

© Коллектив авторов, 2025  
УДК 616-002.153:616-092.19  
DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2025.20075>  
ISSN – 2073-8137

## Применение ниосомальной формы янтарной кислоты для активации клеточного дыхания в адипоцитах

А. Б. Ходжаян, И. А. Базиков, А. Н. Мальцев, М. Г. Гевандова, А. А. Ефременко

Ставропольский государственный медицинский университет,  
Российская Федерация

## Application of niosomic form of succinic acid for activation of cellular respiration in adipocytes

Khodzhayan A. B., Bazikov I. A., Mal'tsev A. N., Gevandova M. G., Efremenko A. A.

Stavropol State Medical University, Russian Federation

Исследовали влияние ниосомальной формы янтарной кислоты на активацию клеточного дыхания в адипоцитах для профилактики ожирения. Моделирование ожирения проводили на кроликах, находившихся на высококалорийной диете, которым вводили ниосомальную форму янтарной кислоты в дозе 2 мл в течение 5 дней в жировую ткань. Изучали динамику живой массы экспериментальных животных, корреляцию изменения содержания глюкозы, холестерина, триглицеридов и липопротеинов в плазме крови кроликов, а также изменения про-антиоксидантного баланса в жировой ткани. Продемонстрировано снижение содержания уровня глюкозы в крови, содержания триглицеридов, холестерина, липопротеидов низкой плотности и нормализация липидного обмена. Данные эффекты при введении ниосомальной формы янтарной кислоты обусловлены активацией митохондриального дыхания, метаболизацией глюкозы в цикле Кребса, образованием АТФ, активацией свободно-радикальных процессов и антиоксидантной защиты.

*Ключевые слова:* ожирение, янтарная кислота, ниосомы

The effect of the niosomal form of succinic acid on the activation of cellular respiration in adipocytes for the prevention of obesity was investigated. Obesity simulations were performed on high calorie diet rabbits dosed with 2 ml of niosomal succinic acid for 5 days in adipose tissue. The dynamics of the live weight of experimental animals, the correlation of changes in the content of glucose, cholesterol, triglycerides and lipoproteins in the blood plasma of rabbits, as well as changes in the pro-antioxidant balance in adipose tissue were studied. Reduction of blood glucose, triglycerides, cholesterol, low-density lipoproteins and normalization of lipid metabolism has been demonstrated. These effects with the introduction of the niosomal form of succinic acid are due to the activation of mitochondrial respiration, glucose metabolism in the Krebs cycle, ATP formation, activation of free radical processes and antioxidant protection.

*Keywords:* obesity, succinic acid, niosomes

**Для цитирования:** Ходжаян А. Б., Базиков И. А., Мальцев А. Н., Гевандова М. Г., Ефременко А. А. Применение ниосомальной формы янтарной кислоты для активации клеточного дыхания в адипоцитах. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2025;20(4):354-358. DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2025.20075>

**For citation:** Khodzhayan A. B., Bazikov I. A., Mal'tsev A. N., Gevandova M. G., Efremenko A. A. Application of niosomic form of succinic acid for activation of cellular respiration in adipocytes. *Medical News of North Caucasus*. 2025;20(4):354-358. DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2025.20075> (In Russ.)

АТФ – аденозинтрифосфорная кислота  
ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения  
ВЭЖХ – высокоэффективная жидкостная хроматография  
КАТ – каталаза

ЛПНП – липопротеины низкой плотности  
МДА – малоновый диальдегид  
ПОЛ – перекисное окисление липидов  
СОД – супероксиддисмутаза

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), за последние 40 лет количество людей, страдающих ожирением, утроилось [1]. Увеличение частоты ожирения наблюдается и у детей и подростков в возрасте от 5 до 19 лет: с 1 % до 7 %. ВОЗ отмечает также, что в большинстве стран мира избыточный вес

