абсолютные значения температуры, но и суточная динамика их изменений, которая нарушается при инсульте [65] и тяжелых ЧМТ [66], что показано с использованием имплантируемых термодатчиков.

Исследование суточной динамики, температурной гетерогенности и особенностей распределения температуры по поверхности головного мозга можно проводить при помощи микроволновой РТМ. В частности, при использовании РТМ показано, что для здоровых людей характерна отчетливая 24-часовая ритмика изменений температуры коры мозга с максимальными значениями в 12–16 ч и минимальными в 0–6 ч. Корреляционный анализ позволили выявить сильные положительные связи изменений температуры левого и правого полушарий, тогда как между суточными вариациями температуры коры мозга и базальной температуры были характерны положительные связи средней силы, что подчеркивает относительную независимость регуляции температуры мозга и тела [67]. У пациентов с последствиями тяжелых повреждений головного мозга, повлекшие развитие состояний хронического нарушения сознания (ХНС) — вегетативного состояния (ВС) и состояния минимального сознания (СМС) суточная динамика температуры коры мозга отсутствовала, отражая, по-видимому, грубые поражения церебральных структур, включая центральные циркадианные осцилляторы [68].

Для исследования температурной гетерогенности разработана методика последовательной регистрации температуры в 9 симметричных областях коры больших полушарий слева и справа (18 областей регистрации), которая позволяет

построить карты распределения температуры поверхности головного мозга (рисунок) [69].

Исследования проведены у здоровых лиц в состоянии покоя, у пациентов в острейшем периоде ишемического инсульта и у пациентов с ХНС, развившимися после грубых поврежденных головного мозга (ВС и СМС) [70].

Этими исследованиями установлено, что у здоровых лиц в состоянии покоя температура коры головного мозга неоднородна, имеются области с относительно повышенной температурой до 36,7–37,4°C и сниженной — до 35,8–36,3°C, а усредненная температура левого и правого полушария не отличается, составляя в среднем 36,4–36,7°C. Максимальная разница между относительно разогретыми и холодными областями (ΔT) не превышает 2,0–2,5°C, а их топография варьирует индивидуально и может быть ситуационно обусловлена.

У пациентов в первые сутки ишемического инсульта вне зависимости от области формирования инфаркта мозга усредненная температура правого и левого полушарий повышается до 37,9–38,0°C. При этом церебральная гипертермия у трети пациентов развивается при нормальной базальной температуре, то есть протекает скрыто. Формируется фокальная гипертермия с очагами повышенной до 39–41°C температурой. ΔT между «разогретыми» и «холодными» областями резко нарастает, отражая выраженную температурную гетерогенность. Пациенты, у которых ΔT была больше 3–4°C, погибали в течение 7–10 дней, что позволяет рассматривать повышенную температуру мозга и выраженную температурную гетерогенность, как предикторы неблагоприятного исхода заболевания [71].

Развитие состояний ХНС после выхода из комы [72] сопровождается снижением нейрональной активности, расстройствами метаболизма и формированием низкой гемодинамической обеспеченности головного мозга. Эти процессы способны изменить церебральный тепловой баланс. У данной категории пациентов, при близких к нормальным значениям усредненной температуры коры головного мозга, ΔT оказывается меньше 2°C, что свидетельствует о невысокой температурной гетерогенности.

При проведении корреляционного анализа между значениями температуры симметричных областей коры левого и правого полушарий у здоровых людей, пациентов в острейшем периоде развития ишемического инсульта и у пациентов с ХНС были выявлены существенные различия. Так, оказалось, что для здоровых индивидуумов характерно наличие положительных статистически значимых связей средней силы между симметричными отделами коры

левого и правого полушарий при коэффициентах корреляции (КК), варьирующих в пределах от 0,504 до 0,747.

У пациентов в первые сут острой фокальной ишемии головного мозга характер взаимосвязей температуры симметричных областей коры мозга существенно менялся. КК широко варьировали от отрицательных (–0,370) до положительных (0,848) значений, свидетельствуя о нарастании межполушарной температурной гетерогенности.

Корреляционный анализ связей температуры мозга в симметричных областях коры больших полушарий у пациентов с ХНС показал, что КК находятся в узких пределах от 0,971 до 0,947, отражая наличие сильных положительных связей и монотонность распределения температуры по коре больших полушарий.

В соответствии с теорией о функциональных биологических системах, разработанной П. К. Анохиным [73], элементы эффективно функционирующей системы объединены связями средней силы, что обеспечивает широкие возможности приспособления за счет варибельности адаптивных реакций, формируемых совокупностью элементов системы. Адаптивный резерв системы при установлении сильных (жестких) связей между ее элементами снижается за счет ограничения варибельности реакций и сильной взаимозависимости, а сверхсильные воздействия на систему и составляющие ее элементы могут привести к разрыву связей между ними и «слому» системы. В свою очередь, ослабление и изменение направленности взаимосвязей между элементами системы ее разрушают, приводят к прекращению деятельности как целого.

