Дата публикации: 01.09.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_4
УДК 612

Publication date: 01.09.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_4
UDC 612

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕСТРОЙКИ РИТМА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ТОНКОЙ КИШКИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПИЩЕВОЙ ДЕПРИВАЦИИ

Ю.В. Гурман[1], Н.С. Тропская[1,2]
[1]Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва, Россия
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

Аннотация. ***Введение.*** Проблема голода привлекает внимание исследователей с точки зрения адаптационной перестройки организма в ответ на лишение пищи. ***Методы.*** На 12 крысах самцах линии «Wistar» в условиях 9-ти суточной пищевой депривации регистрировали электрическую активность тонкой кишки с вживленных электродов и проводили мониторинг массы тела животных. Для статистического анализа использовали непараметрические критерии. ***Результаты.*** Длительная 9-ти суточная пищевая депривация приводит к снижению массы тела на 24 [20; 25] % от исходной. Нами впервые установлены три стадии изменений периодической электрической активности тонкой кишки при длительной пищевой депривации, характеризующиеся различным соотношением паттернов электрической активности. ***Заключение.*** Выявленные изменения носят адаптационный характер при переходе на эндогенное питание.
Ключевые слова: пищевая депривация, мигрирующий миоэлектрический комплекс, крысы.

THE IMPORTANCE OF RESTRUCTURING OF THE RHYTHM OF PERIODIC ELECTRICAL ACTIVITY OF THE SMALL INTESTINE DURING LONG-TERM FOOD DEPRIVATION

Yu.V. Gurman[1], N.S. Tropskaya[1,2]
[1]N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Moscow, Russia
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Annotation. ***Introduction.*** The problem of hunger attracts the attention of researchers from the point of view of the adaptive restructuring of the body in response to food deprivation. ***Methods.*** On 12 male Wistar rats under conditions of 9-day food deprivation, the electrical activity of the small intestine was recorded from implanted electrodes and the body weight of the animals was monitored. Nonparametric criteria were used for statistical analysis. ***Results.*** Prolonged 9-day food deprivation leads to a decrease in body weight by 24 [20; 25] % of the initial weight. For the first time, we have established three stages of changes in the periodic electrical activity of the small intestine during prolonged food deprivation, characterized by different ratio of electrical activity patterns. ***Conclusion.*** The identified changes are adaptive in nature during the transition to endogenous nutrition.
Keywords: food deprivation, migrating motor complex, rats.

Введение. Несмотря на кажущееся благополучие в мире голод до сих пор остается актуальной проблемой, затрагивающей как государства с развивающейся экономикой, так и страны с высоким уровнем развития. Это сложный феномен, обусловленный не только нехваткой продовольствия, но и политическими, экономическими и социальными факторами. Именно поэтому влияние голодания на организм человека и животных по-прежнему вызывает интерес большого числа исследователей по всему миру [1]. Длительное голодание является фактором, определяющим глубокие метаболические и физиологические изменения, направленные на компенсацию дефицита нутриентов в организме. Одна из ведущих ролей в эндокринных и метаболических

изменениях принадлежит перестройке функционирования гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы (ГГТС) [2]. Кроме того, при длительном голодании активируются гипоталамо-гипофизарно-адреналовая и симпатоадреналовая системы [3].

Одним из главных научных интересов в изучении полного голодания является способность организма к активации адаптивных процессов, в том числе за счет эндогенного питания [1, 4, 5].

Периодическая активность пищеварительного тракта – один из ключевых биоритмов, наблюдаемых у человека и животных. Стоит отметить, что для него характерна упорядоченная смена моторной и секреторной активностей. В основе такой цикличности лежат сложные нейрогуморальные механизмы, обеспечивающие согласованную работу различных отделов пищеварительной системы. Моторная активность проявляется в виде перистальтических волн, которые обеспечивают продвижение пищевого комка по желудочно-кишечному тракту, и сегментирующих сокращений, направленных на механическую обработку содержимого тонкой кишки и его перемешивание с пищеварительными соками [6]. Секреторная активность, в свою очередь, включает в себя выработку ферментов, соляной кислоты и слизи, необходимых для расщепления и усвоения питательных веществ, а также сдерживает избыточный бактериальный рост в тонкой кишке. Также межпищеварительная секреторная и моторная активности, согласно текущим представлениям, поддерживают эндогенное питание, снабжая как организм в целом, так и энтероциты энергией и нутриентами, поступающими из просвета кишечника [7].

