



Соседова Л.М., Вокина В.А., Панкова А.А., Титов Е.А., Новиков М.А., Савченков М.Ф.

Влияние экспозиции торфяным дымом в ранний постнатальный период на поведение и электроэнцефалограмму взрослых крыс

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665826, Ангарск, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Пребывание в раннем постнатальном периоде в очаге задымленности от природных торфяных пожаров вызывает формирование широкого спектра патологических состояний, наименее изученными из которых остаются отдалённые эффекты воздействия дыма на центральную нервную систему (ЦНС).

Материалы и методы. Ингаляционное воздействие торфяным дымом на новорождённых крыс осуществляли в критические периоды онтогенеза — с 23-го по 27-й день жизни. Содержание СО составляло в ингаляционных камерах 21 (13; 28) мг/м³, РМ_{2.5} — 0,09 (0,04; 0,19) мг/м³. В возрасте трёх месяцев у крыс оценивали функциональное состояние ЦНС. Обследование включало в себя тестирование поведения животных в «открытом поле», оценку результатов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и гистологическое исследование коры головного мозга.

Результаты. У самцов крыс наблюдали выраженное сокращение времени пребывания в центре арены и уменьшение площади исследования, что свидетельствовало об угнетении активно-поисковой составляющей поведения. По результатам ЭЭГ у самцов наблюдали снижение амплитудных характеристик ЭЭГ, происходившее в основном за счёт волн низкочастотного диапазона (дельта- и тета-ритмы), в то время как у самок крыс наблюдалось повышение амплитуды и индекса в большей степени за счёт быстроволновой активности бета-ритма. Изменений структуры нервной ткани не выявлено.

Ограничения исследования. Данное исследование ограничено изучением взрослых половозрелых белых крыс, подвергавшихся воздействию торфяного дыма с 23-го по 27-й день жизни.

Заключение. Воздействие торфяного дыма в постнатальный период приводит к нарушению видоспецифического поведения, амплитудно-частотных свойств суммарной биоэлектрической активности коры мозга у взрослых половозрелых белых крыс. Наиболее существенные сдвиги нарушения состояния ЦНС проявляются у самцов.

Ключевые слова: торфяной дым; крысы; постнатальный период; центральная нервная система; поведение

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ ВСИМЭИ (протокол № 32 от 10.01.2023 г.), проведено в соответствии с Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS N 123), директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, использующихся для научных целей.

Для цитирования: Соседова Л.М., Вокина В.А., Панкова А.А., Титов Е.А., Новиков М.А., Савченков М.Ф. Влияние экспозиции торфяным дымом в ранний постнатальный период на поведение и электроэнцефалограмму взрослых крыс. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(6): 675–681. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-6-675-681> <https://elibrary.ru/pxflla>

Для корреспонденции: Соседова Лариса Михайловна, e-mail: sosedlar@mail.ru

Вклад авторов: Соседова Л.М. — концепция и дизайн исследования, обзор литературы по теме статьи, написание текста; Вокина В.А. — концепция и дизайн исследования, проведение эксперимента, обработка, анализ и интерпретация данных, обзор литературы по теме статьи, написание текста; Панкова А.А. — проведение эксперимента, сбор и первичная обработка материала, статистическая обработка данных; Титов Е.А. — сбор и подготовка гистологических препаратов, обработка материала, статистическая обработка данных; Новиков М.А. — сбор и подготовка гистологических препаратов, обработка материала, статистическая обработка данных; Савченков М.Ф. — редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Работа выполнялась по плану НИР в рамках государственного задания.

Поступила: 24.03.2026 / Поступила после доработки: 18.05.2026 / Принята к печати: 18.06.2026 / Опубликовано: 31.07.2026

Larisa M. Sosedova, Vera A. Vokina, Anna A. Pankova, Evgeny A. Titov, Mikhail A. Novikov, Mikhail F. Savchenkov

Effects of peat smoke exposure during the early postnatal period on behavior and electroencephalogram in adult rats

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Exposure to smoke from natural peat fires during the early postnatal period leads to the development of a wide range of pathological conditions, among which the long-term effects of smoke on the central nervous system (CNS) remain the least studied.

Materials and methods. Inhalation exposure of newborn rats to peat smoke was carried out during critical periods of ontogenesis — from the 23rd to the 27th day of life. The CO concentration in the inhalation chambers was 21 (13; 28) mg/m³, and the PM_{2.5} concentration was 0.09 (0.04; 0.19) mg/m³. At 3 months of age, the functional state of the CNS was assessed in the rats. The examination included open field behavioral testing, EEG recording, and histological examination of the cerebral cortex.