и ожирение являются более частой причиной смерти, чем голод [2]. Ожирение тесно связано с развитием хронических заболеваний, таких как сахарный диабет, нарушения липидного обмена и артериальная гипертония, что повышает риск инвалидности и смертности [3]. Кроме того, ожирение и сопутствующие ему заболевания значи-

тельно увеличивают расходы на здравоохранение. Лечение ожирения требует комплексного подхода, направленного не только на снижение веса, но и на коррекцию нарушений липидного и углеводного обмена, системы гемостаза и других метаболических процессов. При этом необходимо учитывать влияние лекарственных средств на эти параметры [4]. Янтарная кислота (сукцинат) играет важную роль в энергетическом обмене и метаболизме жиров, что делает ее потенциально полезной для профилактики ожирения [5]. Являясь промежуточным продуктом цикла Кребса – основного пути производства энергии в клетках, янтарная кислота может способствовать повышению эффективности митохондриальной функции, что, в свою очередь, стимулирует скорость метаболизма и расщепления жиров [6]. Инсулин, гормон, регулирующий уровень сахара в крови, также играет роль в накоплении жира. Янтарная кислота повышает чувствительность к инсулину, что позволяет организму более эффективно использовать глюкозу и уменьшить накопление жира. Кроме того, янтарная кислота может стимулировать термогенез, способствуя сжиганию дополнительных калорий и снижению веса [7].

Цель исследования: изучение влияния ниосомальной формы янтарной кислоты на активацию клеточного дыхания в адипоцитах для профилактики ожирения.

**Материал и методы.** Моделирование ожирения у кроликов осуществляли с помощью высококалорийной диеты, широко применяющейся в научных исследованиях для изучения различных аспектов этого заболевания, а также сопутствующих ему патологий, таких как сахарный диабет второго типа, сердечно-сосудистые заболевания и метаболический синдром [8]. В эксперимент вошли 45 кроликов весом 2–3 кг, находившихся на высококалорийной диете. На каждом экспериментальном этапе анализ проводился на 5 животных. Общее количество экспериментальных животных составляло 30 животных.

Контрольная группа, состоящая из 15 животных, получала стандартное питание (интактные животные).

Регулярное взвешивание позволяло оценить эффективность диеты и нашего способа профилактики.

Анализ уровней глюкозы, триглицеридов, холестерина и других метаболитов в крови проводился в венозной крови. Забор крови осуществлялся из ушной вены утром натощак.

Гистологические и биохимические исследования процесса ожирения осуществляли из ткани тонкого кишечника в области 12-перстной кишки и жировой ткани вокруг тонкого кишечника и поджелудочной железы оценкой метаболического статуса животных.

Приготавливали ниосомальный гель путем инкапсуляции 50 % раствора янтарной кислоты в кремнийорганические ниосомы. Процесс инкапсуляции проводили с использованием ультразвуковой обработки в сосуде при частоте 20 кГц и мощности 200 Вт. Экспозицию осуществляли в течение 30 минут. Образование ниосом подтверждали посредством просвечивающей электронной микроскопии. Размер и распределение частиц характеризуют методом динамического рассеяния света. Полученные нами кремнийорганические ниосомы обладают сферической формой и размером приблизительно 100 нм. Они демонстрируют стабильность без изменения физической структуры в течение шести недель при

хранении при температуре 4 °С. Дополнительно установлено, что синтезированные ниосомы способны инкапсулировать янтарную кислоту с эффективностью около 90 %.

Эксперимент длился 2 месяца. В течение 1 месяца животные опытных групп находились на высококалорийной диете с избытком насыщенных жирных кислот. Затем, после 1 месяца эксперимента во второй опытной группе (в течение 5 дней) вводили ниосомальную форму янтарной кислоты в жировую ткань в дозе 2 мл 1 раз в сутки. Введение лекарственной формы проводили в подкожную жировую ткань в области шеи.

Сравнивали динамику ожирения и эффективность лечения 1 опытной группы (животные с ожирением, без лечения) и 2 опытной группы (животные с ожирением и лечением).

