



УДК 612.85

<https://www.doi.org/10.33910/2687-1270-2022-3-1-100-109>

Влияние гипотермии на импульсную активность нейронов первичной слуховой коры доменной мыши (*Mus musculus*)

А. Г. Акимов¹, М. А. Егорова^{✉1}

¹ Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН,
194223, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Тореза, д. 44

Сведения об авторах

Александр Григорьевич Акимов, SPIN-код: [7859-4191](https://orcid.org/0000-0003-1659-6227), Scopus AuthorID: [36442429100](https://orcid.org/36442429100), Researcher ID: [C-2820-2008](https://orcid.org/C-2820-2008), ORCID: [0000-0003-1659-6227](https://orcid.org/0000-0003-1659-6227), e-mail: agakimov@yandex.ru

Марина Александровна Егорова, SPIN-код: [3883-2885](https://orcid.org/3883-2885), Scopus AuthorID: [57216641258](https://orcid.org/57216641258), Researcher ID: [AAN-5197-2020](https://orcid.org/AAN-5197-2020), ORCID: [0000-0002-2650-5619](https://orcid.org/0000-0002-2650-5619), e-mail: ema6913@yandex.ru

Для цитирования: Акимов, А. Г., Егорова, М. А. (2022) Влияние гипотермии на импульсную активность нейронов первичной слуховой коры доменной мыши (*Mus musculus*). *Интегративная физиология*, т. 3, № 1, с. 100–109. <https://www.doi.org/10.33910/2687-1270-2022-3-1-100-109>

Получена 30 января 2022; прошла рецензирование 9 апреля 2022; принята 10 апреля 2022.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке средств федерального бюджета по госзаданию на 2019–2021 гг. (№ регистрации темы АААА-А18-118013090245-6).

Права: © А. Г. Акимов, М. А. Егорова (2022). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях [лицензии CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Аннотация. Впервые показаны особенности разрядов нейронов первичной слуховой коры доменной мыши (*Mus musculus*) при общем переохлаждении. Сравнивали амплитуды мультиклеточных импульсных ответов нейронов, латентные периоды ответов одиночных нейронов и проявления постстимульной адаптации нейронов к серии тональных сигналов при нормальной температуре тела, при понижении температуры тела на 1–6 °С и после ее восстановления у наркотизированных животных. Полученные результаты выявили существенное увеличение латентных периодов ответов на звуковые сигналы в условиях гипотермии (в среднем на 49 мс) и, соответственно, изменение пачечного типа разряда на позднелатентный. Амплитуда ответов уменьшалась вплоть до полного угасания. Проявления постстимульной адаптации к серии тональных сигналов при гипотермии искажались по сравнению с зарегистрированными в условиях нормальной температуры тела. Повышение температуры тела до нормальной приводило к восстановлению типичных для нейронов первичной слуховой коры характеристик активности. При этом восстанавливался ответ на звуковые сигналы с латентным периодом менее 35 мс, а также амплитуда мультиклеточных ответов. У всех исследованных нейронов восстанавливался тип разряда, а также эффект постстимульной адаптации в ответах на серии тональных сигналов.

Ключевые слова: слуховая кора, гипотермия, одиночные нейроны, доменная мышь, характеристики импульсной активности, слуховая постстимульная адаптация

Effect of hypothermia on discharge properties of neurons in the house mouse (*Mus musculus*) primary auditory cortex

A. G. Akimov¹, M. A. Egorova^{✉1}

¹ Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, 44 Thoreza Ave., Saint Petersburg 194223, Russia

Authors

Alexander G. Akimov, SPIN: 7859-4191, Scopus AuthorID: 36442429100, Researcher ID: C-2820-2008, ORCID: 0000-0003-1659-6227, e-mail: agakimov@yandex.ru

Marina A. Egorova, SPIN: 3883-2885, Scopus AuthorID: 57216641258, Researcher ID: AAN-5197-2020, ORCID: 0000-0002-2650-5619, e-mail: ema6913@yandex.ru

For citation: Akimov, A. G., Egorova, M. A. (2022) Effect of hypothermia on discharge properties of neurons in the house mouse (*Mus musculus*) primary auditory cortex. *Integrative Physiology*, vol. 3, no. 1, pp. 100–109. <https://www.doi.org/10.33910/2687-1270-2022-3-1-100-109>

Received 30 January 2022; reviewed 9 April 2022; accepted 10 April 2022.

Funding: This study was performed with the financial support of funds of the State budget for 2019–2021 (the research theme registration No AAAA-A18-118013090245-6).

Copyright: © A. G. Akimov, M. A. Egorova (2022). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under CC BY-NC License 4.0.

Abstract. The paper reports the results of the study that investigated discharges of neurons in the primary auditory cortex of the house mouse (*Mus musculus*) under general hypothermia. The study focused on multiunit response amplitude, latencies and post-stimulus adaptation to a series of tones at normal body temperature, at body temperature reduced by 1–6 °C and after the normalization of temperature in anesthetized animals. The data were obtained from extracellular recordings. The study showed a significant increase in latencies (on average of 49 ms) and the replacement of patch discharge with a long-latency response. Anesthetized animals do not show such behaviour of auditory cortex neurons at normal body temperature. The amplitude of multiunit responses decreased to the point of a complete fade-away. Parameters of post-stimulus adaptation to a series of tonal signals registered under normal body temperature were distorted during hypothermia. Normalization of body temperature resulted in the recovery of activity typical for primary auditory cortex neurons: the appearance of responses to sound signals with a latency of less than 35 ms, the normalization of post-stimulus adaptation in response to a series of tonal signals in all studied neurons and the normalization of summary response amplitude.

