

ВЛИЯНИЕ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ АДИПОНЕКТИНА У ЖИВОТНЫХ С МОДЕЛЬЮ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО СИНДРОМА И МАЛОПОДВИЖНОГО ОБРАЗА ЖИЗНИ

© Занин С.А., Поляков П.П., Цымбалов О.В.

Кубанский государственный медицинский университет (КубГМУ)

Россия, 350063, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Митрофана Седина, 4

Цель – изучить влияние транскраниальной электростимуляции на динамику концентрации адипонектина в крови на модели метаболического синдрома, ассоциированного с малоподвижным образом жизни, у крыс.

Материалы и методы. Экспериментальные животные ($n=180$) – аутбредные самцы крыс линии Wistar (возраст 10-12 недель) – были разделены на 3 группы. Группа контроля ($n=60$) получала стандартный рацион и размещалась в клетках с плотностью посадки не менее 350 см^2 на крысу. Группа сравнения ($n=60$) и группа транскраниальной электростимуляции ($n=60$) получали диету, обогащенную жирами и фруктозой, а плотность посадки не превышала 270 см^2 на крысу. При этом в группе транскраниальной электростимуляции последняя проводилась ежедневно по 30 минут (сила тока 0,6 мА). Концентрация адипонектина оценивалась в крови животных на 30-й, 60-й и 90-й дни исследования.

Результаты. На 30-й день исследования оцениваемая концентрация статистически значимо ($p=0,5$) не отличалась между группами. К 60-му дню концентрация в группе транскраниальной электростимуляции превышала аналогичный показатель в группе сравнения на 38,2% ($p=0,008$; размер эффекта: $\varepsilon=0,2$ (95% ДИ от 0,04 до 0,5)). К 90-му дню исследования концентрация адипонектина статистически значимо ($p=0,5$) не отличалась между группами.

Заключение. Таким образом, транскраниальная электростимуляция может оказывать воздействие на динамику концентрации адипонектина у животных с обсуждаемой моделью патологии. Для интерпретации значения полученных результатов следует оценить их в контексте влияния транскраниальной электростимуляции на показатели углеводного, липидного обмена, концентрацию других адипокинов, интенсивность паравоспаления и степень активации противовоспалительных систем (в частности, опиоидергической) при обсуждаемой модели патологии.

Ключевые слова: транскраниальная электростимуляция; метаболический синдром; малоподвижный образ жизни; высококалорийная диета; адипонектин; адипокины.

Занин Сергей Александрович – канд. мед. наук, доцент, и.о. зав. кафедрой общей и клинической патологической физиологии, КубГМУ, г. Краснодар. ORCID iD: 0000-0002-5667-0623. E-mail: zanim77@mail.ru (автор, ответственный за переписку)

Поляков Павел Павлович – канд. мед. наук, доцент кафедры общей и клинической патологической физиологии, КубГМУ, г. Краснодар. ORCID iD: 0000-0002-9532-0626. E-mail: palpal.p@yandex.ru

Цымбалов Олег Владимирович – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, КубГМУ, г. Краснодар. ORCID iD: 0000-0002-6203-9272. E-mail: kafedradetstom@ksma.ru

Ожирение без преувеличения можно назвать неинфекционной пандемией XXI века [1-3]. Негативное влияние избытка жировой ткани, из которой наибольшую опасность представляет абдоминальный (висцеральный) жир, затрагивает едва ли не все органы и системы [3, 4]. Среди прочего данное влияние включает в себя (но этим не исчерпывается): амплификацию атерогенеза, артериальной гипертензии, сердечной недостаточности, нарушения реологии и кислород-связывающей функции крови, инсулинерезистентность, формирование метаболически ассоциированной жировой болезни печени (МАЖБП), цереброметаболических нарушений, синдрома обструктивного апноэ сна (СОАС), гормональную дисфункцию (например, гиперэстрогению), повышение риска канцерогенеза, биомеханические эффекты избыточной массы тела (патологическая нагрузка на суставы, повышение внутрибрюшного давления,

компрессия нервов, сосудов, органов, снижение общей емкости легких) [5-9].

Центральное место в патогенезе этих нарушений занимает адипокиновый дисбаланс, который в первом приближении можно охарактеризовать как гипофункцию адипокинов, обладающих по большей части органопротективными функциями и, напротив, гиперфункцию субстанций с противоположным действием (орексигенным, провоспалительным, прооксидантным, проапоптотическим и пр.) [10, 11]. Адипонектин относится к числу первых и обладает разнообразными положительными эффектами [12]. Взаимодействуя со своими рецепторами (Adipo R1, Adipo R2) на гепатоцитах, миоцитах скелетных мышц и сердца, эндотелии, лейкоцитах, фибробластах и прочих клетках, он запускает адаптивные внутриклеточные программы, обусловленные модуляцией АМФ-зависимой киназы/ сиртуинов, малых ГТФ-аз (Rab5), р38 митоген-активируемой протеинкиназы, фосфо-

инозитид-3-киназы/ протеинкиназы В, церамидазной активности, рецепторов, активируемых пероксисомным пролифератором α , и прочих внутриклеточных посредников [12-14]. Результатом этого является ряд благоприятных эффектов на клеточно-тканевом (усиление экспрессии и экстернализации GLUT4, β -окисления, митохондриального биогенеза, торможение апоптоза, воспаления/паравоспаления, фиброза, замедление прогрессирования патологической гипертрофии миокарда) и организменном уровнях (нормализация инсулиночувствительности, углеводного и липидного обмена, снижение глюкозо- и липотоксических эффектов) [12, 13].