Для биохимических исследований использовалась кровь и гомогенат жировой ткани, выделенный механическим методом гомогенизации.

Определение глюкозы в крови производили с помощью глюкометра «Сателлит-экспресс» (ЭЛТА, Россия). Метод измерения – электрохимический. Триглицериды в крови животных определяли с помощью ферментативного колориметрического теста (GPO-POD) для количественного определения концентрации триглицеридов при длине волны 505 нм. Определение общего холестерина в сыворотке проводили ферментативно-колориметрическим методом (CHOD-PAP) при длине волны 505 нм. Для количественного определения липопротеинов низкой плотности использовали ферментативный колориметрический прямой метод при длине волны 600 нм. Для этого использовали биохимические наборы (SPINREACT, S.A. Ctra.SantaColoma, 7 E-17176 SantEsteveDeBas (Gi), Spain).

Малоновый диальдегид (МДА) определяли спектрофотометрически при оптической плотности при длине волны 532 нм. Количество малонового диальдегида рассчитывали, используя величину молярного коэффициента экстинкции триметилового комплекса, равную  $1,56 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1} \cdot \text{M}^{-1}$  [9].

Активность супероксиддисмутазы (СОД) определяли по методу, основанному на способности СОД конкурировать с нитросиним тетразолием за супероксидные анионы. Измерения проводились в кювете с длиной оптического пути 1 см на флюориметре «Флюорат 1» (Россия) при длине волны 540 нм. Определенные активности каталазы измеряли при длине волны 410 нм [10].

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программы Statistica 10.0 (StatSoft, США). Количественные переменные были проверены на соответствие нормальному закону распределения с помощью критерия Шапиро – Уилка. Для определения достоверности различий между группами использовался критерий Краскела – Уоллиса. В случае если критерий показывал достоверность при  $p < 0,05$ , для сравнения групп между собой использовался критерий Манна – Уитни. Результаты представляли в виде медианы (Me) нижнего (25 %) и верхнего (75 %) квартилей (Me (Q1/Q3)). Для всех видов анализа статистически значимыми считали различия при  $p < 0,05$ .

Все исследования на лабораторных животных проводились в соответствии с принятыми нормами 17 Хельсинкской декларации Второй медицинской ассоциации (1964) о гуманном отношении к животным и Международными рекомендациями по проведению медико-биологических исследований с использованием животных (1985). А также «Об утверждении пра-

вил лабораторной практики в Российской Федерации» (Приказ Минздравсоцразвития РФ от 23.08.2010 № 708Н) [11].

**Результаты и обсуждение.** Применение ниосомальной формы янтарной кислоты способствовало нормализации среднесуточного прироста живой массы у подопытных животных. Так, живая масса к

концу эксперимента и среднесуточный прирост достоверно ниже по сравнению с группой, которая до конца эксперимента получала высококалорийную диету (1 опытная) ( $p_2=0,0094$ ). Применение ниосомальной формы янтарной кислоты оказало положительное влияние на общее состояние подопытных животных (табл. 1).

Таблица 1

Динамика живой массы экспериментальных животных

Группа животных	Живая масса, г		Среднесуточный прирост живой г/день
	1,5 мес.	3,5 мес.	
Контрольная группа: животные без ожирения и без лечения Me (Q1/Q3)	2964 (3008/2900)	8109 (7987/8200)	85,75 (78/89)
1 опытная группа: животные с ожирением без лечения Me (Q1/Q3) $p_1$ – по сравнению с контрольной группой	2701 (2900/2500) $p_1=0,73$	9993 (9100/9800) $p_1=0,0012$	121,53 (110/135) $p_1=0,009$
2 опытная группа: животные с ожирением, получавшие лечение ниосомальной формой янтарной кислоты Me (Q1/Q3) $p_1$ – по сравнению с контрольной группой $p_2$ – по сравнению с 1 опытной группой	2869 (2900/2500) $p_1=0,59$ $p_2=0,81$	8978 (8100/9800) $p_1=0,054$ $p_2=0,0094$	101,8 (85/105) $p_1=0,15$ $p_2=0,003$