Чрезмерное нарастание межполушарной температурной гетерогенности и, напротив, ее снижение, демонстрируя нарушения связей между элементами системы, в данном случае между симметричными областями коры больших полушарий, сопровождают грубые повреждения головного мозга и состояния понижения уровня сознания, что оказалось характерным, для острейшего периода ишемического инсульта и посткоматозных состояний с развитием ХНС.

Типовой характер изменения температурной гетерогенности прослеживается и у пациентов с психиатрическими заболеваниями. В частности, у пациентов с шизофренией низкая температурная гетерогенность коры больших полушарий была ассоциирована с повышением в крови активности воспалительных маркеров крови и, в большинстве случаев, с положительным ответом пациентов на терапию. Высокая температурная гетерогенность коры мозга оказалась характерна для пациентов с недостаточ-

ной активностью протеолитической системы воспаления и высоким уровнем антител к антигенам мозга. У данных пациентов заболевание протекало тяжелее и в большинстве случаев наблюдали резистентность к проводимой терапии [74]. Позитивные результаты терапии у пациентов с шизофренией, острой фокальной церебральной ишемией и в ХНС сопровождались, соответственно, повышением сниженной и снижением повышенной температурной гетерогенности коры больших полушарий.

Особенности регуляции температурного гомеостаза, несмотря на солидную историю исследований, продолжают оставаться во многом неизученными. Получены новые интересные данные о том, что температура подкорковых структур мозга в норме и при ЧМТ может варьировать в широких пределах, а диагностическое значение имеют не только абсолютные значения, но и циркадианные колебания церебральной температуры, причем нарушения суточной динамики является предиктором значительного увеличения шансов гибели пациентов с тяжелой ЧМТ [75].

Патогенетическая роль церебральной гипертермии, а также часто встречающегося скрытое течение нейрогенной лихорадки, подчеркивает значение применения термометрии для диагностики, характера течения и прогнозирования исхода тяжелой церебральной патологии, а микроволновая РТМ оказывается наиболее удобной, простой, безопасной и информативной технологией.

В свою очередь, нарастание или снижение температурной гетерогенности, наблюдающиеся при тяжелых повреждениях головного мозга,

могут не только сопровождать развитие патологического процесса, но и быть одним из звеньев патогенеза, участвующих в нарушениях отношений элементов в глобальных системах центральной регуляции. Это позволяет предположить, что, понизив высокий уровень термогетерогенности или повысив сниженный, можно добиться позитивного клинического результата. Данное предположение подтверждается клиническими наблюдениями, в которых показано, что селективное краниocereбральное охлаждение, обеспечивая коррекцию нарушенный температурного баланса и снижая уровень температурной гетерогенности у пациентов в остром периоде ишемического инсульта, способствует снижению неврологического дефицита, в первую очередь, за счет повышения уровня сознания [76].

Заключение

РТМ-технология может оказаться полезным инструментом в диагностике различных церебральных заболеваний, включая острые и хронические нарушения кровоснабжения и травмы мозга, невротические и психотические расстройства, снижение уровня сознания и когнитивных функций.

Микроволновая РТМ — сравнительно новый метод неинвазивной оценки температуры глубоких тканей, до настоящего времени применяемый в основном с научными целями. Однако, накопленный опыт позволяет перспективно оценить его диагностические возможности, что, безусловно, требует проведение дополнительных углубленных клинико-патологических исследований.