Keywords: auditory cortex, hypothermia, single neurons, house mouse, discharge properties, auditory post-stimulus adaptation

Введение

Гипотермия — состояние пониженной температуры тела у гомойотермных животных. Гипотермия возникает в результате переохлаждения организма в условиях, когда терморегуляторные механизмы неспособны поддерживать температуру тела (Petrone et al. 2014). При жизненной важности понимания механизмов гипотермии и сдерживания ее развития в организме изменения электрической активности мозга у человека и млекопитающих при переохлаждении изучены крайне фрагментарно. Известные работы сосредоточены на изменениях электроэнцефалограммы мозга (Abdurahmanov et al. 2014; Akiyama et al. 2001; Deboer 1998; Massopust et al. 1964; Rabadanova, Mejlanov 2011). Показано, что гипотермия приводит к подавлению электрической активности мозга гомойотермных

животных, а также к индукции тета-ритма, частота которого уменьшается вслед за снижением температуры тела (Rabadanova, Mejlanov 2011). Исследований активности одиночных нейронов коры мозга при переохлаждении, тем более ее сенсорных областей, не проводилось.

На протяжении ряда лет нами выполнялся цикл исследований нейронных механизмов временного анализа звука в слуховых центрах мозга домашней мыши *Mus musculus* (Egorova 2008; Egorova et al. 2019; 2020; Malinina et al. 2016). Известно, что временной анализ — фундаментальный процесс, обеспечивающий распознавание акустических сигналов, в первую очередь коммуникационных криков животных и речи человека, имеющих сложную временную организацию. Нами были подробно исследованы проявления и свойства постстимульной слуховой адаптации нейронов слухового центра сред-

него мозга и слуховой коры мыши и показана ее принципиальная роль во временной обработке последовательностей звуков, а именно — при их разделении и группировании во времени (Egorova et al. 2018; 2019; Malinina et al. 2016). Важность механизма слуховой адаптации для восприятия акустической информации ставит вопрос о его сохранности в слуховой коре при переохлаждении.

Поэтому цель данной работы — изучение особенностей вызванной активности и проявлений слуховой адаптации одиночных нейронов первичной слуховой коры доменной мыши (*Mus musculus*) при общем переохлаждении.

Методы исследования

В работе производили внеклеточную регистрацию импульсной активности нейронов первичных областей слуховой коры больших полушарий мозга наркотизированной доменной мыши *Mus musculus*, самок — гибридов F₁ линии CBA и C57BL/6 в возрасте 12–15 недель.

Методика подготовки животного к эксперименту и регистрации импульсной активности одиночных нейронов слуховой коры подробно описана ранее (Egorova 2005; Egorova, Akimov 2020; Egorova et al. 2001; 2019). Во время операции и на протяжении эксперимента анестезию поддерживали внутривенными инъекциями смеси кетамина (кетавет, 35 мг/кг) и ксилазина (ромпун, 0,1 мг/кг) каждые 20–45 мин.

В ходе эксперимента животное находилось в звукозаглушенной анэхоидной камере. Мыши из контрольной группы располагались на грелке с поддержанием постоянной ректальной температуры тела (38–39 °C). В эксперименте с гипотермией мышь располагалась на металлической пластине без подогрева при окружающей температуре 18 °C в течение восьми часов. Ректальную температуру тела измеряли каждый час. По окончании измерений параметров вызванной активности нейронов в условиях гипотермии включали грелку, и температуру тела животного восстанавливали до нормальной.

Для регистрации импульсной активности нейронов использовали изолированные лаком вольфрамовые микроэлектроды с диаметром кончика 1–3 мкм и сопротивлением 5–6 МОм. Электроды вводили ортогонально поверхности мозга в каудальную часть височной коры левого полушария, соответствующую расположению слуховой коры животного (Stiebler et al. 1997). Регистрацию производили на глубине 300–600 мкм, что соответствовало расположению III–V слоев коры. Эксперимент начинали с аудиовизуаль-

ного определения характеристической частоты (ХЧ) и порога ответа нейрона на тон ХЧ. Нейрональные ответы усиливали в 10 000 раз, фильтровали (диапазон пропускаемых частот 0,3–10 кГц) (WPI, усилитель DAM 80; Science Products, Germany) и выводили параллельно на осциллограф (Tectronix 5A14N), громкоговоритель и оконный дискриминатор (WPI 120; Science Products) с последующей оцифровкой аналого-цифровым преобразователем CED1401 plus (Cambridge Electronic Design, UK) и записью на персональный компьютер (программа Spike2).

Генерация тональных стимулов выполнялась автоматически на базе встроенной в компьютер системной платы TMS320C30 (тактовая частота 200 кГц, разрядность 16 бит) с использованием специализированных программ (TMS97), разработанных Dr. Schulze-Krüger (Германия). После усиления (усилитель Amphyton 25U-002C) сигналы поступали на звукоизлучатель Sonotrack (Metris, Голландия), неравномерность частотной характеристики которого составляла ± 5 дБ в диапазоне частот 3–65 кГц. Излучатель был расположен контралатерально стороне регистрации импульсной активности на расстоянии 60 см под углом 45° справа относительно сагиттальной плоскости. Ось излучателя была соотнесена с наружным слуховым проходом уха животного. Уровни звукового давления сигналов (УЗД, дБ над 20 мкПа) измеряли в точке расположения ушной раковины животного с помощью системы «Брюль и Кьер»: 6,5 мм микрофона 4135, предусилителя 2633 и измерительного усилителя 2606.