Полученные нами результаты определяют новую биологическую роль янтарной кислоты в регуляции ожирения, вызванного высококалорийной диетой, за счет повышения чувствительности жировой ткани к инсулину. Так, введение ниосомальной формы янтарной кислоты в жировую ткань кроликов снижает уровень глюкозы в крови экспериментальных животных ( $p_2=0,02$ ) (табл. 2).

Высококалорийная диета с избыточным потреблением жиров приводит к системным метаболическим нарушениям и дисбалансу липидного обмена

( $p_1=0,01$ ). В ходе эксперимента по исследованию липидного обмена у кроликов с моделируемым ожирением наблюдалось достоверное снижение уровня триглицеридов в крови при введении ниосомальной формы янтарной кислоты по сравнению с первой опытной группой,  $p_2=0,0002$ ). Примечательно, что уровень липидного обмена у животных, которым вводили ниосомальную форму янтарной кислоты, оказался даже ниже, чем у животных, находящихся на стандартной диете вивария. Однако этот результат недостоверен ( $p_1=0,29$ ) (табл. 2).

Таблица 2

Изменения содержания глюкозы, холестерина, триглицеридов и липопротеинов в плазме крови кроликов, ммоль/л

Группа	Глюкоза		Триглицериды		Холестерин общий		ЛПНП	
	1,5 мес.	3,5 мес.	1,5 мес.	3,5 мес.	1,5 мес.	3,5 мес.	1,5 мес.	3,5 мес.
Контрольная	6,4	8,3	1,2	1,1	2,1	2,2	1,1	1,2
Me (Q1/Q3)	(6,9/6,0)	(8,1/9,0)	(1,0/1,4)	(1,0/1,3)	(1,8/2,3)	(1,8/2,5)	(0,8/1,6)	(0,9/1,5)
1 опытная	7,1	12,3	1,1	2,9	2,9	3,4	1,2	2,3
Me (Q1/Q3) $p_1$ – по сравнению с контрольной группой	(6,6/7,8) $p_1=0,34$	(9/15) $p_1=0,01$	(1,0/1,2) $p_1=0,43$	(2,7/3,1) $p_1=0,01$	(2,5/3,3) $p_1=0,54$	(3,0/3,8) $p_1=0,002$	(0,9/1,5) $p_1=0,87$	(2,1/2,5) $p_1=0,002$
2 опытная	6,8	8,8	1,3	1,0	1,9	2,1	1,0	0,6
Me (Q1/Q3) $p_1$ – по сравнению с контрольной группой $p_2$ – по сравнению с 1 опытной группой	(6,6/7,1) $p_1=0,43$ $p_2=0,54$	(8,1/9,0) $p_1=0,32$ $p_2=0,02$	(1,1/1,5) $p_1=0,35$ $p_2=0,01$	(0,8/1,1) $p_1=0,29$ $p_2=0,0002$	(1,6/2,1) $p_1=0,12$ $p_2=0,001$	(2,0/2,4) $p_1=0,21$ $p_2=0,001$	(0,8/1,2) $p_1=0,25$ $p_2=0,02$	(0,5/0,8) $p_1=0,01$ $p_2=0,0011$

В эксперименте наблюдалось снижение уровня общего холестерина ( $p_2=0,001$ ) и ЛПНП ( $p_2=0,0011$ ) как по сравнению с группой, на которой моделировалось ожирение, так и с контрольной группой ( $p_1=0,01$ ). Этот сдвиг в липидном профиле указывал на улучшение способности организма обрабатывать и удалять избыток холестерина, что снижает риск развития атеросклероза и других сердечно-сосудистых заболеваний, сопутствующих ожирению.