Несмотря на длительное изучение периодической кишечной моторики некоторые аспекты остаются не до конца изученными. В частности, в литературе отсутствует информация о продолжительности сохранения периодической двигательной активности тонкого кишечника в условиях отсутствия поступления пищи, а также об особенностях перестройки ритма при адаптации к эндогенному питанию.

Цель исследования: выявить особенности перестройки ритма периодической электрической активности тонкой кишки при длительной пищевой депривации.

Методы и организация исследования. Исследования выполнены на 12 крысах самцах линии «Wistar» с массой тела 340-390 г. в возрасте 12 месяцев.

Перед началом экспериментов выполнялась операционная подготовка животных. В качестве наркоза внутримышечно вводили смесь Золетила 100 с Ксилазином 20 мг в соотношении 1:2. Доза данной смеси составляла 0,6 мл/кг. В рамках предоперационной подготовки в тощую кишку в 5-ти см от связки Трейтца устанавливали зонд для энтерального введения растворов. В серозно-мышечный слой тощей кишки имплантировали три монополярных петельчатых электрода, располагая их на расстоянии 10-ти, 15-ти и 20 см от связки Трейтца. В мышечный слой брюшной стенки вживлялся дополнительный референтный электрод. До фиксации зонд и провода электродов с помощью специальных игл-проводников проводили из брюшной полости через мягкие ткани брюшной стенки и тазовой области, протаскивали под кожей хвоста и выводили наружу. На конечной трети хвоста закрепляли втулку с шайбами. Брюшную полость послойно ушивали. Крыс размещали в индивидуальные клетки таким образом, что фиксированный кончик хвоста со свободными концами зонда и электродов оказывался снаружи клетки, что позволяло беспрепятственно вводить растворы в зонд и осуществлять соединение проводов электродов с регистрирующим устройством. Исследования начинались через неделю после установки электродов и зонда.

Регистрацию электромиограмм (ЭМГ) проводили с использованием электронного энцефалографа «NVX-52». Запись сигнала производилась в полосе частот от 0,05 Гц до 35 Гц, с частотой дискретизации 250 Гц. Анализ ЭМГ проводился с помощью прикладного программного обеспечения «AcqKnowledge 4.1». При анализе ЭМГ для отсечения медленноволновой составляющей сигнала использовали фильтр низких частот (5 Гц).

В первый день эксперимента после 18-ти часовой пищевой депривации

осуществляли регистрацию электрической активности трех участков тонкой кишки в течение 60 мин (фон). В последующие 9 дней животные имели свободный доступ к воде (за исключением времени, когда осуществлялась регистрация ЭМГ) при отсутствии доступа к корму. Каждый день животных взвешивали, а затем выполняли регистрацию электрической активности тонкой кишки в течение 60 мин.

При анализе ЭМГ оценивали следующие параметры мигрирующего миоэлектрического комплекса (ММК): частота генерации ММК (количество ММК в час) и процент времени каждой из фаз ММК. В записях подсчитывали длительность каждой из фаз ММК в секундах, затем длительность каждой фазы умножали на 100 и делили на период ММК. При отсутствии какой-либо фазы ММК подсчитывали длительность регистрируемых фаз в секундах, затем длительность каждой фазы умножали на 100 и делили на длительность записи в секундах.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета статистической программы Statistica 6.0 (StatSoft Inc.). Для статистического анализа ЭМГ использовались непараметрические критерии: ранговый дисперсионный анализ по Фридману (ANOVA), после чего для последующего парного сравнения между группами использовался непараметрический Т-критерий Вилкоксона. Статистически значимыми считались значения с $p<0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение. В фоновых записях на ЭМГ наблюдалась четкая ритмичность электрической активности, что проявлялось наличием ММК, который является ключевым индикатором нормальной электрической активности, регистрирующейся в тонком кишечнике в межпищеварительном периоде. Частота генерации ММК составляла 5 [4; 5] в час. ММК характеризовался наличием трех повторяющихся фаз (паттернов) (рис.). Фаза I – фаза покоя – проявлялась в отсутствии спайковых потенциалов и, соответственно, сокращений. Фаза II – фаза нерегулярной активности: регистрировались единичные, хаотично возникающие спайковые потенциалы различной силы и интенсивности. Сокращения, наблюдаемые на этом этапе, некоординированы, что, в свою очередь, не способствует продвижению пищевого комка. Фаза III – фаза регулярной активности, которая характеризуется появлением мощных и ритмичных пачек спайковых потенциалов. Сокращения, происходящие в этой фазе, координированы и эффективно продвигают содержимое по кишечнику. Процент представленности фазы I составлял 28 [27; 32] %, фазы II – 42 [41; 44] %, а фазы III – 29 [28; 30] %.