В качестве стимулов использовали одиночные тональные импульсы длительностью 50 мс, включая время нарастания и спада по 5 мс, а также серии тональных импульсов, образованные четырьмя 100-миллисекундными тональными посылками, включая время нарастания и спада по 5 мс. Частота сигналов соответствовала ХЧ нейрона, а уровень составлял 40 дБ над порогом ответа, что соответствовало области оптимального ответа большинства нейронов первичной слуховой коры. Интервал между тональными составляющими одной серии был одинаков, а в различных сериях варьировал от 0 до 1000 мс. Ответы нейронов на тональные последовательности регистрировали при межстимульных интервалах, равных 0 мс, 2 мс, 4 мс, 10 мс, 20 мс, 50 мс, 100 мс, 200 мс, 500 мс, 700 мс, 1000 мс. Каждую серию предъявляли 20 раз с интервалом в 2 секунды. Подсчитывали число спайков в ответе нейрона на каждый из тональных сигналов, составляющих серию. Для оценки временной динамики адаптации строили

зависимости числа спайков в ответе от интервала между тональными составляющими серии (кривые восстановления ответа от адаптации).

Сравнивали амплитуды мультикеточного импульсного ответа нейронов, латентные периоды ответов нейронов и кривые восстановления их ответа от постстимульной адаптации к серии звуковых сигналов при нормальной температуре тела, при понижении температуры тела и после ее восстановления у наркотизированных животных. При измерении латентных периодов ответов учитывали акустическую задержку, которая составляла 2 мс. При статистической обработке данных использовали пакет программ Sigma Plot 11.0 (ANOVA, тест Данна). В контрольной серии зарегистрирована активность 26 нейронов первичной слуховой коры мыши, в экспериментальной серии (при переохлаждении) — 14 нейронов.

Результаты и обсуждение

Ректальная температура тела мыши в естественных условиях составляла 39 °С. При такой температуре зарегистрированная нами импульсная активность нейронов первичной слуховой коры соответствовала полученным ранее показателям (Egorova 2005; Egorova et al. 2019). Так, амплитуда мультикеточных импульсных ответов составляла сотни микровольт, латентный период ответа не превышал 38 мс и составлял в среднем 28 ± 3 мс ($x \pm SD$, $n = 306$), нейроны имели фазные характеристики активности, т. е. фазные и пачечные разряды (рис. 1а).

Все исследованные нейроны демонстрировали эффект постстимульной адаптации к сериям тональных импульсов (рис. 1б, 1с). Как было показано нами ранее (Egorova et al. 2019; Egorova, Akimov 2020), адаптация выражалась

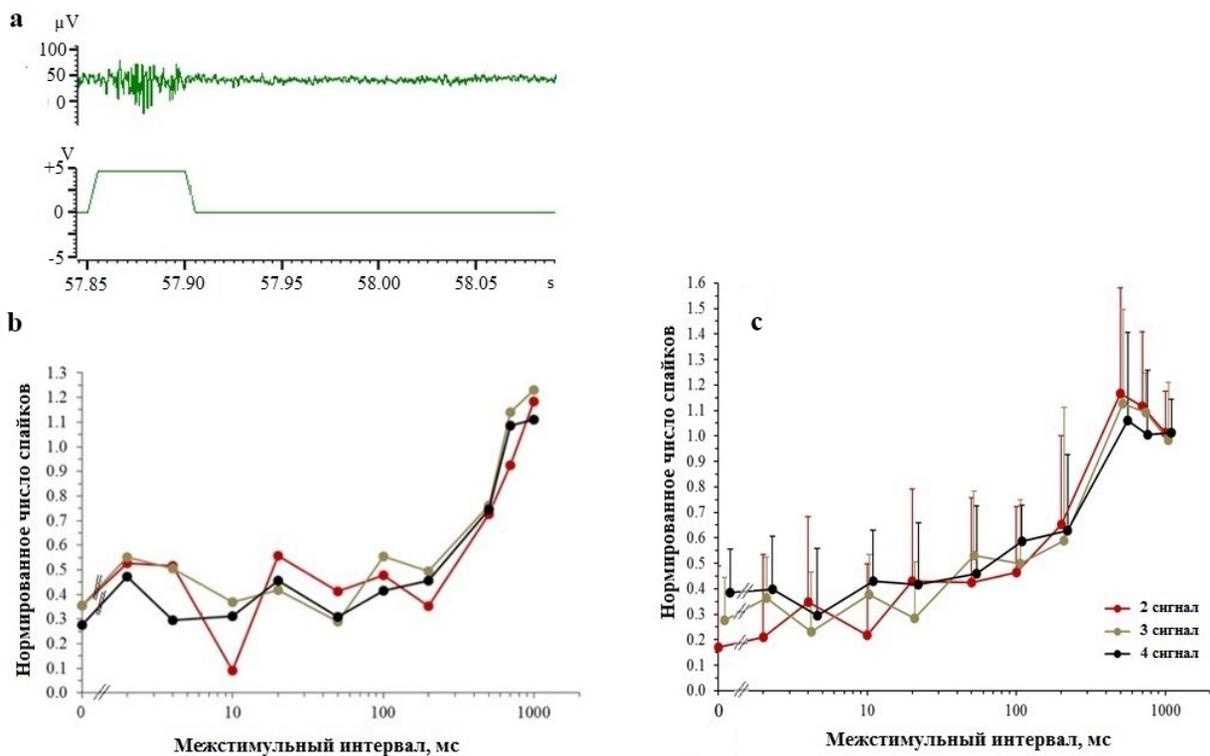


Рис. 1. Характеристики активности нейронов первичной слуховой коры интактных мышей (ректальная температура 39 °С). а — мультикеточный импульсный ответ нейронов на тональный сигнал ХЧ длительностью 50 мс. Ниже — отметка стимула. По оси абсцисс: время; по оси ординат: амплитуда сигнала; б — динамика восстановления от адаптации ответов одиночного нейрона на второй, третий и четвертый тоны по сравнению с ответом на первый тон в сериях с различными межстимульными интервалами (кривые восстановления ответов от адаптации). Величина ответа нейрона (число спайков) на 2–4-й тоны нормирована относительно его ответа на 1-й тон серии, т. е. равна отношению числа спайков в ответе нейрона на соответствующий тон к числу спайков в ответе на 1-й тон; с — кривые восстановления ответов на 2-й, 3-й и 4-й тоны серии от адаптации, усредненные по всем нейронам контрольной группы ($n = 26$). Указаны стандартные отклонения средних величин ответов нейронов на соответствующие компоненты серии