В ходе исследования также было показано, что ниосомальная форма янтарной кислоты влияет на про-антиоксидантный баланс в жировой ткани. Введение ниосомальной формы янтарной кислоты значительно повышало образование МДА в адипоцитах ( $p_1=0,001$ ;  $p_2=0,0187$ ) (табл. 3), что обусловлено увеличением образования супероксид аниона при синтезе АТФ в митохондриях.

В эксперименте было отмечено достоверное увеличение активности супероксиддисмутазы (СОД)

( $p_1=0,0019$ ;  $p_2=0,0012$ ) и каталазы (КАТ) ( $p_1=0,009$ ;  $p_2=0,0064$ ). Это свидетельствовало о том, что, помимо активации свободнорадикальных процессов, ниосомальная форма янтарной кислоты, введенная в жировую ткань, приводит к активации антиоксидантной защиты.

Янтарная кислота, являясь важным метаболитом цикла Кребса, способствует улучшению митохондриальной функции [12]. Она повышает энергетический потенциал клеток, улучшает клеточное дыхание и увеличивает скорость метаболизма [13, 14]. Это приводит к повышению эффективности энергетического обмена и снижению уровня усталости. Кроме того, янтарная кислота способствует увеличению липолиза – процесса расщепления жиров [15, 16], стимулируя выработку ферментов, ответственных за расщепление жировой ткани [17]. Что, в свою очередь, способствует снижению веса и улучшению общего состояния организма [18, 19].

Таблица 3

Динамика изменения про-антиоксидантного баланса в жировой ткани

Группа	МДА (нмоль/мл)		СОД (% блок/мл)		КАТ (мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /мг белка/мин)	
	1,5 мес.	3,5 мес.	1,5 мес.	3,5 мес.	1,5 мес.	3,5 мес.
Контрольная	1,3	1,5	49,8	53,1	49,1	41,5
Me (Q1/Q3)	(1,0/1,5)	(1,3/1,6)	(46/52)	(51/55)	(48/53)	(38/42)
1 опытная	1,4	1,7	43,4	30,6	39,9	36,7
Me (Q1/Q3) $p_1$ – по сравнению с контрольной группой	(1,0/1,7) $p_1=0,34$	(1,5/1,8) $p_1=0,01$	(40/46) $p_1=0,23$	(27/35) $p_1=0,01$	(38/46) $p_1=0,04$	(30/42) $p_1=0,09$
2 опытная	1,1	2,5	49,1	65,2	53,3	63,2
Me (Q1/Q3) $p_1$ – по сравнению с контрольной группой $p_2$ – по сравнению с 1 опытной группой (ожирение без лечения)	(1,0/1,2) $p_1=0,14$ $p_2=0,34$	(1,3/1,7) $p_1=0,001$ $p_2=0,0187$	(48/52) $p_1=0,73$ $p_2=0,09$	(71/55) $p_1=0,0019$ $p_2=0,0012$	(50/55) $p_1=0,14$ $p_2=0,09$	(58/64) $p_1=0,009$ $p_2=0,0064$

В конечном итоге янтарная кислота оказывает положительное влияние на метаболические процессы, улучшая работу митохондрий и способствуя увеличению скорости метаболизма и липолиза [20, 21].

**Заключение.** Таким образом, ниосомы, благодаря своей липофильной природе, легко проникают через клеточные мембраны и доставляют янтарную кислоту внутрь клетки, где она включается в цикл Кребса. В результате проведенного нами исследования продемонстрирована нормализация липидного

обмена, суточного прироста массы тела и активации антиоксидантной защиты при употреблении высококалорийных продуктов. Кроме того, применение ниосомальной формы янтарной кислоты открывает перспективы для ее адресной доставки к другим клеткам, испытывающим наибольшую потребность в энергетической поддержке. Это особенно важно в условиях гипоксии и ишемии, когда нарушается нормальное функционирование митохондрий и снижается производство АТФ.