Коррекция нарушений баланса адипокинов является перспективной стратегией патогенетического лечения ожирения, метаболического синдрома, сахарного диабета 2 типа и смежных патологий. Повлиять на данное звено патогенеза могут, как показывают результаты экспериментальных и клинических работ, методы электрической неинвазивной стимуляции мозга [15-18]. Среди них заслуживает внимания транскраниальная электростимуляция (ТЭС-терапия) [19-21]. Ранее было показано воздействие данного лечебного метода на ряд патогенетических звеньев (подавление воспаления, стимуляция опиоидергической системы и пр.), которое потенциально может быть полезно в коррекции адипокинового дисбаланса и других нарушений, лежащих в основе ожирения, метаболического синдрома и диабета 2 типа [18, 22-24].

Цель исследования – изучить влияние транскраниальной электростимуляции на динамику концентрации адипонектина в крови на модели ожирения у крыс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена на базе вивария учебно-производственного отдела ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России. В исследование включены 180 аутбредных самцов крыс линии Wistar массой 200-250 г (возраст 10-12 недель).

Параметры содержания: 12-часовой световой день (07:00-19:00), температура $23\pm1^{\circ}\text{C}$, влажность 60-65%, свободный доступ к воде и корму. Все клетки оборудованы вентиляцией и древесной стружкой.

За 14 дней до начала эксперимента под комбинированным наркозом (тилетамин/золазепам – 20 мг/кг и ксилазин – 5 мг/кг крысам имплантировали титановые электроды (диаметром 1,5 мм) в подкожную клетчатку лобной и затылочной областей [25].

Животные были распределены на три группы. Группа 1 (контроль, $n=60$) получала стан-

дартный гранулированный корм (19,5% белка, 5% жира, 3000 ккал/кг, «Микс Лайн», Россия). Животные содержались в стандартных клетках с плотностью посадки не менее 350 см^2 на одно животное, что обеспечивало возможность свободной двигательной активности. В группах 2 ($n=60$) и 3 ($n=60$) моделировался метаболический синдром и малоподвижный образ жизни. Крысы размещались в клетках с плотностью посадки около 270 см^2 на одно животное, что ограничивало их передвижение на 30-40% от нормы (моделирование малоподвижного образа жизни), и получали рацион в соответствии с обогащенной фруктозой и жирами диетой: гранулированный корм с добавлением 8% казеина, 5% фруктозы и 17% свиного жира, 20% раствор фруктозы вместо воды (4170 ккал/кг) [26].

При этом в 3 группе (группа ТЭС-терапии) животным проводилась ТЭС-терапия в отличие от группы 2 (группа сравнения). Каждую группу разделили на три подгруппы (в каждой по 20 животных): А, В, С, – для забора материала на 30-е, 60-е и 90-е сутки эксперимента соответственно. Критерии исключения: масса тела за пределами 200-250 г, видимые патологии, воспаление в зоне имплантации электродов.

Для проведения ТЭС в группе 3 использовали аппарат «ТРАНСАИР-03» («Центр транскраниальной электростимуляции», Россия) с параметрами: биполярные импульсы $3,75\pm0,25$ мс, сила тока 0,6 мА, частота 70 Гц, продолжительность 30 мин/сут [27]. Группы 1 и 2 подвергались «псевдостимуляции» (аппарат отключен).

За 16 часов до эвтаназии прекращали кормление животных. Наркоз проводили комбинацией тилематин/золазепам (20 мг/кг) и ксилазина (5 мг/кг). После торакотомии забирали по 5-6 мл крови из правого предсердия в вакуумные пробирки с активатором свертывания крови. После этого материал хранился при температурном режиме -80°C .

Концентрацию адипонектина в сыворотке крови измеряли методом иммуноферментного анализа с использованием набора SEA605Ra (Cloud-Clone Corp., КНР), следуя инструкциям производителя. Оптическую плотность регистрировали на спектрофотометре Filter Max F5 (США), а автоматическую промывку планшетов осуществляли системой Hydro Flex M8/2 (Tecan, Австрия).

Анализ данных методами статистики и графическое представление осуществлялось при помощи среды R (R: A Language and Environment for Statistical Computing R, версия 4.4.0, R Core Team, Австрия) [28]. По Шапиро-Уилку была испытана гипотеза о нормальном распределении количественных данных. Результаты были описаны в виде медианы и квартилей: Me (Q1; Q3).