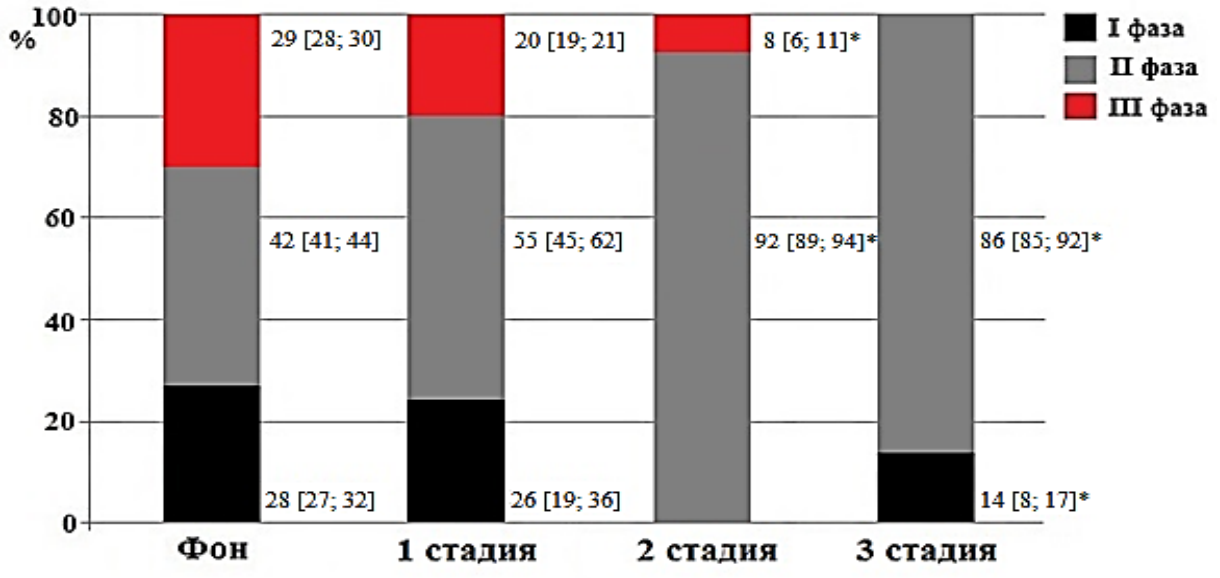


Рис. Длительность фаз мигрирующего миоэлектрического комплекса у крыс на разных стадиях пищевой депривации, Me [Q1; Q3]; * – $p<0,05$ по сравнению с фоном.

На основании результатов анализа ЭМГ, зарегистрированных на протяжении 9-ти суточной пищевой депривации (ПД), нами были выделены временные интервалы, характеризующие три стадии изменений электрической активности тонкой кишки: 1-3 сутки (1 стадия), 4-6 сутки (2 стадия) и 7-9 сутки (3 стадия) от момента начала ПД.

На протяжении 1 стадии электрическая активность тонкой кишки демонстрировала сохранение ритмической активности с наличием распространяющегося ММК, однако наблюдалось снижение частоты генерации комплексов до 3 [3; 3] в час по сравнению с фоном ($p<0,05$). Были установлены незначительные изменения в продолжительности фаз ММК: снижение доли фазы покоя до 26 [19; 36] % ($p>0,05$), увеличение доли нерегулярной активности до 55 [45; 62] % ($p>0,05$) и снижение регулярной активности до 20 [19; 21] % ($p>0,05$) (рис.). Масса тела на этой стадии снижалась на 8 [7; 16] % от исходной ($p<0,05$).

Известно, что периодическая межпищеварительная моторная активность тонкой кишки функционально направлена на эвакуацию содержимого из ее просвета, поэтому снижение частоты генерации ММК с 5 до 3 циклов час в течение первых трех дней ПД является энергетически целесообразным и достаточным для удаления пищевых остатков и очищения просвета кишки от отмерших клеток и слизи.

На 2 стадии на ЭМГ ММК полностью исчезал у всех животных. На этой стадии отмечалось отсутствие периодов покоя, регистрировались последовательные, сменяющие друг друга периоды нерегулярной и регулярной активности, процент представленности которых составлял 92 [89; 94] % и 8 [6; 11] % соответственно. Данные значения статистически значимо отличались от фоновых ($p<0,05$). Данные наблюдения указывают на гипермоторную активность тонкой кишки. Отметим, что фаза регулярной активности распространялась вдоль тонкой кишки. Также подчеркнем, что длительность нерегулярной активности в 11,5 раз была продолжительнее регулярной активности ($p<0,05$) (рис.). Масса тела на этой стадии снижалась на 14 [13; 25] % от исходной ($p<0,05$).