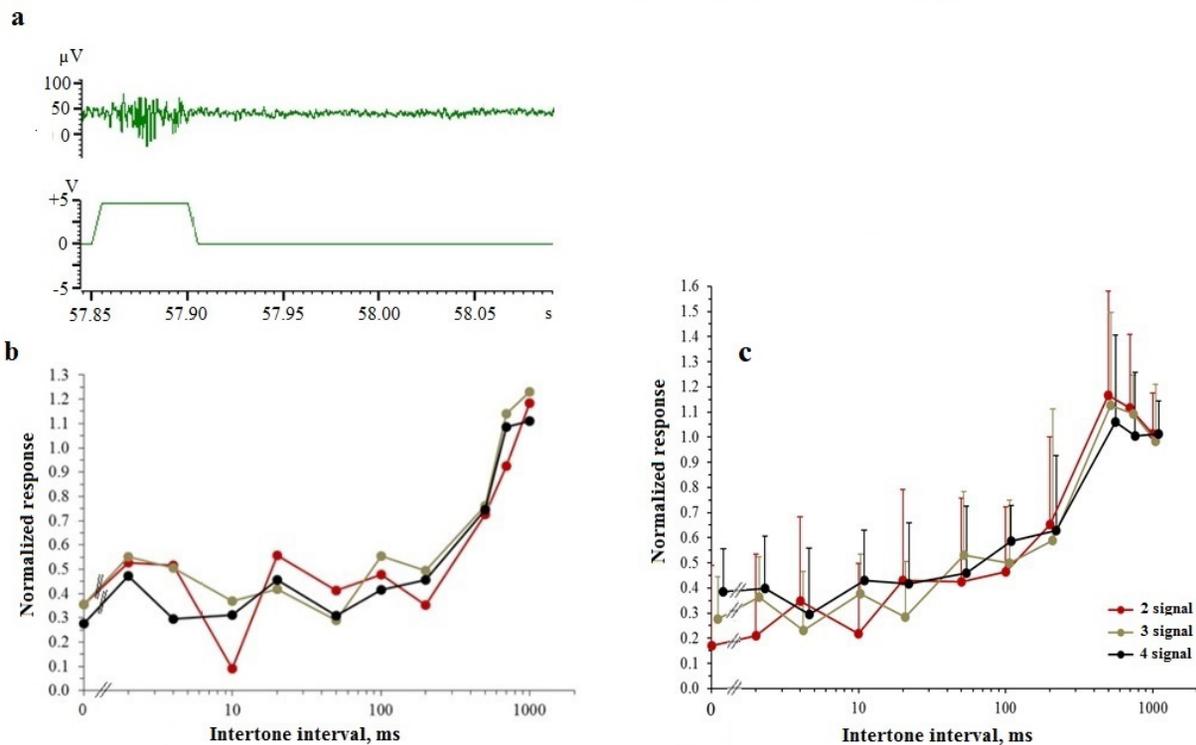


Fig. 1. Evoked response characteristics of primary auditory cortex neurons in intact mice (rectal temperature 39 °C). a—multiunit discharges evoked by 50 ms CF-tone. Below is the stimulus mark. X-axis: time; y-axis: amplitude; b—adaptation recovery curves of the single neuron, i. e., the dependences of responses to the second, third and fourth tones in the series with different intertone intervals. The value of response (spike number) is normalized with respect to the spike number in response to the first tone in the series, i. e., the spike number in responses to the second, third, and fourth tone in the series is divided by the spike number in response to the first tone; c—adaptation recovery curves averaged through control neurons (n = 26). Standard deviation is plotted for each point

в отсутствии или значительном снижении числа спайков в ответе нейрона на следующие за 1-м компоненты в серии тонов при относительно коротких интервалах между ними (0–100 мс). Нормированные функции восстановления ответа на 2-й, 3-й и 4-й тоны в серии монотонно возрастали с увеличением межстимульного интервала вплоть до полного восстановления ответа (рис. 1b, 1c). Восстановление ответа происходило синхронно для 2-го, 3-го и 4-го тонов в серии. Ответ полностью восстанавливался от адаптации почти у 90% нейронов при межстимульном интервале, не превышавшем 700 мс. Статистический анализ временной динамики постстимульной адаптации у всех исследованных нейронов (рис. 1c) показал, что при межстимульных интервалах 0–200 мс ответ на первый сигнал серии достоверно превышал ответы на 2-й, 3-й и 4-й сигналы (ANOVA, тест Данна, $p < 0,05$). Начиная с межстимульного интервала 500 мс ответы нейронов на все сигналы серии достоверно не различались.

Понижение температуры тела животного до 36–33 °C приводило к существенным изменениям амплитудных и в первую очередь временных характеристик ответов нейронов (рис. 2).

Латентные периоды ответов нейронов на тональные сигналы у всех нейронов существенно увеличивались (рис. 2a, 2b). Уже при ректальной температуре тела 36 °C через один час после начала охлаждения животного ответ становился позднелатентным со средним латентным периодом 87 ± 15 мс ($x \pm SD$; n = 282; рис. 2a) и варьировал от 44 до 136 мс. Дальнейшее понижение температуры тела до 33 °C, которое наблюдалось через 7–8 часов после начала охлаждения тела, не приводило к большему увеличению латентных периодов (рис. 2b). Их среднее значение составляло 72 ± 17 мс ($x \pm SD$; n = 625). Латентные периоды ответов корковых нейронов как спустя один час после начала охлаждения, так и через семь часов переохлаждения были достоверно больше, чем при нормальной температуре тела (ANOVA, тест Данна, $p < 0,01$). Как показано нами