Одномерное сравнение описанных выше групп производилось посредством критерия Краскела-Уоллиса (R-пакет: coin) [29]. Описание размера эффекта производилось при помощи ϵ^2 (R-пакет: rcompanion) с 95% доверительным интервалом (ДИ). Размер эффекта интерпретировался следующим образом: <0,08 – малый; от 0,08 до 0,26 – умеренный; $\geq 0,26$ – большой. При необходимости выполнялся апостериорный анализ по Данну (R-пакет: dunn.test) с коррекцией на множественные сравнения по Бенъямини-Йекутили.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация адипонектина у животных трех групп на 30-й день исследования представлена на рисунке 1. Как можно видеть, изучаемый

показатель в группе ТЭС-терапии статистически незначимо (при сравнении трех групп: $p=0,5$; $\epsilon^2=0,02$ (95% ДИ от 0,001 до 0,2)) превышал таковой в группе сравнения на 10,3%.

К концу второго месяца (рис. 2) исследования этот эффект усилился: концентрация адипонектина в группе ТЭС-терапии статистически значимо ($p=0,008$; $\epsilon^2=0,2$ (95% ДИ от 0,04 до 0,5)) на 38,2% превысила аналогичный показатель группы сравнения. В группе сравнения не наблюдалась подобной положительной динамики.

К концу третьего месяца концентрация адипонектина была сопоставима ($p=0,5$; $\epsilon^2=0,02$ (95% ДИ от 0,002 до 0,2)) во всех трех группах (рис. 3).

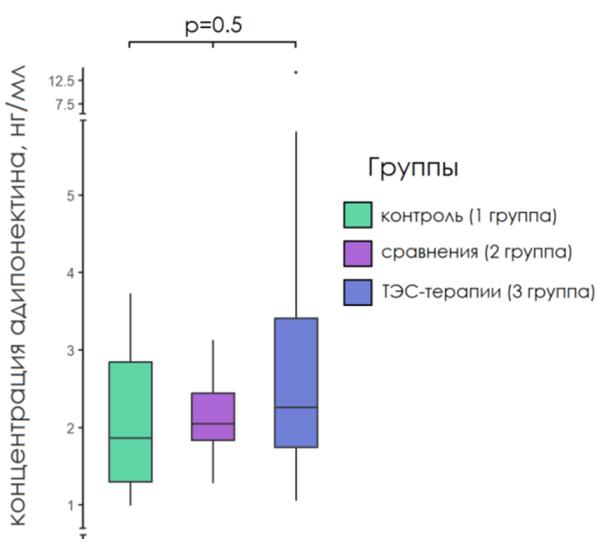


Рис. 1. Концентрация адипонектина на 30-й день исследования (группы 1А, 2А, 3А).

Fig. 1. The concentration of adiponectin on the day 30 of the study (groups 1A, 2A, 3A).

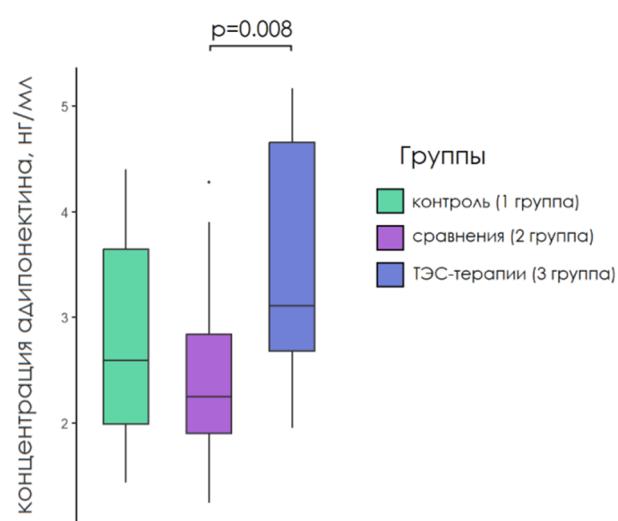


Рис. 2. Концентрация адипонектина на 60-й день исследования (группы 1Б, 2Б, 3Б).

Figure 2. Adiponectin concentration on day 60 of the study (groups 1B, 2B, 3B).

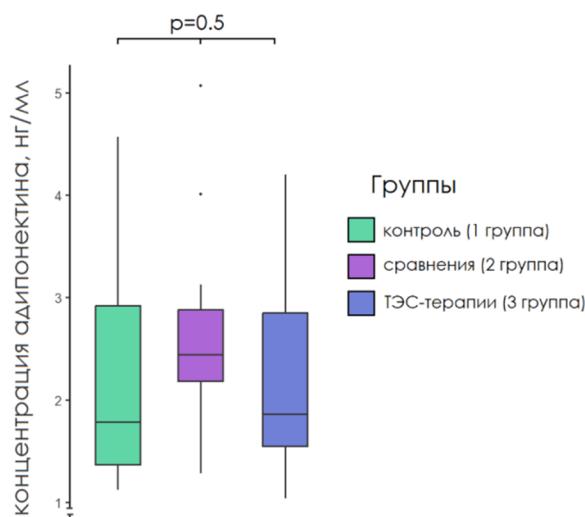


Рис. 3. Концентрация адипонектина на 90-й день исследования (группы 1С, 2С, 3С).