**Литература/References**

- GBD 2021 Risk Factor Collaborators. Global burden of 88 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet*. 2024;403(10440):2162-2203. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00933-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4)
- GBD 2021 Adult BMI Collaborators. Global, regional, and national prevalence of adult overweight and obesity, 1990–2021, with forecasts to 2050: a forecasting study for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet*. 2025;405(10481):813-838. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(25\)00355-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(25)00355-1)

- Драпкина О. М., Шальнова С. А., Имаева А. Э., Баланова Ю. А. [и др.]. Эпидемиология сердечно-сосудистых заболеваний и их факторов риска в регионах Российской Федерации. Третье исследование (ЭССЕ-РФ-3). Обоснование и дизайн исследования. *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2022;21(5):3246. [Drapkina O. M., Shalnova S. A., Imaeva A. E., Balanova Yu. A. [et al.]. Epidemiology of cardiovascular diseases in regions of Russian Federation. Third survey (ESSE-RF-3). Rationale and study design. *Kardiovaskulyarnayaterapiya i profilaktika*. – *Cardiovascular*

- Therapy and Prevention*. 2022;21(5):3246. (In Russ.)). <https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3246>
4. Kulkarni A., Kulkarni A. S., Gubbi S., Barzilai N. Benefits of Metformin in attenuating the hallmarks of Aging. *Cell. Metabol.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2020.04.001>
  5. Fernández-Veledo S., Ceperuelo-Mallafré V., Vendrell J. Rethinking succinate: An unexpected hormone-like metabolite in energy homeostasis. *Trends Endocrinol. Metab.* 2021;32:680-692. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2021.06.003>
  6. Liao F., Yao C., Chen S., Wu T., Lin S. Y. Transdermal Delivery of Succinate Accelerates Energy Dissipation of Brown Adipocytes to Reduce Remote Fat Accumulation. *Mol. Pharm.* 2022;19:4299-4310. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.2c00628>
  7. Stephen J., Kendall S. Z., Cheyanne S., Daniela E., Caty Sh. [et al.]. The effect of succinic acid on the metabolic profile in high-fat diet-induced obesity and insulin resistance. *Physiol. Rep.* 2020;8(21):e14630. <https://doi.org/10.14814/phy2.14630>
  8. Макарова М. Н., Макаров В. Г. Диет-индуцированные модели метаболических нарушений. Сообщение 2: Экспериментальное ожирение. *Лабораторные животные для научных исследований*. 2018;2. [Makarova M., Makarov V. Diet-Induced models of metabolic disturbances. Report 2: Experimental obesity. *Laboratornyye zhivotnyye dlya nauchnykh issledovaniy. – Laboratory Animals for Science*. 2018;2. (In Russ.)). <https://doi.org/10.29296/2618723X-2018-02-05>
  9. Гавриленко М. М., Волгина Т. Н., Саранчина Н. В., Гавриленко М. А. Способ определения малонового диальдегида. Патент RU 2797016 C1. опубл. 30.05.2023. [Gavrilenko M. M., Volgina T. N., Saranchina N. V., Gavrilenko M. A. Method of determining of malondialdehyde. Patent RU 2797016 C1. publ. 30.05.2023. (In Russ.)).
  10. Смирнова Л. П., Кондакова И. В., Борунов Е. В. Способ определения активности супероксиддисмутазы. Патент RU 2272074 C1. опубл. 20.03.2006. [Smirnova L. P., Kondakova I. V., Borunov E. V. Method of determining of superoxide dismutase activity. Patent RU 2272074 C1. publ. 20.03.2006 (In Russ.)).
  11. Приказ Минздрава России от 23.08.2010 № 708Н «Об утверждении правил лабораторной практики в Российской Федерации». Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=165691> [Order of the Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation dated 23.08.2010 N 708N «On Approval of the Rules of Laboratory Practice in the Russian Federation». Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=165691> (In Russ.)).