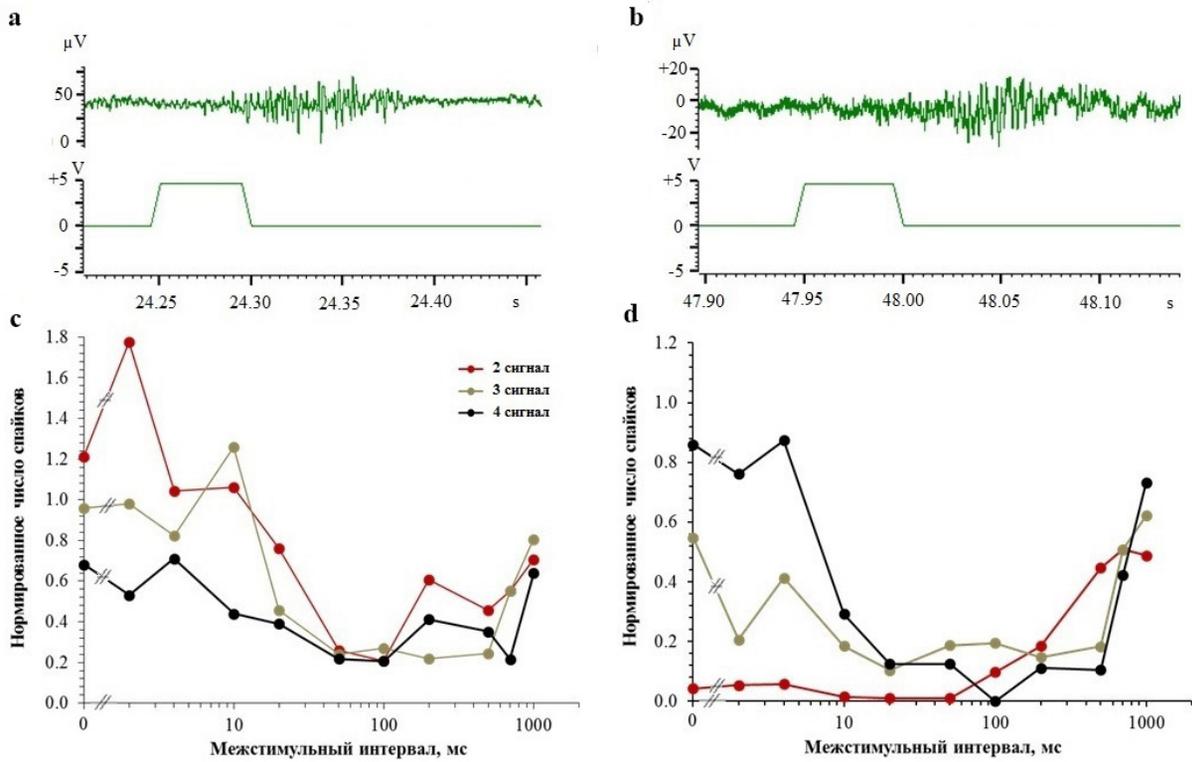


Рис. 2. Характеристики активности нейронов первичной слуховой коры при переохлаждении, длящемся 1 час (а, с: ректальная температура 36 °С), и 7 часов (b, d: ректальная температура 33 °С). а, b — мультиклеточный импульсный ответ нейронов на тональный сигнал ХЧ длительностью 50 мс; с, d — кривые восстановления от адаптации ответов двух нейронов слуховой коры. Остальные обозначения — как на рис. 1

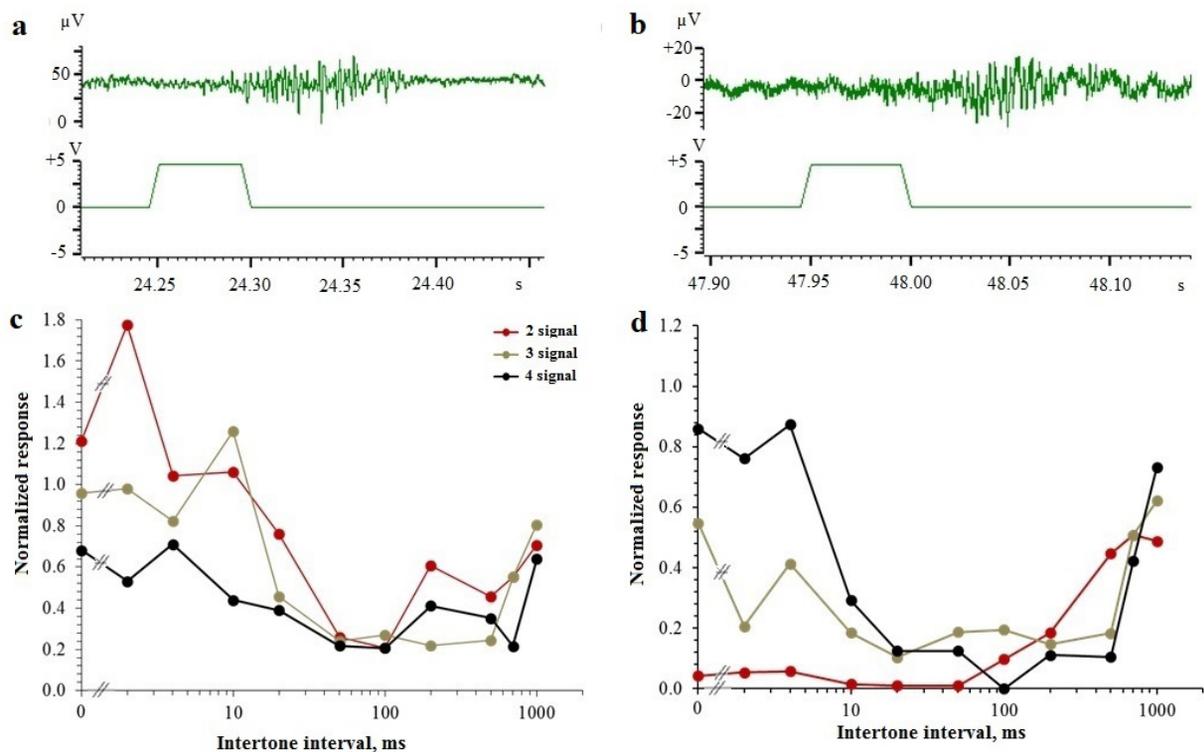


Fig.2. Evoked response characteristics of primary auditory cortex neurons after one hour hypothermia (a, c, rectal temperature 36 °C) and 7 hours hypothermia (b, d, rectal temperature 33 °C). a, b—multiunit dischargers evoked by 50 ms CF-tone; c, d—adaptation recovery curves of two neurons. For other symbols see Fig. 1