Fig. 3. Adiponectin concentration on day 90 of the study (groups 1C, 2C, 3C).

Представленные данные, по нашему мнению, указывают на возможность коррекции адипокинового дисбаланса (в частности, его важнейшего компонента – гипофункции адипонектина) транскраниальной электростимуляцией. Благоприятное влияние на метаболизм лабораторных животных и человека обнаружены и при изучении других методов неинвазивной стимуляции мозга. Так, Surowka A.D. et al. (2018 г.) показали влияние tDCS на пищевые поведенческие паттерны животных, которое сопровождалось объективными субклеточными изменениями заинтересованных регионов мозга, выявленными посредством рентгенофлюоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения [30]. Исследовано благоприятное воздействие данного метода на углеводный и липидный метаболизм и патогенез сопряженных с его нарушениями патологий (например, на модели МАЖБП), а также способность tDCS модулировать интенсивность паравоспаления у животных с моделью ожирения. Одним из саногенетических механизмов в основе этих изменений, как показали Ziomer-Lisiak A. et al. (2022 г.), может быть благоприятное воздействие электрической стимуляции на микробиом (в частности, повышение доли Firmicutes и снижение Bacteroidetes) и его взаимодействие с макроорганизмом [10]. Помимо экспериментального контекста обсуждаемые эффекты tDCS изучались и у человека. Например, в ряде работ показано влияние tDCS на концентрацию глюкозы крови, на интенсивность ее утилизации клетками здоровых добровольцев, на гедонистический аспект пищевого поведения и т.д. [31, 32]. Изучаются эффекты tDCS у пациентов с ожирением, в частности в отношении выраженности голода и гиперфагии (см., например, мета-анализ 7 рандомизированных контролируемых испытаний, проведенных Gouveia F.V. et al. (2021 г.)) [33]. Транскраниальная электростимуляция также изучалась в контексте ожирения и метаболического синдрома, в частности оценивалось влияние лечебного метода на вегетативную дисфункцию, нейрофизиологические нарушения, лабораторные показатели углеводного и липидного обменов, инсулинерезистентности, перекисного окисления липидов, воспаления и пр. [22, 34].

Эти благоприятные эффекты, по-видимому, обусловлены (среди прочего) коррекцией адипокинового дисбаланса, которая, как мы показали в настоящей работе, также сопряжена с неинвазивной стимуляцией мозга. Для обоснования данной гипотезы следует комплексно оценить динамику показателей углеводного, липидного обменов, концентрацию других адипокинов, интенсивность паравоспаления, степень

активации противовоспалительных систем (в частности, опиоидергической) на модели ожирения и саногенетические эффекты ТЭС-терапии в этом контексте.

СООТВЕТСТВИЕ ПРИНЦИПАМ ЭТИКИ

Исследование одобрено Этическим комитетом Кубанского государственного медицинского университета (протокол № 94 от 10.11.2020 г.). Все эксперименты соответствовали принципам ARRIVE и актуальным стандартам работы с лабораторными животными, включая Приказ Минздрава России № 199н от 01.04.2016 «Об утверждении правил надлежащей лабораторной практики», ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными» и ГОСТ 33216-2014 «Требования к проведению работ с использованием экспериментальных животных».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Занин С.А. – разработка концепции и дизайна; анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи или проверка критически важного интеллектуального содержания; окончательное утверждение для публикации рукописи; Поляков П.П. – анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи или проверка критически важного интеллектуального содержания; окончательное утверждение для публикации рукописи; Цымбалов О.В. – анализ и интерпретация данных; обоснование рукописи или проверка критически важного интеллектуального содержания; окончательное утверждение для публикации рукописи.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Бондарева Э.А., Трошина Е.А. Ожирение. Причины, типы и перспективы. *Ожирение и метаболизм*. 2024;21(2):174-187 [Bondareva E.A., Troshina E.A. Obesity. Reasons, features and prospects. *Obesity and metabolism*. 2024;21(2):174-187 (in Russ.)]. DOI: 10.14341/omet13055. EDN: BRPHRR.
2. Муркамилов И.Т., Ыманкулов Д.С., Сабирова А.И., Райимжанов З.Р., Сабиров И.С., Хакимов Ш.Ш., Юсупова З.Ф., Юсупова Т.Ф. и др. Ожирение в XXI веке. Распространенность, фенотипы, варианты течения и последствия. *Бюллетень науки и практики*. 2024;10(4):268-303 [Murkamilov I., Ymankulov D., Sabirova A., Raimzhanov Z., Sabirov I., Khakimov Sh., Yusupova Z., Yusupova T., et al. Obesity in the 21st Century. Prevalence, Phenotypes, Course Variants and Consequences. *Bulletin of Science and Practice*. 2024;10(4):268-303 (in Russ.)]. DOI: 10.33619/2414-2948/101/34. EDN VIYUAE.