Таким образом, с наступлением 2 стадии ПД наблюдается существенное изменение ситуации. Согласно литературным данным, в указанный период наблюдается активное и постоянное выделение пищеварительных соков в полость кишечника. И.П. Разенков интерпретировал это явление как признак начала перехода организма к внутреннему, эндогенному, питанию [8]. В качестве энергетического источника используются преимущественно продукты белковой природы, глутамин и глутамат [9]. При переходе на эндогенное питание и непрерывную секрецию наблюдается исчезновение ММК с наличием нетипично продолжительной нерегулярной активности гладких мышц тонкой кишки, которая проявляется длительным перемешиванием пищевого комка содержимого [10, 11]. На 2 стадии ПД наблюдалось сохранение незначительной пропульсивной перистальтики, которая, по всей вероятности, обеспечивает продвижение содержимого, облегчая опорожнение кишечника.

На 3 стадии ПД при анализе ЭМГ ММК также отсутствовал. При этом наблюдались изменения в паттерне электрической активности тонкой кишки: отсутствовала фаза регулярной активности, а длительность двух других фаз отличалась от фоновых значений. Так, отмечались непродолжительные эпизоды покоя – 14 [8; 17] % ($p<0,05$) и длительные периоды нерегулярной активности – 86 [85; 92] %, которые превышали по длительности периоды покоя в 6,1 раз ($p<0,05$). Масса тела на этой стадии снижалась на 24 [20; 25] % от исходной ($p<0,05$).

Таким образом, на 3 стадии ПД, так же, как и на предыдущей, наблюдается продолжение адаптации организма к эндогенному питанию. На ЭМГ регистрируется продолжительная нерегулярная активность гладких мышц тонкой кишки, также наблюдается исчезновение регулярной активности (пропульсивной перистальтики), что в условиях длительного голодания, по всей вероятности, направлено на максимальное сохранение и аккумулирование оставшихся питательных веществ [5].

Заключение. Полученные данные свидетельствуют, что в течение 9-ти суточной ПД наблюдалась стадийная

перестройка ритма периодической электрической активности тонкой кишки, которая имела адаптационный характер. Начиная с 4-х суток ПД (2 и 3 стадии), из-за отсутствия поступления пищи извне организм, чтобы выжить, вынужден перестраиваться на эндогенное питание, следствием этого является непрерывное выделение секретов тонкой кишкой. Такая секреция приводит к исчезновению ММК и к аномально длительной нерегулярной активности гладких мышц тонкой кишки, что по сути является перемешиванием содержимого в полости кишки. На 2 стадии, несмотря на это, незначительная пропульсивная перистальтика все еще присутствует, что обеспечивает эвакуацию содержимого кишечника. Однако на 3 стадии исчезновение регулярной, пропульсивной перистальтики, вероятно, является адаптацией, нацеленной на максимальное сбережение оставшихся питательных веществ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биохимия голодания и ожирения: новые аспекты и перспективы / Д.И. Кузьменко, С.Н. Удинцев, В.Ю. Серебров, Т.К. Климентьева. – Томск: СибГМУ, 2014. – 270 с.
2. Boelen, A. Fasting-induced changes in the hypothalamus–pituitary–thyroid axis / A. Boelen, W.M. Wiersinga, E. Fliers // Thyroid. – 2008. – Vol. 18. – No. 2. – P. 123-129. DOI: 10.1089/thy.2007.0253.
3. Меерсон, Ф.З. Адаптация, стресс и профилактика / Ф.З. Меерсон. – М.: Наука, 1981. – 279 с.
4. Безбородкина, Н.Н. Углеводный метаболизм при хронических поражениях печени / Н.Н. Безбородкина, С.В. Оковитый, Б.Н. Кудрявцев. – СПб: Синтез Бук, 2008. – 176 с.
5. Махов, С.Ю. Автономное выживание человека в условиях многодневного полного голодания на фоне повышенной физической активности / С.Ю. Махов, В.С. Макеева // Совершенствование физической, огневой и тактико-специальной подготовки сотрудников правоохранительных органов. Физическая подготовка и спорт: сб. статей. – Орел, 2015. – С. 97-101.
6. Thompson, D.G. Guts and their motions (gastrointestinal motility in health and disease) / D.G. Thompson, J.R. Malagelada // Journal of Clinical Gastroenterology. – 1981. – Vol. 3. – Suppl. 1. – P. 81-87. DOI: 10.1097/00004836-198100031-00017.
7. Коротько, Г.Ф. Полифункциональность периодической деятельности пищеварительной системы (Век после открытия) / Г.Ф. Коротько // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. – 2013. – Т. 23. – № 6. – С. 4-10.
8. Охнянская, Л.Г. Иван Петрович Разенков, 1888-1954 / Л.Г. Охнянская, И.Н. Вишнякова. – М.: Наука, 2004. – 356 с.
9. Palmer, B.F. Starvation ketosis and the kidney / B.F. Palmer, D.J. Clegg // American Journal of Nephrology. – 2021. – Vol. 52. – No. 6. – P. 467-478. DOI: 10.1159/000517305.
10. Wood, J.D. Autonomic brain in the gut / J.D. Wood // Интегративная физиология. – 2020. – Vol. 1. – No. 1. – P. 5-10. DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-1-5-10.
11. Тропская, Н.С. Секреторно-моторная деятельность пищеварительной системы и механизмы регуляции. Парентеральное и энтеральное питание: нац. руководство / Н.С. Тропская. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2023. – С. 100-113.