Литература

1. Tan C.L., Zachary A. Knight. Regulation of body temperature by the nervous system *Neuron*. 2018; 98 (1): 31–48. DOI: 10.1016/j.neuron.2018.02.022. PMID: 29621489.
2. Osilla E.V., Marsidi J.L., Sharma S. Physiology, temperature regulation. In: *StatPearls [Internet]*. 2021. PMID: 29939615. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507838/>.
3. Шевелев О.А., Смоленский А.В., Петрова М.В., Юрьев М.Ю., Жданова М.А., Менгисту Э.М., Костенкова И.З. Механизмы низкотемпературных реабилитационных технологий. Спортивная черепно-мозговая травма. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2022; 4 (1): 4–13. DOI: 10.36425/rehab88833. [Shevelev O.A., Smolensky A.V., Petrova M.V., Yuryev M.Yu., Zhdanova M.A., Mengistu E.M., Kostenkova I.Z. Mechanisms of low-temperature rehabilitation technologies. *Sports traumatic brain injury. Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation / Fizicheskaya i Reabilitatsionnaya Medicina, Meditsinskaya Reabilitatsiya*. 2022; 4 (1): 4–13. (in Russ.). DOI: 10.36425/rehab88833].
4. Александрова Е.В., Ошоров А.В., Сычев А.А., Полупан А.А., Захарова Н.Е., Крюкова К.К., Баталов А.И., Савин И.А., Кравчук А.Д., Потанов А.А. Ауторегуляция мозгового кровотока при тяжелом диффузном аксональном повреждении головного мозга: роль нейроанатомических факторов. *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2018; 82 (3): 5–14. DOI 10.17116/neiro20188235. [Alexandrova E.V., Oshorov A.V., Sychev A.A., Polupan A.A., Zakharova N.E., Kryukova K.K., Batalov A.I., Savin I.A., Kravchuk A.D., Potapov A.A. Autoregulation of cerebral blood flow in severe diffuse axonal brain injury: the role of neuroanatomic factors. *Burdenko's Journal of Neurosurgery / Zhurnal Voprosy Neirokhirurgii Imeni N.N. Burdenko*. 2018; 82 (3): 5–14. (in Russ.). DOI 10.17116/neiro20188235].
5. Wang H., Kim M., Normoyle K.P., Llano D. Thermal regulation of the brain—an anatomical and physiological review for clinical neuroscientists. *Front Neurosci*. 2016; 9: 528. DOI: 10.3389/fnins.2015.00528. PMID: 26834552.
6. Addis A., Gaasch M., Schiefecker F., Kofler M., Ianosci B., Rass V., Lindner A., Broessner G., Beer R., Pfausler B., Thomé C., Schmutzhard E., Helbok R. Brain temperature regulation in poor-grade subarachnoid hemorrhage patients — a multimodal neuromonitoring study. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2021; 41 (2): 359–368. DOI: 10.1177/0271678X20910405. PMID: 32151225.
7. Wang H., Wang B., Normoyle K.P., Jackson K., Spittle K., Sharrock M.F., Miller C.M., Best C., Llano D., Du R. Brain temperature and its fundamental properties: a review for clinical neuroscientists. *Front Neurosci*. 2014; 8: 307. DOI: 10.3389/fnins.2014.00307. PMID: 25339859.
8. Понугаев К.А., Ошоров А.В., Троицкий А.П., Савостьянов М.Ю., Лубнин А.Ю. Рекомендации по управлению температурой тела в нейрореанимации. *Вестник интен-*