3. Evans M., de Courcy J., de Laguiche E., Faurby M., Haase C.L., Matthiessen K.S., Moore A., Pearson-Stuttard J. Obesity-related complications, healthcare resource use and weight loss strategies in six European countries: the RESOURCE survey. *Int J Obes (Lond)*. 2023;47(8):750-757. DOI: 10.1038/s41366-023-01325-1. EDN: EGOLKV.
4. Антонова К.В., Танашян М.М., Раскуражев А.А., Спрышков Н.Е., Панина А.А., Лагода О.В., Аметов А.С., Трошина Е.А. Ожирение и нервная система. *Ожирение и метаболизм*. 2024;21(1):68-78 [Antonova K.V., Tanashyan M.M., Raskurazhev A.A., Spryshkov N.E., Panina A.A., Lagoda O.V., Ametov A.S., Troshina E.A. Obesity and the nervous system. *Obesity and metabolism*. 2024;21(1):68-78 (in Russ.)]. DOI: 10.14341/omet13019. EDN: ZLNYDR.
5. Трошина Е.А., Терехов П.А. Гипогонадизм и висцеральное ожирение у мужчин – полноценные компоненты метаболического синдрома. *Ожирение и метаболизм*. 2023;20(1):84-91 [Troshina E.A., Terekhov P.A. Hypogonadism and visceral obesity in men are full-fledged components of the metabolic syndrome. *Obesity and metabolism*. 2023;20(1):84-91 (in Russ.)] DOI: 10.14341/omet12980. EDN: QSZMAZ.
6. Булатова И.А., Шевлюкова Т.П., Гуляева И.Л., Соболь А.А., Шелудько В.С. Диагностическая ценность лептина для выявления стеатоза печени у женщин с ожирением в постменопаузе. *Медицинский Совет*. 2024;(15):210-214 [Bulatova I.A., Shevlyukova T.P., Gulyaeva I.L., Sobol A.A., Sheludko V.S. The diagnostic value of leptin for the detection of liver steatosis in postmenopausal obese women. *Medical Council*. 2024;(15):210-214 (in Russ.)]. DOI: 10.21518/ms2024-353. EDN UARKAM.
7. Подопригора М.В., Зинчук В.В., Аль-Джебур Д.Ш.О. Кислородтранспортная функция крови у лиц с сахарным диабетом 2-го типа и содержание аспросина. *Клиническая патофизиология*. 2024;30(4):90-93 [Podoprigora M.V., Zinchuk V.V., Al-Jebur Jaafar Sh.O. Oxygen transport function of blood in individuals with type 2 diabetes mellitus and asprosin content. *Clinical pathophysiology*. 2024;30(4):90-93 (in Russ.)] EDN: WPMQYN.
8. Зинчук В.В., Аль-Джебур Д.Ш.О., Глуткина Н.В. Кислородсвязывающие свойства крови при инсулинорезистентности с различным содержанием аспросина. *Биомедицинская химия*. 2023;69(2):133-139 [Zinchuk V.V., Al-Jebur J.S.O., Glutkina N.V. Oxygen-binding properties of blood in insulin resistance with different asprosin content. *Biomeditsinskaya Khimiya*. 2023;69(2):133-139 (in Russ.)]. DOI: 10.18097/PBMC20236902133. EDN JQMIP.
9. Мустафина С.В., Винтер Д.А., Алферова В.И. Влияние ожирения на формирование и развитие рака. *Ожирение и метаболизм*. 2024;21(2):205-214 [Mustafina S.V., Vinter D.A., Alferova V.I. Influence of obesity on the formation and development of cancer. *Obesity and metabolism*. 2024;21(2):205-214 (in Russ.)]. DOI: 10.14341/omet13025. EDN: HGLCXT.
10. Würfel M., Blüher M., Stumvoll M., Ebert T., Kovacs P., Tönjes A., Breitfeld J. Adipokines as Clinically Relevant Therapeutic Targets in Obesity. *Biomedicines*. 2023;11(5):1427. DOI: 10.3390/biomedicines11051427. EDN: HGLCXT.