Results. Males exhibited a sharp reduction in time spent in the center of the arena and a decrease in the exploratory area, indicating suppression of the active-searching component of behavior. EEG results in males showed a decrease in EEG amplitude characteristics, primarily due to waves in the low-frequency range (delta and theta rhythms). In females, conversely, an increase in amplitude and index was observed, largely due to fast-wave beta rhythm activity. No changes in nervous tissue structure were detected.

Limitations. This study is limited to adult sexually mature white rats exposed to peat smoke from 23rd to 27th postnatal day.

Conclusion. Exposure to peat smoke in the early postnatal period leads to impairments in species-specific behavior and the amplitude-frequency properties of the total bioelectrical activity of the cerebral cortex in adult sexually mature rats. The most significant shifts in CNS impairment are observed in male white rats.

Keywords: peat smoke; rats; postnatal period; central nervous system; behavior

Compliance with ethical standards. The study was approved by the Local Ethics Committee of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research (Protocol No. 32 dated 01/10/2023) and was conducted in accordance with the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes (ETS No. 123) and Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of the European Union of September 22, 2010 on the protection of animals used for scientific purposes.

For citation: Sosedova L.M., Vokina V.A., Pankova A.A., Titov E.A., Novikov M.A., Savchenkov M.F. Effects of peat smoke exposure during the early postnatal period on behavior and electroencephalogram in adult rats. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(6): 675–681. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-6-675-681> <https://elibrary.ru/pxffua> (In Russ.)

For correspondence: Larisa M. Sosedova, e-mail: sosedlar@mail.ru

Contributions: Sosedova L.M. — study concept and design, literature review, manuscript writing; Vokina V.A. — study concept and design, experiment conduction, data processing, analysis and interpretation, literature review, manuscript writing; Pankova A.A. — experiment conduction, data collection and primary processing, statistical analysis; Titov E.A. — histological specimen preparation and processing, data processing, statistical analysis; Novikov M.A. — histological specimen preparation and processing, data processing, statistical analysis; Savchenkov M.F. — editing, approval of the final version of the manuscript, responsibility for the integrity of all parts of the manuscript.

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

Funding. The study had no sponsorship.

Received: March 24, 2026 / Revised: May 18, 2026 / Accepted: June 18, 2026 / Published: July 31, 2026

Введение

Ежегодно в России возникают сотни лесных пожаров, приводящих к интенсивному задымлению городов и посёлков в период с апреля по октябрь. Традиционно исследуется влияние дыма на взрослое население или ликвидаторов пожаров. Однако в равной мере воздействию дымом подвергается и особо чувствительное детское население. Серьёзная проблема накопления химического груза у детей и подростков может быть недооценена с позиции вклада в нарушение здоровья во взрослом возрасте. На современном этапе последствия природных пожаров (ПП) для здоровья населения оцениваются в большей степени в краткосрочной перспективе по показателям смертности и заболеваемости, в то время как отдалённые эффекты воздействия дыма ПП на организм и потомство изучены недостаточно. Дым содержит опасную смесь химических соединений, твёрдых частиц и ультрадисперсных твёрдых частиц $PM_{2.5}$, которые негативно влияют на здоровье. Воздействие загрязнения воздуха в течение первого года жизни связано с ухудшением функции лёгких у детей [1–4]. Авторы установили, что воздействие загрязнённого воздуха в младенческом возрасте негативно сказывается на показателе функции внешнего дыхания в возрасте 16 лет, повышая риск клинически значимых нарушений. Количество и разнообразие факторов окружающей среды, с которыми ребёнок сталкивается в первые месяцы и годы жизни, имеют связь с риском развития аллергической сенсибилизации и болезней [5], однако исследование ограничивались лишь достижением подросткового периода ребёнка. Особенно важно выявление критических периодов развития, когда воздействие дыма от лесных пожаров может привести к повышенной чувствительности организма маленьких детей. Установлено, что суммарная химическая нагрузка на растущий организм возрастает с каждым годом начиная с внутриутробного периода [6], однако исследований модифицирующих факторов, влияющих в раннем периоде жизни на риск нарушений здоровья во взрослом возрасте, в настоящее время недостаточно. Чтобы определить эффективные меры, уменьшающие риск развития нарушений здоровья, необходимо понять, как факторы окружающей среды, в том числе дым ПП, влияют на функциональное состояние организма в онтогенезе.

В настоящий период мало что известно о долгосрочных последствиях для здоровья интоксикации дымом лесных пожаров. Мы высказали гипотезу о негативном влиянии дыма лесных пожаров во время беременности или в ранний постнатальный период на функциональное состояние центральной нервной системы (ЦНС) во взрослом возрасте.