- сивной терапии. 2015; 2: 17–23. [Popugaev K.A., Oshorov A.V., Troitsky A.P., Savostyanov M.Yu., Lubnin A.Yu. Recommendations for managing body temperature in neuro-intensive care. *Bulletin of Intensive Care/Vestnik Intensivnoy Terapii*. 2015; 2: 17–23. (in Russ.)].
9. Попугаев К.А., Солодов А.А., Сурыахин В.С., Тюрин И.Н., Петриков С.С. Управление температурой в интенсивной терапии: актуальные вопросы. *Анестезиология и реаниматология*. 2019; 3: 43–55. DOI.org/10.17116/anaesthesiology201903143. [Popugaev K.A., Solodov A.A., Suryakhin V.S., Tyurin I.N., Petrikov S.S. Temperature management in intensive care: relevant issues. *Anesteziol./Reanimatol./Anesteziologiya i Reanimatologiya*. 2019; 3: 43–55. (in Russ.). DOI.org/10.17116/anaesthesiology201903143].
 10. Fountas K.N., Kapsalaki E.Z., Feltes C.H., Smisson 3rd H.F., Johnston K.W., Grigorian A., Robinson Jr. J.S. Disassociation between intracranial and systemic temperatures as an early sign of brain death. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2003; 15 (2): 87–89. DOI: 10.1097/00008506-200304000-0000. PMID: 12657992.
 11. Fleischer C.C., Wu J. Qiu D., Park S-E, Nahab F., Dehkharghani S. The brain thermal response as a potential neuroimaging biomarker of cerebrovascular impairment. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2017; 38 (11): 2044–2051. DOI: 10.3174/ajnr.A5380. PMID: 28935624.
 12. Ошоров А.В., Полупан А.А., Сычев А.А., Баранич А.И., Курдюмова Н.В., Абрамов Т.А., Савин И.А., Потанов А.А. Влияние церебральной гипертермии на внутричерепное давление и ауторегуляцию мозгового кровотока у пациентов с острой церебральной патологией. *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2021; 85 (1): 68–77. DOI: 10.17116/neiro20218501168. [Oshorov A.V., Polupan A.A., Sychev A.A., Baranich A.I., Kurdyumova N.V., Abramov T.A., Savin I.A., Potanov A.A. Influence of cerebral hyperthermia on intracranial pressure and autoregulation of cerebral circulation in patients with acute brain injury. *Burdenko's Journal of Neurosurgery / Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N.N. Burdenko*. 2021; 85 (1): 68–77. (in Russ.). DOI: 10.17116/neiro20218501168].
 13. Izhar U., Piyathilaka L., Preethichandra D.M.G. Sensors for brain temperature measurement and monitoring — a review. *Neuroscience Informatics*. 2022; 2 (4): 100–106. DOI: 10.1016/j.neuri.2022.100106.
 14. Stauffer P., Snow B. W., Rodrigues D. B., Salahi S., Oliveira T.R., Reudink D., Maccarini P.F. Non-invasive measurement of brain temperature with microwave radiometry: demonstration in a head phantom and clinical case. *Neuroradiol J*. 2014; 27 (1): 3–12. DOI: 10.15274/NRJ-2014-10001. PMID: 24571829.
 15. Musolino S., Schartner E.P., Tsiminis G., Salem A., Monro T.M., Hutchinson M.R. Portable optical fiber probe for in vivo brain temperature measurements. *Biomed Opt Express*. 2016; 7 (8): 3069–3077. DOI: 10.1364/BOE.7.003069. PMID: 27570698.
 16. Karaszewski B., Wardlaw J.M., Marshall I., Cvorov V., Wartolowska K., Haga K., Armitage P.A., Bastin M.E., Dennis M.S. Measurement of brain temperature with magnetic resonance spectroscopy in acute ischemic stroke. *Ann Neurol*. 2006; 60 (4): 438–446. DOI: 10.1002/ana.20957. PMID: 16972284.
 17. Ishida T., Inoue T., Inoue Tomoo, Endo T., Fujimura M, Niizuma K., Endo H., Tominaga T. Brain temperature measured by magnetic resonance spectroscopy to predict clinical outcome in patients with infarction. *Sensors (Basel)*. 2021; 21 (2): 490. DOI: 10.3390/s21020490. PMID: 33445603.
 18. Shevelev I. A. Functional imaging of the brain by infrared radiation (thermoencephalography). *Prog Neurobiol*. 1998; 56 (3): 269–305. DOI: 10.1016/s0301-0082 (98)00038-0. PMID: 9770241.
 19. Horn M., Diprose W.K., Pichardo S., Demchuk A., Almekhlafi M. Non-invasive brain temperature measurement in acute ischemic stroke. *Front Neurol*. 2022; 13: 889214. DOI: 10.3389/fneur.2022.889214. PMID: 35989905.