11. Zinchuk V.V., Al-Jebur J.S.O. Oxygen-Dependent Aspects of Asprosin Action. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2024;60(2):818-828. DOI: 10.1134/S0022093024020297. EDN: YFVHWK.
12. Han Y., Sun Q., Chen W., Gao Y., Ye J., Chen Y., Wang T., Gao L., et al. New advances of adiponectin in regulating obesity and related metabolic syndromes. *J Pharm Anal*. 2024;14(5):100913. DOI: 10.1016/j.jpha.2023.12.003. EDN: CIGCNR.
13. Begum M., Choubey M., Tirumalasetty M.B., Arbee S., Mohib M., Wahiduzzaman M., Mamun M.A., Uddin M.B., et al. Adiponectin: A Promising Target for the Treatment of Diabetes and Its Complications. *Life (Basel)*. 2023;13(11):2213. DOI: 10.3390/life13112213. EDN: HHOOMA.
14. Занин С.А., Чабанец Е.А., Каде А.Х., Поляков П.П., Трофименко А.И., Занина Е.С. Адипонектин как основной представитель адипокинов: роль в патологии, возможности ТЭС-терапии. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2022;17(4):455-461 [Zanin S.A., Chabanets E.A., Kade A.Kh., Polyaakov P.P., Trofimenko A.I., Zanina E.S. Adiponectin as the main representative of adipokines: role in pathology, possibilities of TES-therapy. *Medical news of the North Caucasus*. 2022;17(4):455-461 (in Russ.)]. DOI: 10.14300/mnnc.2022.17110. EDN: XRZZWM.
15. Ziombro-Lisiak A., Talaga-Ćwiertnia K., Sroka-Oleksiak A., Surówka A.D., Juszczak K., Szczerbowska-Boruchowska M. Repetitive transcranial direct current stimulation modulates the brain-gut-microbiome axis in obese rodents. *Pharmacol Rep*. 2022;74(5):871-889. DOI: 10.1007/s43440-022-00401-z. EDN: YOKMWP.
16. Alipoor A., Mohammadi R. Does Electrical Brain Stimulation with Transcranial Direct Current Stimulation (TDCS) Technique Reduce Blood Sugar in Patients with Type 2 Diabetes? *Iran J Public Health*. 2023;52(12):2701-2702. DOI: 10.18502/ijph.v52i12.14332. EDN: WWGMNR.
17. Болотова Н.В., Филина Н.Ю., Чередникова К.А., Логачева О.А., Тимофеева С.В., Николаева Н.В., Новикова Е.П. Использование современных методов активации мозговых функций у пациентов с ожирением (обзор литературы). *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры*. 2024;101(6):54-61 [Bolotova N.V., Filina N.Yu., Cherednikova K.A., Logacheva O.A., Timofeeva S.V., Nikolaeva N.V., Novikova E.P. Application of modern methods for activation of brain functions in obese patients (literature review). *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy*. 2024;101(6):54-61 (in Russ.)] DOI: 10.17116/kurort202410106154. EDN: GLKSCJ.
18. Малыгин А.В., Хадарцев А.А., Токарев А.Р., Наумова Э.М., Валентинов Б.Г., Трусов С.В., Лебедев В.П. *Транскраниальная электростимуляция*. Москва: Индрик, 2021. 224 с. [Malygin A.V., Hadarcev A.A., Tokarev A.R., Naumova E.M., Valentinov B.G., Trusov S.V., Lebedev V.P. *Transcranial Electrostimulation*. Moscow: Indrik, 2021. 224 p. (in Russ.)]. EDN: HJRYPK.
19. Беляева В.А., Датиева Л.Р., Газзаева Н.А., Иванов Д.В. Повышение спортивной результативности