ранее (Egorova 2005), позднелатентные ответы не характерны для нейронов слуховой коры наркотизированных мышей при нормальной температуре тела.

Амплитуда мультикеточных импульсных ответов нейронов уменьшалась вплоть до полного угасания. При температуре тела 36 °С величина ответа составляла порядка 50 мкВ, а при 33 °С не превышала 40 мкВ и с трудом выделялась из фоновой активности мозга и помех аппаратуры (рис. 2а, 2б).

Проявления постстимульной адаптации искажались. На рис. 2 (с, d) приведены кривые восстановления от адаптации, построенные для двух корковых нейронов в условиях переохлаждения. Можно с уверенностью говорить об отсутствии проявлений адаптации к серии идентичных тонов при малых межстимульных интервалах (в большинстве случаев до 10 мс). Тенденция к восстановлению от адаптации ответа на 2–4-й тоны в серии прослеживалась при межстимульных интервалах 200–1000 мс, но полного восстановления не происходило. Восстановление не превышало 80% от величины ответа на первый тон в серии, а в большинстве случаев было не больше 60–70%.

Повышение температуры тела до нормальной спустя 8 часов от начала эксперимента приводило к восстановлению типичных для нейронов первичной слуховой коры характеристик активности (рис. 3).

А именно: восстанавливались ответы на звуковые сигналы с латентным периодом менее 35 мс (рис. 3а, 3б). Среднее значение латентности составляло 27 ± 3 мс ($x \pm SD$; $n = 345$) и достоверно не отличалось от латентных периодов ответов, зарегистрированных у интактных мышей. У всех исследованных нейронов восстанавливались параметры постстимульной адаптации в ответах на серии тональных сигналов, причем с прежними временными характеристиками (рис. 3с, 3d). Восстанавливались амплитуда мультикеточного ответа и тип разряда нейронов (рис. 3а, 3б).

Полученные нами результаты в первую очередь демонстрируют принципиальную зависимость временных характеристик активности корковых нейронов (латентных периодов их ответов и проявлений постстимульной адаптации) от температуры. Основываясь на данных литературы, можно предположить, что наибольшей чувствительностью к температуре

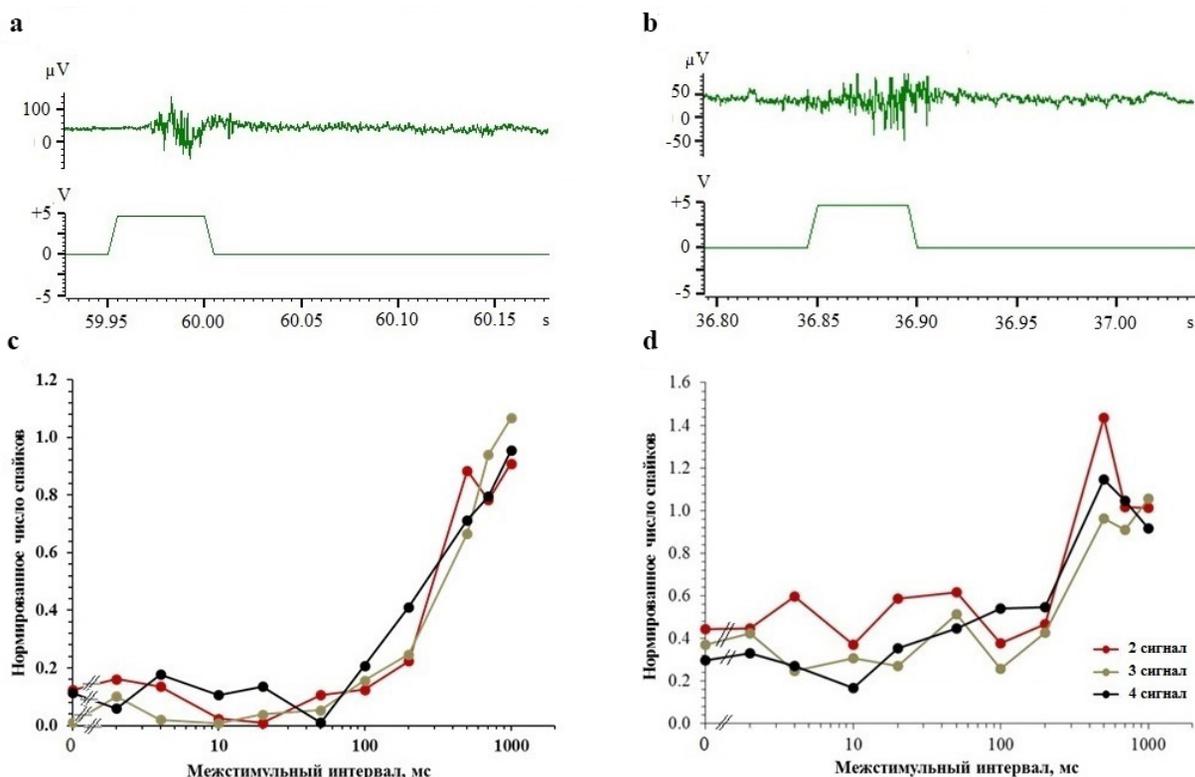


Рис. 3. Характеристики активности нейронов первичной слуховой коры после восстановления нормальной температуры тела (ректальная температура 39 °С). а, б — мультикеточный импульсный ответ нейронов на тональный сигнал ХЧ длительностью 50 мс. с, d — кривые восстановления от адаптации ответов двух нейронов слуховой коры. Остальные обозначения — как на рис. 1