 20. Куликов Е. П., Демко А. Н., Волков А. А., Буданов А. Н., Орлова Н. С. Диагностические возможности современной радиотермометрии в онкомаммологической практике. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*. 2021; 4 (29): 532–538. DOI: 10.17816/PAVLOVJ70596. [Kulikov E. P., Demko A. N., Volkov A. A., Budanov A. N., Orlova N. S. Diagnostic potentials of modern radiothermometry in oncomammological practice. *I P Pavlov Russian Medical Biological Herald/ Rossiyskiy Medico-Biologicheskii Vestnik imeni Akademika I.P. Pavlova*. 2021; 4 (29): 532–538. DOI: 10.17816/PAVLOVJ70596].
 21. Losev A.G., Levshinskiy V.V. Data mining of microwave radiometry data in the diagnosis of breast cancer. *Mathematical Physics and Computer Simulation*. 2017; 5 (20): 49–62. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2017.5.6.
 22. Levshinskii V.V. Mathematical models for analyzing and interpreting microwave radiometry data in medical diagnosis. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2021; 8 (1): 3–12. DOI: 10.14529/jcem210101.
 23. Поляков М.В., Попов И.Е., Лосев А.Г., Хоперсков А.В. Применение результатов компьютерного моделирования и методов машинного обучения при анализе данных микроволновой радиотермометрии. *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2021; 24 (2): 27–37. [Polyakov M. V., Popov I. E., Losev A. G., Khoperskov A. V. Application of computer simulation results and machine learning in the analysis of microwave radiothermometry data. *Mathematical Physics and Computer Simulation/Matematicheskaya Fizika i Kompyuternoye Modelirovanie*. 2021; 24 (2): 27–37. (in Russ.).] DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2021.2.3
 24. Petrikov S.S., Ramazanov G.R., Cheboksarov D.V., Ryzhova O.V., Artyukov O.P. Therapeutic hypothermia controlled by microwave radiothermometry in a hemorrhagic stroke patient. *Bulletin of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery/Vestnik Neurologii, Psykhiatrii i Neurokhirurgii*. 2022; 9. (in Russ.). DOI: 10.33920/med-01-2209-07. [Петриков С.С., Рамазанов Г.Р., Чебоксаров Д.В., Рыжова О.В., Артюков О.П. Использование гипотермии под контролем микроволновой радиотермометрии у больного с геморрагическим инсультом. *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии*. 2022; 9].
 25. Chelton D.B., Wentz F. J. Global microwave satellite observations of sea surface temperature for numerical weather prediction and climate research. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2005; 86 (8): 1097–1116. DOI: 10.1175/BAMS-86-8-1097. Corpus ID: 67820063.
 26. Barrett A.H., Myers P.C. Subcutaneous temperatures: a method of noninvasive sensing. *Science*. 1975; 190 (4215): 669–671. DOI: 10.1126/science.1188361. PMID: 1188361.
 27. Кожневникова И.С., Панков М.Н., Грибанов А.В., Старцева Л.Ф., Ермошина Н.А. Применение инфракрасной термографии в современной медицине (обзор литературы). *Экология человека*. 2017; 24 (2): 39–46. DOI: 10.33396/1728-0869-2017-2-39-46. [Kozhevnikova I.S., Pankov M.N., Gribanov A.V., Startseva L.F., Ermoshina N.A. Application of infrared thermography in modern medicine (literature review). *Human ecology/ Ekologiya Cheloveka*. 2017; 24 (2): 39–46. DOI: 10.33396/1728-0869-2017-2-39-46].
 28. Vesnin S., Turnbull A., Dixon M., Goryanin I. Modern microwave thermometry for breast cancer. *MCB Molecular and Cellular Biomechanics*. 2017; 7 (2): 1–6. DOI: 10.4172/2155-9937.1000136. Corpus ID: 25392400.
 29. Gabriel C. Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies. Report N.AL/OE-TR-1996-0037. Occupational and environmental health directorate, Radiofrequency Radiation Division. Brooks Air Force Base, Texas (USA). 1996: 21. DOI: 10.21236/ada303903. Corpus ID: 108808148.
 30. Levick A.P., Land D.V., Hand J. Validation of microwave radiometry for measuring the internal temperature profile of human tissue. *Measurement Science and Technology*. 2011; 22 (6): 065801. DOI: 10.1088/0957-0233/22/6/065801. Corpus ID: 119991697.
 31. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Математическое моделирование собственного излучения тканей человека в микроволновом диапазоне. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2010; 9: 33–43. eLIBRARY ID: 15500444. [Vesnin S.G., Sedankin M.K. Mathematical modeling of self-radiation