- сти под воздействием комплексного применения транскраниальной электростимуляции и препаратов серотонина у борцов вольного стиля. *Курортная медицина.* 2024;(4):77-83 [Belyaeva V.A., Datieva L.R., Gazzava N.A., Ivanov D.V. The increase in sports performance through combined transcranial electrostimulation and serotonin supplements with freestyle wrestlers. *Resort medicine.* 2024;(4):77-83 (in Russ.)]. DOI: 10.24412/2304-0343-2024_4_77. EDN: RADUDM.
20. Хабаров С.В., Хадарцева К.А., Паньшина М.В. Эффективность метода транскраниальной электростимуляции в акушерстве и гинекологии. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры.* 2021;98(4):62-69 [Khabarov S.V., Khadartseva K.A., Panshina M.V. The effectiveness of the transcranial electrical stimulation method in obstetrics and gynecology. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy.* 2021;98(4):62-69 (in Russ.)]. DOI: 10.17116/kurort20219804162. EDN: TTFIHQ.
21. Bolotova N.V., Filina N.Yu., Kurdiyan M.S., Kompaniets O.V., Garifulina L.M., Meshcheryakova I.Yu. Using transcranial magnetic therapy in combination with electrostimulation for correcting neuroendocrine-immune disorders in obese boys. *Russian Open Medical Journal.* 2022;11(1):111. DOI: 10.17116/kurort20219804162. EDN: TCSTLJ.
22. Барыльник Ю.Б., Болотова Н.В., Левит С.В., Райгородский Ю.М., Черевашченко Л.А., Черевашченко И.А. Психические, вегетативные и нейрофизиологические нарушения у больных с ожирением и их коррекция с помощью транскраниальной электростимуляции. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2012;112(9):52-56 [Baryl'nik Yu.B., Bolotova N.V., Levit S.V., Raigrodskii Yu.M., Cherevashchenko L.A., Cherevashchenko I.A. S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry. 2012;112(9):52-56 (in Russ.)]. EDN: PIVGOP.
23. Марченко В.А., Кочергин Н.Г., Додина М.И. Возможности транскраниальной электростимуляции в лечении больных атопическим дерматитом. *Российский журнал кожных и венерических болезней.* 2024;27(2):209-217 [Marchenko V.A., Kochergin N.G., Dodina M.I. Transcranial electrical stimulation (TES) in patients with atopic dermatitis. *Russian Journal of Skin and Venereal Diseases.* 2024;27(2): 209-217 (in Russ.)]. DOI: 10.17816/dv625756. EDN: VJDTAV.
24. Хадарцев А.А., Токарев А.Р., Токарева С.В., Хромушин В.А. Транскраниальная электростимуляция в лечении психосоматических расстройств у работников промышленного предприятия. *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры.* 2019;96(2):39-44 [Khadartsev A.A., Tokarev A.R., Tokareva S.V., Hromushin V.A. The role of transcranial electrostimulation in the treatment of psychosomatic disorders in industrial workers. *Problems of Balneology, Physiotherapy and Exercise Therapy.* 2019;96(2):39-44 (in Russ.)]. DOI: 10.17116/kurort20199602139. EDN: NKTXUV.
25. Чабанец Е.А., Каде А.Х., Цымбалов О.В., Трофименко А.И., Ким Г.Г. Эффекты транскраниальной электростимуляции на системное воспаление при высококалорийной диете, обогащенной фруктозой и жиром. *Вестник СурГУ. Медицина.* 2023;16(2):87-94. [Chabanets E.A., Kade A.Kh., Tsymbalov O.V., Trofimenko A.L., Kim G.G. Effects of transcranial electrical therapy on systemic inflammation in a high-fat fructose diet. *Vestnik SurGU. Meditsina.* 2023;16(2):87-94 (in Russ.)]. DOI: 10.35266/2304-9448-2023-2-87-94. EDN: OIMOEX.
26. Чабанец Е.А., Каде А.Х., Гайворонская Т.В., Ким Г.Г., Трофименко А.И. Влияние транскраниальной электростимуляции на состояние углеводного обмена на фоне диеты, обогащенной фруктозой и жиром. *Современные проблемы науки и образования.* 2023;(3):54. [Chabanets E.A., Kade A.Kh., Gayvoronskaya T.V., Kim G.G., Trofimenko A.I. The effect of transcranial electrotherapy on the state of carbohydrate metabolism on the background of a high-fat fructose diet. *Modern problems of science and education.* 2023;(3):54 (in Russ.)]. DOI: 10.17513/spno.32592. EDN YKOBJE.
27. Чабанец Е.А., Каде А.Х., Трофименко А.И., Ким Г.Г., Крутова В.А. Антиатерогенный потенциал транскраниальной электростимуляции при высококалорийной диете, обогащенной фруктозой и жиром: экспериментальное рандомизированное исследование. *Кубанский научный медицинский вестник.* 2023;30(3):65-75 [Chabanets E.A., Kade A.Kh., Trofimenko A.I., Kim G.G., Krutova V.A. Antiatherogenic Potential of Transcranial Electrical Stimulation in a High-Fructose/High-Fat Diet: Experimental Randomized Trial. *Kuban Scientific Medical Bulletin.* 2023;30(3):65-75 (in Russ.)]. DOI: 10.25207/1608-6228-2023-30-3-65-75. EDN: XSNKSF.
28. Xu S., Chen M., Feng T., Zhan L., Zhou L., Yu G. Use *ggbreak* to Effectively Utilize Plotting Space to Deal With Large Datasets and Outliers. *Front. Genet.* 2021;12:774846. DOI: 10.3389/fgene.2021.774846. EDN: CYLEQM.
29. Hothorn T., Hornik K., van de Wiel M.A., Zeileis A. A Lego system for conditional inference. *The American Statistician.* 2006;60(3):257-263. DOI: 10.1198/000313006X118430.
30. Surowka A.D., Ziomer A., Czyzycki M., Migliori A., Kasper K., Szczerbowska-Boruchowska M. Molecular and elemental effects underlying the biochemical action of transcranial direct current stimulation (tDCS) in appetite control. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc.* 2018;195:199-209. DOI: 10.1016/j.saa.2018.01.061. EDN: YGAPQD.
31. Wardzinski E.K., Friedrichsen L., Dannenberger S., Kistenmacher A., Melchert U.H., Jauch-Chara K., Oltmanns K.M. Double transcranial direct current stimulation of the brain increases cerebral energy levels and systemic glucose tolerance in men. *J Neuroendocrinol.* 2019;31(4):e12688. DOI: 10.1111/jne.12688.
32. Anderson E.C., Cantelon J.A., Holmes A., Giles G.E., Brunyé T.T., Kanarek R. Transcranial direct current stimulation (tDCS) to dorsolateral prefrontal cortex influences perceived pleasantness of food. *Heliyon.* 2023;9(2):e13275. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13275. EDN: VEKVMQ.