REFERENCES

1. Kuzmenko D.I., Udintsev S.N., Serebrov V.Yu., Klimentyeva T.K. Biochemistry of starvation and obesity: new aspects and prospects. Tomsk: Siberian State Medical University, 2014. 270 p. (in Russ.)
2. Boelen A., Wiersinga W.M., Fliers E. Fasting-induced changes in the hypothalamus-pituitary-thyroid axis. *Thyroid*, 2008, vol. 18, no. 2, pp. 123-129. DOI: 10.1089/thy.2007.0253.
3. Meerson F.Z. Adaptation, stress and prevention. Moscow: Nauka, 1981. 279 p. (in Russ.)
4. Bezborodkina N.N., Okovityj S.V., Kudryavtsev B.N. Carbohydrate metabolism in chronic liver diseases. St. Petersburg: Sintez Buk, 2008. (in Russ.)
5. Makhov S.Yu., Makeeva V.S. Autonomous survival of a person under conditions of multi-day complete starvation against the background of increased physical activity. In: Improving the Physical, Fire and Tactical-Special Training of Law Enforcement Officers. Physical Training and Sports: collection of articles. Orel; 2015. pp. 97-101. (in Russ.)
6. Thompson D.G., Malagelada J.R. Guts and their motions (gastrointestinal motility in health and disease). *Journal of Clinical Gastroenterology*, 1981, vol. 3, suppl. 1, pp. 81-87. DOI: 10.1097/00004836-198100031-00017.

7. Korotko G.F. Multifunctionality of digestive system periodic activity (an age after discovery). *Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 4-10. (in Russ.)
8. Okhnyanskaya L.G., Vishnyakova I.N. Ivan Petrovich Razenkov, 1888-1954. Moscow: Nauka, 2004. 356 p. (in Russ.)
9. Palmer B.F., Clegg D.J. Starvation ketosis and the kidney. *American Journal of Nephrology*, 2021, vol. 52, no. 6. pp. 467-478. DOI: 10.1159/000517305.
10. Wood J.D. Autonomic brain in the gut. *Integrative Physiology*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 5-10. DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-1-5-10.
11. Tropskaya N.S. Secretory-motor activity of the digestive system and regulatory mechanisms. Parenteral and enteral nutrition: national guidelines. Moscow: GEOTAR-Media, 2023. pp. 100-113. (in Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:
Юлия Валерьевна Гурман – научный сотрудник научной лаборатории экспериментальной патологии, ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗ г. Москвы», Москва, e-mail: julka_gurman95@mail.ru.
Наталия Сергеевна Тропская – доктор биологических наук, заведующая научной лабораторией экспериментальной патологии, ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗ г. Москвы»; профессор кафедры 903, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: ntropskaya@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Yulia V. Gurman – Researcher at the Scientific Laboratory of Experimental Pathology, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine of the Moscow City Healthcare Department, Moscow, e-mail: julka_gurman95@mail.ru.
Nataliya S. Tropskaya – Doctor of Biological Science, Head of the Scientific Laboratory of Experimental Pathology, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine of the Moscow City Healthcare Department; Professor of the Department 903, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, e-mail: ntropskaya@mail.ru.

Для цитирования: Гурман, Ю.В. Особенности перестройки ритма периодической электрической активности тонкой кишки при длительной пищевой депривации / Ю.В. Гурман, Н.С. Тропская // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 3(33). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_4

For citation: Gurman Yu.V., Tropskaya N.S. The importance of restructuring of the rhythm of periodic electrical activity of the small intestine during long-term food deprivation. *Modern Issues of Biomedicine*, 2025, vol. 9, no. 3(33). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_03_4