Цель настоящего исследования — изучение структуры видоспецифического поведения и биоэлектрической активности головного мозга взрослых крыс, подвергавшихся в ювенильном периоде воздействию торфяного дыма.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования выполнены на базе вивария ФГБНУ ВСИМЭИ на 60 белых крысах Wistar обоих полов (масса тела 200–230 г). Животных содержали с 12-часовым светлым/тёмным циклом, регулируемой температурой плюс 22 ± 3 °C и влажностью 60%, со свободным доступом к чистой водопроводной воде и полнорационному гранулированному корму «Дельта Фидс» (АО «БиоПро», Россия). Все экспериментальные животные получены путём собственного воспроизводства в виварии ФГБНУ ВСИМЭИ. Исследование проведено в соответствии с принципами, изложенными в Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях, ETS N 123, ГОСТ 33215–2014 и одобрено Этическим комитетом ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований» (протокол № 7 от 15 декабря 2023 г.).

Ингаляционное воздействие торфяным дымом осуществляли в критические периоды онтогенеза (с 23-го по 27-й день жизни). Были сформированы две опытные группы экспериментальных животных по 15 особей в каждой:

- белые крысы-самцы, воздействие торфяного дыма P23–27 (Опыт 1);
- белые крысы-самки, воздействие торфяного дыма P23–27 (Опыт 1).

Необходимый уровень задымления достигался в ингаляционных камерах объёмом 200 л путём разбавления дыма чистым воздухом [7]. Режим воздействия торфяного дыма на экспериментальных животных: по четыре часа в день в течение пяти дней. В пробах воздуха каждые 15 мин с помощью газоанализатора ГАНК-4 (НПО «Прибор», Россия) регистрировали содержание кислорода, диоксида углерода, оксида углерода, фурфурола, ацетальдегида, акролеина, сероуглерода, а также концентрацию твёрдых частиц диаметром менее 2,5 мк ($PM_{2.5}$) с использованием анализатора аэрозоля DustTrak 8533 (TSI Inc., США). Контрольная группа крыс не подвергалась ингаляционному воздействию торфяным дымом и также состояла из подгруппы самцов и подгруппы самок (по 15 особей в каждой). При ингаляционном воздействии поддерживался целевой уровень монооксида углерода (CO), медианное значение и интерквартильный размах которого составляли 21 (13; 28) мг/м³. Данный уро-

Таблица 1 / Table 1

Показатели поведения самцов и самок белых крыс в тесте «открытое поле», $Me (Q_{25}; Q_{75})$ **Behavioral indicators in male and female white rats in the open field test, $Me (Q_{25}; Q_{75})$**

Показатель Indicator	Самцы Males		Самки Females	
	Контроль Control	Опыт Experiment	Контроль Control	Опыт Experiment
Нахождение в центре, с Being in the center, s	3.2 (1; 4.6)	0.3 (0; 2.3)*	2.9 (0.4; 5.8)	2.2 (0.5; 3.7)
Площадь исследованной арены, % The area of the explored arena, %	48.4 (39.8; 55.4)	35.3 (29.2; 45.2)*	47.9 (39.4; 68.7)	46.5 (40.4; 60.1)
Пройденный путь, м Distance traveled, m	7.8 (6.3; 9.5)	6.9 (6; 7.6)	8.9 (8.3; 10.3)	9.2 (7.7; 10.8)
Вертикальная активность Vertical activity	26.8 (20.1; 36.6)	27.4 (23.8; 37.8)	31 (26.2; 38.5)	28.5 (23.9; 39.5)

Примечание. Здесь и в табл. 2: * — статистически значимые различия при сравнении с контрольной группой при $p < 0,05$.

Note: Here and in Table 2: * — statistically significant differences when compared with the control group at $p < 0.05$.

вень воздействия торфяного дыма был выбран нами как часто встречающийся в населённых пунктах при загрязнении дымом лесных пожаров, не вызывающий отравления у крыс, а также близкий к предельно допустимой концентрации в рабочей зоне [8]. Содержание O_2 поддерживалось притоком чистого воздуха и не снижалось в течение экспозиции ниже 18,7%, медианное значение концентрации CO_2 не превышало 0,17%. Концентрация твёрдых частиц диаметром менее 2,5 мк ($PM_{2.5}$) в среднем составляла 0,09 (0,04; 0,19) мг/м³.