- of human tissues in the microwave range. *Biomedical Radioelectronics/Biomeditsinskaya Radioelectronica*. 2010; 9: 33–43. (in Russ.). eLIBRARY ID: 15500444].
32. Gudkov G., Leushin V.Yu., Sidorov I.A., Vesnin S.G., Porokhov I.O., Sedankin M.K., Agasieva S.V., Chizhikov S.V., Gorlacheva E.N., Lazarenko M.I., Shashurin V.D. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain. *Biomedical Engineering*. 2019; 53 (3): 108–111. DOI: 10.1007/s10527-019-09887-z.
 33. Groumpas E., Koutsoupidou M., Karanasiou I. Real-time passive brain monitoring system using near-field microwave radiometry. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*. 2020; 67 (1): 158–165. DOI: 10.1109/TBME.2019.2909994.
 34. Мазепа Е.А., Гришина О.В., Левицкий В.В., Сулейманова Х. М. Об унификации метода анализа данных микроволновой радиотермометрии. *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2017; 20 (6): 38–50. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2017.6.4. [Mazepa E.A., Grishina O.V., Levshinsky V.V., Suleymanova H. M. The unification of microwave radio thermometry method. *Mathematical Physics and Computer Simulation/Matematicheskaya fizika i Kompyuternoye Modelirovaniye*. 2017; 20 (6): 38–50. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2017.6.4].
 35. Toutouzas K., Benetos G., Drakopoulou M., Deligianni C., Spengos K., Stefanadis C., Siores E., Tousoulis D. Incremental predictive value of carotid inflammation in acute ischemic stroke. *Stroke*. 2015; 46 (1): 272–274. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.007526. PMID: 25370590.
 36. Toutouzas K., Benetos G., Oikonomou G., Barampoutis N., Koutagiar I., Galanakis S., Karpalioti M., Drakopoulou M., Stathogiannis K., Bounas P., Gata V., Antoniadou F., Davlouros P., Alexopoulos D., Hahalis G., Siores E., Sfrikakis P.P., Tousoulis D. Increase in carotid temperature heterogeneity is associated with cardiovascular and cerebrovascular events. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2018; 11 (11): e008292. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.118.008292. PMID: 30571323.
 37. Авдошин В.П., Андрюхин М.И., Ширшов В.Н. Глубинная радиотермометрия в диагностике и оценке эффективности лечения урологических заболеваний. М.: Изд. ассоциация «Квантовая медицина»; 2007: 209. [Avdoshin V.P., Andriukhin M.I., Shirshov V.N. Deep radiothermometry in the diagnosis and evaluation of the effectiveness of urological diseases therapy. М.: Publishing house of the «Quantum Medicine» Association; 2007: 209. (in Russ.)].
 38. Kaprin A., Kostin A., Andryukhin M., Ivanenko K. V., Popov S., Shegay P., Kruglov D. P., Mangutov F. Sh., Leushin V.Yu., Agasieva S. Microwave radiometry in the diagnosis of various urological diseases. *Biomedical Engineering*. 2019; 53 (2): 87–91. DOI: 10.1007/s10527-019-09883-3.
 39. Stauffer P.R., Maccarini, P.F., Arunachalam K., De Luca V., Salahi S., Boico A., Klemetsen O., Birkelund Y., Jacobsen S.K., Bardati F., Tognolatti P., Snow B. Microwave radiometry for non-invasive detection of vesicoureteral reflux (VUR) following bladder warming. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*. 2011; 7901: 7901V. DOI: 10.1117/12.875636. PMID: 22866211.
 40. Osmonov B., Ovchinnikov L., Galazis C., Emilov B., Karabragimov M., Seitov M., Vesnin S., Mustafin C., Kasymbekov T., Goryanin I. Passive microwave radiometry (MWR) for diagnostics of COVID-19 lung complications in Kyrgyzstan. *Diagnostics* 2020, 10. DOI: 10.1101/2020.09.29.20202598. Corpus ID: 222066381.
 41. Goryanin I., Karbainov S., Tarakanov A.V. Shevelev O., Redpath K., Vesnin S., Ivanov Yu. Passive microwave radiometry in biomedical studies. *Drug Discovery Today*. 2020; 25 (4). DOI: 10.1016/j.drudis.2020.01.016.
 42. Tarakanov A.V., Tarakanov A.A., Vesnin S.G., Efremov V.V., Goryanin I., Roberts N. Microwave radiometry (MWR) temperature measurement is related to symptom severity in patient with low back pain (LBP). *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2021; 26: 548–552. DOI: 10.1016/j.jbmt.2021.02.005.