33. Gouveia F.V., Silk E., Davidson B., Pople C.B., Abrahao A., Hamilton J., Ibrahim G.M., Müller D.J., Giacobbe P., Lipsman N., Hamani C. A systematic review on neuromodulation therapies for reducing body weight in patients with obesity. *Obes Rev.* 2021;22(10):e13309. DOI: 10.1111/obr.13309. EDN: XPBWKO.
34. Болотова Н.В., Белоусова М.С., Чередникова К.А., Филина Н.Ю., Поляков В.К., Аверьянов А.П. Комплексный подход к терапии ожирения у детей подросткового возраста. *Вестник терапевта.*

2023;3(58):34-58 [Bolotova N.V., Belousova M.S., Cherednikova K.A., Filina N.Y., Polyakov V.K., Averyanov A.P. A comprehensive approach to the treatment of obesity in adolescent children. *Therapist's bulletin.* 2023;3(58):34-58 (in Russ.)]. EDN: ZNJWHW.

Поступила в редакцию 21.04.2025

Подписана в печать 25.06.2025

Для цитирования: Занин С.А., Поляков П.П., Цымбалов О.В. Влияние транскраниальной электростимуляции на концентрацию адипонектина у животных с моделью метаболического синдрома и малоподвижного образа жизни. *Человек и его здоровье.* 2025;28(2):45–52. DOI: 10.21626/vestnik/2025-2/06. EDN: JVIKOG.

EFFECT OF TRANSCRANIAL ELECTRICAL STIMULATION ON ADIPONECTIN CONCENTRATION IN ANIMALS WITH A MODEL OF METABOLIC SYNDROME AND SEDENTARY LIFESTYLE

© Zanin S.A., Polyakov P.P., Tsymbalov O.V.

Kuban State Medical University (KubSMU)

4, Mitrofana Sedina Str., Krasnodar, Krasnodar krai, 350063, Russian Federation

Objective – to examine the impact of transcranial electrical stimulation on the dynamics of adiponectin concentration in blood in a rat model of metabolic syndrome and sedentary lifestyle.

Materials and methods. In the present study, experimental animals (n=180) comprised outbred male Wistar rats (age 10-12 weeks). These rats were divided into three groups. The control group (n=60) received a standard diet and were housed in cages with a seating density of at least 350 cm² per rat. The comparison group (n = 60) and the transcranial electrical stimulation group (n=60) were provided a high-fat and high-fructose diet, and cage density did not exceed 270 cm² per rat. In the transcranial electrical stimulation group, this procedure was performed daily for 30 minutes (current 0,6 mA). The adiponectin concentration in the blood of the animals was evaluated at 30, 60, and 90 days into the study.

Results. On the thirtieth day of the study, the estimated concentration was not statistically significantly different (p=0,5) between the groups. However, by day 60, the concentration in the transcranial electrical stimulation group exhibited a significant increase of 38.2% over the comparison group (p=0,008; effect size: $\varepsilon^2=0,2$ (95% CI 0,04-0,5)). At the 90-day mark, the adiponectin concentration remained non-significantly different (p=0,5) between the groups.

Conclusion. This finding suggests that transcranial electrical stimulation may have an impact on adiponectin concentration in animals model of the discussed pathology. To provide a more comprehensive interpretation of the observed results, it is essential to consider the impact of transcranial electrostimulation on various parameters, including but not limited to: carbohydrate and lipid metabolism, the concentration of other adipokines, parainflammation, activation of anti-inflammatory systems (e.g. opioidergic) within the model of the aforementioned pathology.

Keywords: transcranial electrostimulation; metabolic syndrom; sedentary lifestyle high-fat and high-fructose diet; adiponectin; adipokines.

Zanin Sergey A. – Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Acting Head of the Department of General and Clinical Pathological Physiology, KubSMU, Krasnodar, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0002-5667-0623. E-mail: zanin77@mail.ru (corresponding author)

Polyakov Pavel P. – Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Department of General and Clinical Pathological Physiology, KubSMU, Krasnodar, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0002-9532-0626. E-mail: palpal.p@yandex.ru

Tsymbalov Oleg V. – Dr. Sci. (Med.), Professor at the Department of Surgical Dentistry and Maxillofacial Surgery, KubSMU, Krasnodar, Russian Federation. ORCID iD: 0000-0002-6203-9272. E-mail: kafedradetstom@ksma.ru

COMPLIANCE WITH THE PRINCIPLES OF ETHICS

The study was approved by the ethical committee of the Kuban State Medical University (protocol No. 94 of 10.11.2020). All experiments conformed to the ARRIVE principles and Order of the Ministry of Health of Russia No. 199n dated 01.04.2016 «On Approval of the Rules of Good Laboratory Practice», Government standard 33215-2014 «Guidelines for the Keeping and Care of Laboratory Animals» and Government standard 33216-2014 «Requirements for Work Using Experimental Animals».

CONFLICT OF INTEREST

The author declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

SOURCE OF FINANCING

The authors state that there is no funding for the study.

AUTHORS CONTRIBUTION

Zanin S.A. – concept and design development; data analysis and interpretation; justification of the manuscript or verification of critical intellectual content; final approval for publication of the manuscript. Polyakov P.P. – data analysis and interpretation; justification of the manuscript or verification of critical intellectual content; final approval for publication of the manuscript. Tsymbalov O.V. – data analysis and interpretation; justification of the manuscript or verification of critical intellectual content; final approval for publication of the manuscript.

Received 21.04.2025

Accepted 25.06.2025

For citation: Zanin S.A., Polyakov P.P., Tsymbalov O.V. Effect of transcranial electrical stimulation on adiponectin concentration in animals with a model of metabolic syndrome and sedentary lifestyle. *Humans and their health.* 2025;28(2):45-52. DOI: 10.21626/hestnik/2025-2/06. EDN: JVIKOG.