В возрасте трёх месяцев у крыс оценивали функциональное состояние ЦНС. В исследование входили тестирование поведения животных в «открытом поле», оценка результатов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) и гистологический анализ коры головного мозга. Установка «открытое поле» представляла собой круглую арену диаметром 110 см с полупрозрачным полом и бортиками высотой 40 см с инвертированным освещением и системой компьютерной регистрации EthoStudio (Россия) [9]. Животное помещали около стенки и в течение трёх минут регистрировали пройденный путь, площадь исследованной арены, вертикальную активность и время нахождения в центре арены.

Для оценки функциональной активности головного мозга проводили регистрацию ЭЭГ с использованием портативного восьмиканального ветеринарного компьютерного электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-1/В» («Нейрософт», Россия). Для ограничения движения во время размещения электродов и записи ЭЭГ животным вводили подкожно 0,1%-й раствор медетомидина гидрохлорида в дозе 0,01 мг/кг. Запись ЭЭГ проводилась в затемнённой тихой комнате. Использовали тонкие игольчатые электроды: 1) два регистрирующих электрода вводили подкожно в области левого и правого полушарий теменной части головы; 2) референтный электрод вводили подкожно в области носовой кости; 3) заземляющий электрод фиксировали на хвосте. Регистрировали ЭЭГ в режиме фоновой пробы в течение 60 с. При записи ЭЭГ границы фильтров высоких и низких частот составляли 0,5 и 35 Гц, частота дискретизации — 200 с⁻¹. Деление на диапазоны проводили в пределах следующих значений частот: δ -диапазон — 0,5–4 Гц; θ -диапазон — 4–8 Гц; α -диапазон — 8–13 Гц; β_1 -диапазон — 13–22 Гц; β_2 -диапазон — 22–32 Гц. Длительность эпох анализа составляла 10 с. Оценивали следующие нейродинамические параметры ЭЭГ: амплитуда каждого диапазона (δ , θ , α , β_1 и β_2); мощность диапазонов, которая выражалась в относительных величинах мощности как доля (в %) от общей мощности спектра; индекс каждого ритма (процент времени записи, во время которого фиксировалась активность соответствующего частотного диапазона по отношению ко всему времени записи). После окончания обследований животные были выведены из эксперимента путём декапитации под лёгким эфирным наркозом.

После этого головной мозг каждого исследуемого животного был извлечён и фиксирован в нейтральном буферном

растворе формалина (10%), обезвожен этанолом восходящей концентрации (70; 80; 90; 95 и 100%) и помещён в гомогенизированную парафиновую среду для гистологических исследований HistoMix (BioVitrum, Россия). Далее приготовленные с помощью микротомы MC-1 (Россия) серийные фронтальные срезы головного мозга толщиной 4–5 мкм на уровне Bregma-6,10 мм, Interaural 3,90 мм окрашивали на обычных гистологических предметных стеклах крезоловым фиолетовым по методу Ниссля. Была изучена нервная ткань височного-теменной зоны сенсомоторной коры головного мозга как нервный центр, обеспечивающий регуляцию основных физиологических функций организма и сложные формы поведения. В окрашенных срезах головного мозга подсчитывали общее число нейронов на единицу площади, клетки глии, дегенеративно изменённых нейронов (дегенеративно изменёнными считали тёмноокрашенные нейроны без чётко различимого ядра и цитоплазмы) и число актов нейронафгии. Полученные срезы изучали при помощи светооптического исследовательского микроскопа Olympus BX 51 (Япония) с вводом микроизображений в компьютер при помощи камеры Olympus E420 (Япония). Применяли пакет прикладных программ Image Score M.

Для статистической обработки результатов исследования использовали пакет прикладных программ Statistica 6.1 Stat Soft Inc. (США) (лицензия № AXXR004E642326FA, правообладатель лицензии ФГБНУ ВСИМЭИ). Для принятия решения о виде распределения признаков использовали W -критерий Шапиро — Уилка, для сравнения независимых групп применяли U -критерий Манна — Уитни. Результаты представлены в виде медианы и интерквартильного размаха $Me (Q_1; Q_3)$.

Результаты

Анализ результатов тестирования поведения животных в тесте «открытое поле» свидетельствовал о наличии гендерной чувствительности к воздействию торфяного дыма у белых крыс. У экспонированных дымом самцов белых крыс наблюдались статистически значимые изменения показателей индивидуального видоспецифического поведения (табл. 1), в то время как двигательная активность самок, подвергавшихся воздействию торфяного дыма в раннем постнатальном периоде, по исследуемым показателям не отличалась от контрольной группы (см. табл. 1).