  12. Cuomo P., Capparelli R., Iannelli A., Iannelli D. Role of Branched-Chain Amino Acid Metabolism in Type 2 Diabetes, Obesity, Cardiovascular Disease and Non-Alcoholic Fatty Liver Disease. *Int. J. Mol. Sci.* 2022;23:4325. <https://doi.org/10.3390/ijms23084325>
  13. Huang J., Fraser M. E. The structure of succinyl-CoA synthetase bound to the succinyl-phosphate intermediate clarifies the catalytic mechanism of ATP-citrate lyase. *Acta Crystallogr. F Struct. Biol. Commun.* 2022;78:363-370. <https://doi.org/10.1107/S2053230X22008810>
  14. Zhang S., Liang Y., Li L., Chen Y., Wu P. [et al.]. Succinate: A Novel Mediator to Promote Atherosclerotic Lesion Progression. *DNA Cell. Biol.* 2022;41:285-291. <https://doi.org/10.1089/dna.2021.0345>
  15. Liu X., Chen Y., Zhao L., Tian Q., de Avila J. M. [et al.]. Dietary succinate supplementation to maternal mice improves fetal brown adipose tissue development and thermogenesis of female offspring. *J. Nutr. Biochem.* 2022;100:108908. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2021.108908>
  16. Morigny P., Boucher J., Arner P., Langin D. Lipid and glucose metabolism in white adipocytes: Pathways, dysfunction and therapeutics. *Nat. Rev. Endocrinol.* 2021;17:276-295. <https://doi.org/10.1038/s41574-021-00471-8>
  17. Mills E. L., Pierce K. A., Jedrychowski M. P., Garrity R., Winther S. [et al.]. Accumulation of succinate controls activation of adipose tissue thermogenesis. *Nature*. 2018;560:102-106. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0353-2>
  18. Chen H., Jin C., Xie L., Wu J. Succinate as a signaling molecule in the mediation of liver diseases. *Biochim. Biophys. Acta Mol. Basis Dis.* 2024;1870:166935. <https://doi.org/10.1016/j.bbdis.2023.166935>
  19. Atallah R., Gindlhuber J., Heinemann A. Succinate in innate immunity: linking metabolic reprogramming to immune modulation. *Front. Immunol.* 2025;16:1661948. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1661948>
  20. Keiran N., Ceperuelo-Mallafré V., Calvo E., Hernández-Alvarez M. I., Ejarque M. [et al.]. SUCNR1 controls an anti-inflammatory program in macrophages to regulate the metabolic response to obesity. *Nat. Immunol.* 2019;20:581-592. <https://doi.org/10.1038/s41590-019-0372-7>
  21. Morigny P., Boucher J., Arner P., Langin D. Lipid and glucose metabolism in white adipocytes: Pathways, dysfunction and therapeutics. *Nat. Rev. Endocrinol.* 2021;17:276-295. <https://doi.org/10.1038/s41574-021-00471-8>

Поступила 12.05.2025

### Сведения об авторах:

Ходжаян Анна Борисовна, доктор медицинских наук, профессор, первый проректор – проректор по учебной деятельности; тел.: +78652354982; e-mail: [postmaster@stgmu.ru](mailto:postmaster@stgmu.ru)

Базиков Игорь Александрович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой микробиологии; тел.: +78652352475; e-mail: [bazikov@list.ru](mailto:bazikov@list.ru)

Мальцев Александр Николаевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории медицинских биотехнологий и нанотехнологий; тел.: +78652352475; e-mail: [maltsev7@rambler.ru](mailto:maltsev7@rambler.ru)

Гевандова Маргарита Грантовна, доктор медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой биологии; тел.: +78652353442, e-mail: [biology@stgmu.ru](mailto:biology@stgmu.ru)

Ефременко Анна Александровна, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры микробиологии; тел.: +79624434853; e-mail: [anna\\_efremenko\\_26@mail.ru](mailto:anna_efremenko_26@mail.ru)