 43. Смоленский А. В Шевелев О. А., Тарасов А. В., Мирошников А. Б., Кузовлева Е. В., Хусайнов З. М. Оптимизация постнагрузочного восстановления в боксе. Мат-лы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти профессора, д-ра. пед. наук, ЗМС СССР, ЗТ СССР, К.В. Градополова «Теория и методика ударных видов спортивных единоборств». 27 мая 2021 г. М.; 2021: 100–105. [Smolensky A.V., Shevelev O.A., Tarasov A.V., Miroshnikov A. B., Kuzovleva E.V., Khusyainov Z.M. Optimization of post-workout recovery in box athletes. Materials of the all-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the memory of Professor, Doctor of Pedagogical Sciences, Merited Sports Master of the USSR, Trainer Emeritus of the USSR, K.V. Gradopolov «Theory and methodology of striking martial arts». May 27, 2021. М.; 2021: 100–105].
 44. Busto R., Deitrich W.D., Globus M.Y., Valdés I., Scheinberg P., Ginsberg M.D. Small differences in intraschismic brain temperature critically determine the extent of ischemic neuronal injury. *J Cereb Blood Flow Metab*. 1987; 7 (6): 729–738. DOI: 10.1038/jcbfm.1987.127. PMID: 3693428.
 45. Ruborg R., Gunnarsson K., Ström J.O. Predictors of post-stroke body temperature elevation. *BMC Neurology*. 2017; 17: 218. DOI: /10.1186/ s12883-017-1002-3.
 46. Mrozek S., Vardon F., Geeraert T. Brain temperature: physiology and pathophysiology after brain injury. *Anaesthesiol Res Pract*. 2012; 2012: 989487. DOI: 10.1155/2012/989487. PMID: 23326261.
 47. Sung D., Kottke P.A., Risk B.B., Allen J.W., Nahab F., Fedorov A.G. Personalized predictions and non-invasive imaging of human brain temperature. *Communications Physics*. 2021; 4: 68. DOI: 10.1038/s42005-021-00571-x.
 48. Nybo L. Brain temperature and exercise performance. *Exp Physiol*. 2012; 97 (3): 333–339. DOI: 10.1113/expphysiol.2011.062273. PMID: 22125311.
 49. Cabanac M., Brinnet H. Blood flow in the emissary veins of the human head during hyperthermia. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1985; 54 (2): 172–176. DOI: 10.1007/BF02335925. PMID: 4043044.
 50. McElligott J.G., Melzack R. Localized thermal changes evoked in the brain by visual and auditory stimulation. *Exp Neurol*. 1967; 17 (3): 293–312. DOI: 10.1016/0014-4886 (67)90108-2. PMID: 6019262.
 51. Rango M., Bonifati C., Bresolin N. Post-activation brain warming: a 1-H MRS thermometry study. *PLoS ONE*. 2015; 10 (5): e0127314. DOI: 10.1371/journal.pone.0127314. PMID: 26011731.
 52. Li C., Narayan R.K., Wang P., Hartings J.A. Regional temperature and quantitative cerebral blood flow responses to cortical spreading depolarization in the rat. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2017; 37 (5): 1634–1640 DOI: 10.1177/0271678X16667131. PMID: 27581720.
 53. Kiyatkin A.E. Brain temperature homeostasis: physiological fluctuations and pathological shifts. *Front Biosci (Landmark Ed)*. 2010; 15 (1): 73–92. DOI: 10.2741/3608. PMID: 20036808.
 54. Maloney S.K., Mitchell D., Mitchell G., Fuller A. Absence of selective brain cooling in unrestrained baboons exposed to heat. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2007; 292 (5): R2059–2067. DOI: 10.1152/AJPREGU.00809.2006. PMID: 17218437.
 55. Kiyatkin E.A. Brain temperature: from physiology and pharmacology to neuropathology. *Handb Clin Neurol*. 2018; 157: 483–504. DOI: 10.1016/B978-0-444-64074-1.00030-6. PMID: 30459022.
 56. Kiyatkin E.A. Brain temperature and its role in physiology and pathophysiology: Lessons from 20 years of thermorecording. *Temperature (Austin)*. 2019; 6 (4): 271–333. DOI: 10.1080/23328940.2019.1691896. PMID: 31934603.
 57. Childs C., Hiltunen Y., Vidyasagar R., Kauppinen R.A. Determination of regional brain temperature using proton magnetic resonance spectroscopy to assess brain-body temperature differences in healthy human subjects. *Magn Reson Med*. 2007; 57 (1): 59–66. DOI: 10.1002/mrm.21100. PMID: 17139620.
 58. Sukstanskii A.L., Yablonskiy D.A. Theoretical model of temperature regulation in the brain during changes in functional activity. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2006; 103 (32): 12144–12149. DOI: 10.1073/pnas.0604376103. PMID: 16880401.
 59. Garg M., Gdrg K., Singh P.K., Satyrthee G.D., Agarwal D., Mahapatra A.K., Sharma B.S. Neurogenic fever in severe traumatic brain injury treated with propranolol: a case report. *Neurol*