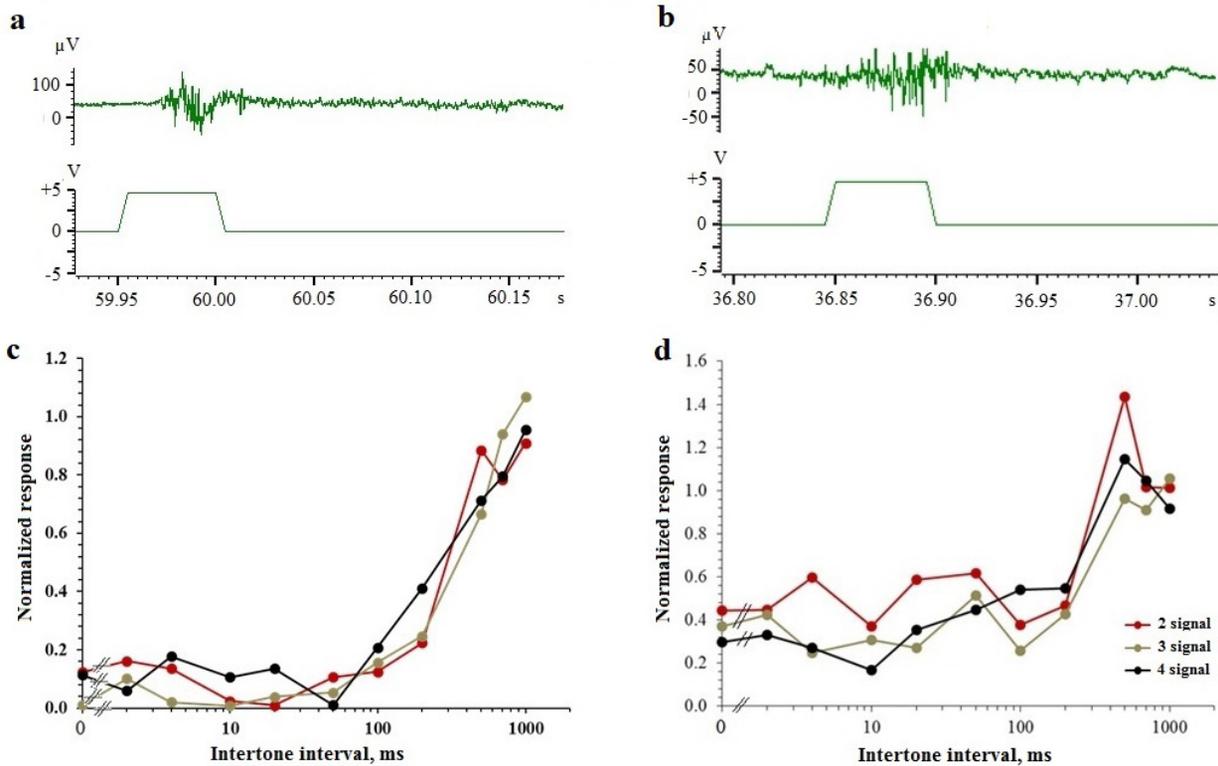


Fig. 3. Evoked response characteristics of primary auditory cortex neurons after the recovery from hypothermia (rectal temperature 39 °C). a, b—multiunit dischargers evoked by 50 ms CF-tone; c, d—adaptation recovery curves of two neurons. For other symbols see Fig. 1

обладают константы скорости открытия и закрытия ионных каналов в пре- и постсинаптических мембранах синапсов, изобилующих у корковых нейронов (Abdurahmanov et al. 2014; Steles et al. 1999). Это, очевидно, определяет существенные изменения латентных периодов ответов нейронов при переохлаждении.

Как было показано ранее (Bregman 1990; Egorova et al. 2019; Malinina et al. 2016), слуховая постстимульная адаптация является одним из механизмов временной обработки слуховой информации. Она определяет границы слуховых событий, объединяя и разделяя их во времени. Временной контекст сигналов (группирование и разделение последовательных звуковых компонентов во времени) способствует их пониманию и запуску специфических поведенческих ответов. Показанные нами в данном исследовании дисфункции в проявлениях постстимульной адаптации при общей гипотермии позволяют предполагать уменьшение разборчивости речи и коммуникационных сигналов животных в условиях переохлаждения.

Выводы

- Впервые показано, что понижение температуры тела мыши до 33 °C приводит к принципиальным изменениям амплитудно-временных характеристик активности нейронов первичных областей слуховой коры: амплитуды мультиклеточного ответа, латентных периодов ответов, проявлений слуховой адаптации одиночных нейронов.
- Изменения обратимы, и при восстановлении температуры тела характеристики активности восстанавливаются.
- Изменения амплитудно-временных характеристик активности нейронов при гипотермии могут быть обусловлены особенностями кинетических характеристик ионных каналов нейронов слуховой системы при пониженной температуре.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Соответствие принципам этики

Все процедуры, выполненные в настоящем исследовании с участием экспериментальных животных (мышей), соответствовали этическим стандартам, утвержденным правовыми актами РФ, принципам Базельской декларации и рекомендациям Комиссии по биоэтике ИЭФБ РАН.

Ethics Approval

All procedures performed in this study involving experimental animals (mice) were conducted in accordance with the ethical standards set by the Russian law, the Basel Declaration, and the recommendations of the IEPH RAS Commission on Bioethics.

Вклад авторов

а. Александр Григорьевич Акимов — проведение экспериментов, обработка и анализ данных, написание текста статьи, подготовка рисунка.

б. Марина Александровна Егорова — планирование исследования, проведение экспериментов, анализ и обсуждение результатов, написание текста статьи и подготовка рисунка.

Author Contributions

a. Alexander G. Akimov—conducted experiments, analysed data, wrote the article, prepared a figure.

b. Marina A. Egorova—planned the research, conducted experiments, analyzed and discussed the results, wrote the text of the article and prepared a figure.

References

- Abdurahmanov, R. G., Pinyaskina, E. V., Gitinomagedova, M. M. (2014) Vliyanie nifedipina na elektricheskuyu aktivnost' mozga krysa pri gipotermii [Influence of nifedipine on electrical brain activity during hypothermia rats]. *Fundamental'nye issledovaniya — Fundamental Research*, no. 8, pp. 620–623. (In Russian)
- Akiyama, T., Kobayashi, K., Nakahori, T. et al. (2001) Electroencephalographic changes and their regional differences during pediatric cardiovascular surgery with hypothermia. *Brain and Development*, vol. 23, no. 2, pp. 115–121. [https://doi.org/10.1016/s0387-7604\(01\)00192-9](https://doi.org/10.1016/s0387-7604(01)00192-9) (In English)
- Bregman, A. S. (1990) *Auditory scene analysis. The perceptual organization of sound*. Cambridge: MIT Press, 792 p. (In English)
- Deboer, T. (1998) Brain temperature dependent changes in the electroencephalogram power spectrum of humans and animals. *Journal of Sleep Research*, vol. 7, no. 4, pp. 254–262. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.1998.00125.x> (In English)
- Egorova, M. A. (2005) Frequency selectivity of neurons of the primary auditory field (A1) and anterior auditory field (AAF) in the auditory cortex of the house mouse (*Mus musculus*). *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, vol. 41, no. 4, pp. 476–480. <https://doi.org/10.1007/s10893-005-0085-4> (In English)
- Egorova, M. A. (2008) Vremennye svoystva impulsnoy aktivnosti odinochnykh slukhovykh neuronov zadnikh kholmov myshi [Temporal characteristics of single neuron evoked activity in the mouse auditory midbrain]. *Sensornye sistemy — Sensory Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 203–213. (In Russian)
- Egorova, M. A., Akimov, A. G. (2020) Specialization of neurons with different response patterns in the mouse *Mus musculus* auditory midbrain and primary auditory cortex during communication call processing. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, vol. 56, no. 5, pp. 406–414. <https://doi.org/10.1134/S0022093020050038> (In English)
- Egorova, M. A., Akimov, A. G., Khorunzhii, G. D., Ehret, G. (2020) Frequency response areas of neurons in the mouse inferior colliculus. III. Timedomain responses: Constancy, dynamics, and precision in relation to spectral resolution, and perception in the time domain. *PLoS ONE*, vol. 15, no. 10, article e0240853. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240853> (In English)
- Egorova, M., Ehret, G., Vartanian, I. et al. (2001) Frequency response areas of neurons in the mouse inferior colliculus. I. Threshold and tuning characteristics. *Experimental Brain Research*, vol. 140, no. 2, pp. 145–161. <https://doi.org/10.1007/s002210100786> (In English)
- Egorova, M. A., Khorunzhii, G. D., Akimov, A. G. (2019) The timescale of adaptation in tonal sequence processing by mouse primary auditory cortical neurons. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, vol. 55, no. 6, pp. 497–501. <https://doi.org/10.1134/S0022093019060085> (In English)
- Egorova, M. A., Malinina, E. S., Akimov, A. G., Khorunzhii, G. D. (2018) Adaptation of different types of neurons in the midbrain auditory center to sound pulse sequences. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, vol. 54, no. 6, pp. 482–486. <https://doi.org/10.1134/S002209301806008X> (In English)

- Malinina, E. S., Egorova, M. A., Khorunzhii, G. D., Akimov, A. G (2016) The time scale of adaptation in tonal sequence processing by the mouse auditory midbrain neurons. *Doklady Biological Sciences*, vol. 470, no. 1, pp. 209–213. <https://doi.org/10.1134/S001249661605001X> (In English)
- Massopust, L. C., Alsin, M. S., Barnes, A. W. et al. (1964) Cortical and subcortical responses to hypothermia. *Experimental Neurology*, vol. 9, no. 3, pp. 249–261. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(64\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0014-4886(64)90022-6) (In English)
- Petrone, P., Asensio, J. A., Marini, C. P. (2014) Management of accidental hypothermia and cold injury. *Current Problems in Surgery*, vol. 51, no. 10, pp. 417–431. <https://doi.org/10.1067/j.cpsurg.2014.07.004> (In English)
- Rabadanova, Z. G., Mejlanov, I. S. (2011) Statisticheskij analiz elektroentsefalogramm krys pri gipotermicheskikh sostoyaniyakh [Statistical analysis of rat electroencephalograms in hypothermic states]. *Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Universiteta — Herald of Dagestan State University*, vol. 1, pp. 113–120. (In Russian)
- Steles, J. R., Kovyasina, I. R., Salpeter, M. M. (1999) The temperature sensitivity of miniature endplate currents is mostly governed by channel gating: Evidence from optimized Recordings and Monte Carlo simulations. *Biophysical Journal*, vol. 77, no. 2, pp. 1177–1187. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(99\)76969-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(99)76969-9) (In English)
- Stiebler, I., Neulist, R., Fichtel, I. et al. (1997) The auditory cortex of the house mouse: Left-right differences, tonotopic organization and quantitative analysis of frequency representation. *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 181, no. 6, pp. 559–571. <https://doi.org/10.1007/s003590050140> (In English)