- India. 2019; 67 (4): 1097–1099. DOI: 10.4103/0028-3886.266258. PMID: 31512644.
60. Meier K., Lee K. Neurogenic fever. *J Intensive Care Med.* 2017; 32 (2): 124–129. DOI: 10.1177/0885066615625194. PMID: 26772198.
 61. Childs, C., Lunn, K.W. Clinical review: brain-body temperature differences in adults with severe traumatic brain injury. *Crit Care.* 2013; 17 (2): 222. DOI: 10.1186/cc11892. PMID: 23680353.
 62. Oh J-J., Jo K., Joo W., Yoo D-S., Park H. Temperature difference between brain and axilla according to body temperature in the patient with brain injury. *Korean J Neurotrauma.* 2020; 16 (2): 147–156. DOI: 10.13004/kjnt.2020.16.e40. PMID: 33163422.
 63. Goyal K., Garg N., Bithal P. Central fever: a challenging clinical entity in neurocritical care. *J Neurocrit Care.* 2020; 13 (1): 19–31. DOI: 10.18700/jnc.190090.
 64. Jang S.H., Seo S.Y. Neurogenic fever due to injury of the hypothalamus in a stroke patient: case report. *Medicine (Baltimore).* 2021; 100 (13): e24053 DOI: 10.1097/MD.00000000000024053. PMID: 33787568.
 65. Lu H-Y., Huang A.P-H., Kuo, L-T. Prognostic value of circadian brain temperature rhythm in basal ganglia hemorrhage after surgery. *Neurol Ther.* 2021; 10 (2): 1045–1059. DOI: 10.1007/s40120-021-00283-y. PMID: 34561832.
 66. Кропывнытский I., Saunders F., Pols M., Zarowski C. Circadian rhythm of temperature in head injury. *Brain Inj.* 2001; 15 (6): 511–518. DOI: 10.1080/02699050010007515. PMID: 11394970.
 67. Шевелев О.А., Петрова М.В., Юрьев М.Ю., Жданова М.А., Менгисту Э.М., Костенкова И.З., Ходорович Н.А., Веснин С.Г., Горяннин И. Метод микроволновой радиотермометрии в исследованиях циркадных ритмов температуры головного мозга. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2022; 173 (3): 380–383. DOI: 10.47056/0365-9615-2022-173-3-380-383. [Shevelev O.A., Petrova M.V., Yuryev M.Yu., Zhdanova M.A., Mengistu E.M., Kostenkova I.Z., Khodorovich N.A., Vesnin S.G., Goryanin I. The method of microwave radiothermometry in studies of circadian rhythms of brain temperature. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine/ Biull. Exp. Biol. Med.* 2022; 173 (3): 380–383. (in Russ.). DOI: 10.47056/0365-9615-2022-173-3-380-383].
 68. Shevelev O.A., Petrova M.V., Yuriev M.Y., Mengistu E.M., Kostenkova I.Z., Zhdanova M.A., Vesnin S.G., Goryanin I. Study of brain circadian rhythms in patients with chronic disorders of consciousness and healthy individuals using microwave radiometry. *Diagnostics (Basel).* 2022; 12 (8): 1777. DOI: 10.3390/diagnostics12081777. PMID: 35892486.
 69. Шевелев О.А., Гречко А.В., Петрова М.В. Терапевтическая гипотермия. М. изд. РУДН. 2019; 265. ISBN: 978-5-209-09541-5. [Shevelev O.A., Grechko A.V., Petrova M.V. Therapeutic hypothermia. М. ed. RUDN. 2019; 265. (in Russ.). ISBN: 978-5-209-0954-5].
 70. Shevelev O., Petrova M., Smolensky A., Osmonov B., Toimatov S., Kharybina T., Karbainov S., Ovchinnikov L., Vesnin S., Tarakanov A., Goryanin I. Using medical microwave radiometry for brain temperature measurements. *Drug Discov Today.* 2022; 27 (3): 881–889. DOI: 10.1016/j.drudis.2021.11.004. PMID: 34767961.
 71. Шевелев О.А., Бутров А.В., Чебоксаров Д.В., Ходорович Н.А., Покатилова Н.С., Лапаев Н.Н. Патогенетическая роль церебральной гипертермии при поражениях головного мозга. *Клиническая медицина.* 2017; 95 (4): 302–309. DOI: 10.18821/0023-2149-2017-95-4-302-309. [Shevelev O.A., Butrov A.V., Cheboksarov D.V., Khodorovich N.A., Pokatilova N.S., Lapaev N.N. Pathogenetic role of cerebral hypothermia in brain lesions. *Clinical medicine/Klinicheskaya meditsina.* 2017; 95 (4): 302–309. (in Russ.). DOI: 10.18821/0023-2149-2017-95-4-302-309].
 72. Пирадов М.В., Супонева Н.А., Сергеев Д.В., Червяков А.В., Рябинкина Ю.В., Кремнева Е.И., Морозова С.Н., Язева Е.А., Легостаева Л.А. Структурно-функциональные основы хронических нарушений сознания. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* 2018; 12: 6–15. DOI: 10.25692/ACEN.2018.5.1. [Piradov M.V., Suponeva N.A., Sergeev D.V., Chervyakov A.V., Ryabinkina Yu.V., Kremneva E.I., Morozova S.N., Yazeva E.A., Legostaeva L.A. Structural and functional foundations of chronic disorders of consciousness. *Annals of Clinical and Experimental Neurology/ Annaly Klinicheskoy i Eksperimentalnoy Neurologii.* 2018; 12: 6–15. (in Russ.). DOI: 10.25692/ACEN.2018.5.1].
 73. Судаков К.В. Функциональные системы. М.: «Издательство РАМН»; 2011: 320. ISBN 978-5-7901-0109-0. [Sudakov K.V. Functional systems. М.: «RAMS Publishing House»; 2011: 320. ISBN 978-5-7901-0109-0].
 74. Зозуля С.А., Шевелев О.А., Тихонов Д.В., Симонов А.Н., Каледа В.Г., Ключник Т.П., Петрова М.В., Менгисту Э.М. Тепловой баланс головного мозга и маркеры воспалительной реакции у пациентов с шизофренией. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины.* 2022; 137 (4): 522–526. DOI: 10.47056/0365-9615-2022-173-4-522-526. [Zozulya S.A., Shevelev O.A., Tikhonov D.V., Simonov A.N., Kaleda V.G., Klushnik T.P., Petrova M.V., Mengistu E.M. Brain heat balance and markers of inflammatory response in patients with schizophrenia. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine/ Biull. Exp. Biol. Med.* 2022; 137 (4): 522–526. (in Russ.). DOI: 10.47056/0365-9615-2022-173-4-522-526].
 75. Rzechorzek N.M., Thrippleton M.J., Chappell F.M., Mair G., Ercole A. Cabeleira M., CENTER-TBI High Resolution ICU (HR ICU) Sub-Study Participants and Investigators; Rhodes J., Marshall I., O'Neill J.S. A daily temperature rhythm in the human brain predicts survival after brain injury. *Brain.* 2022; 145 (6): 2031–2048. DOI: 10.1093/brain/awab466. PMID: 35691613.
 76. Бояринцев В.В., Журавлев С.В., Ардашев В.Н., Шевелёв О.А., Стулин И.Д., Шарина И.А., Каленова И.Е. Особенности мозгового кровотока в норме и при патологии на фоне краниоцеребральной гипотермии. *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 2019; 53 (4): 59–64. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-4-59-64. [Boyarintsev V.V., Zhuravlev S.V., Ardashev V.N., Shevelev O.A., Stulin I.D., Sharinova I.A., Kalenova I.E. Characteristics of cerebral blood flow in the norm and pathologies in the course of cranio-cerebral hypothermia. *Journal of Aerospace and Environmental Medicine / Zhurnal Aviakosmicheskoy i Ekologicheskoy Meditsiny.* 2019; 53 (4): 59–64. (in Russ.). DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-4-59-64].

Поступила 21.03.2022
Принята в печать 20.12.2022