Самцы опытной группы практически не выходили в центр, что свидетельствовало о значительном повышении уровня их тревожности. Среднее значение времени пребывания в центральной части арены было снижено в 10,7 раза ($p = 0,015$; см. табл. 1). Кроме того, у самцов, подвергавшихся воздействию торфяного дыма в раннем постнатальном периоде, наблюдалось выраженное снижение исследовательской активности. Площадь исследованной арены у данных особей была на 27% ниже соответствующего показателя животных контрольной группы ($p = 0,017$). Выявленные

Таблица 2 / Table 2

Средняя амплитуда спектров и индексы основных ритмов ЭЭГ белых крыс-самцов и самок, *Me* (Q_{25} ; Q_{75})Average amplitude of spectra and indices of main EEG rhythms in male and female white rats, *Me* (Q_{25} ; Q_{75})

Диапазон Range		Самцы Males				Самки Females			
		Средняя амплитуда, мкВ Average amplitude, MV		Индексы основных ритмов, % Indices of the main rhythms, %		Средняя амплитуда, мкВ Average amplitude, MV		Индексы основных ритмов, % Indices of the main rhythms, %	
		Контроль Control	Опыт Experiment	Контроль Control	Опыт Experiment	Контроль Control	Опыт Experiment	Контроль Control	Опыт Experiment
Дельта-ритм Delta rhythm	ЛП	74.8 (68.4; 92.4)	42.5 (0; 76.2)	1.7 (1.1; 3.1)	0.2 (0; 1.7)#	74.6 (54.1; 90.6)	82 (73.7; 87.7)	2.4 (0.7; 3.1)	1.2 (0.7; 2.4)
	ПП	84.3 (66.7; 88.1)	41.9 (13.1; 61.8)*	1.4 (1.2; 3.1)	0.3 (0.1; 1.6)#	71.1 (55.9; 77.1)	75.8 (67.7; 85.4)	2.1 (1.3; 2.9)	1.3 (0.5; 2.6)
Тета-ритм Theta rhythm	ЛП	59.2 (58.3; 64.6)	53.6 (47.5; 55.3)*	17.7 (14.6; 19.4)	9.2 (5.2; 14.2)*	60.5 (56.6; 64)	60.8 (56.5; 65.5)	16.4 (15; 17.7)	14.7 (11.5; 14.9)
	ПП	58.4 (56.9; 64.1)	53.9 (48.2; 56.5)*	16.5 (15.7; 18.5)	9.8 (8.9; 15.2)*	58.4 (56.6; 59.5)	60.9 (57.8; 67.7)	15.5 (15.3; 17.9)	12.3 (11.4; 16.2)
Альфа-ритм Alpha rhythm	ЛП	42.4 (39.6; 49.7)	39 (37; 40.7)	35 (33.1; 37.8)	31.3 (30.6; 37.5)	41.7 (38.7; 42.5)	44.7 (40.7; 46.6)	35.9 (30.2; 36.3)	29.2 (26.3; 38.4)
	ПП	41.5 (40; 48.3)	38.8 (35.8; 41.2)	36.2 (29.7; 38.1)	34 (31; 37.7)	40.6 (38.6; 44.2)	43 (40; 48.8)	36.8 (33.3; 37.4)	32.8 (28.1; 33.8)
Низкочастотный бета-ритм Low-frequency beta rhythm	ЛП	23.5 (21.7; 27.8)	21.7 (21.4; 22.1)	17.7 (16.8; 22.8)	18.7 (16.8; 21.6)	21.6 (17.2; 21.7)	28.1 (26.7; 29.6)*	20.4 (16.1; 21.2)	18.5 (17.2; 22.4)
	ПП	22.9 (20.8; 29.1)	21 (19.1; 25.5)	17.8 (14.9; 22)	19.1 (17.8; 20)	21 (17.8; 22.3)	27.2 (23.2; 28.5)	18.8 (15.4; 19.3)	19.4 (16.8; 21.3)
Высокочастотный бета-ритм High-frequency beta rhythm	ЛП	11.4 (10.6; 16.4)	11.8 (10.3; 16.7)	12.2 (10.8; 16.2)	20.7 (10.8; 27.5)*	10.4 (9.3; 10.9)	18.9 (14.7; 37.9)*	10 (7.7; 14.5)	20.1 (14.3; 24.8)*
	ПП	12 (11.2; 15.5)	11.3 (10.4; 13)	12 (10.7; 14.1)	18.5 (10.8; 24.4)	10.1 (9.8; 11.3)	17.7 (11.6; 35.2)*	10 (7.5; 14.8)	18.7 (13.1; 23.9)*

Примечание. ЛП – левое полушарие мозга; ПП – правое полушарие мозга; # – различия имеют характер тенденции.

Note: ЛП – the left hemisphere of the brain; ПП – the right hemisphere of the brain; # – the differences are of a trend nature.

изменения видоспецифического поведения крыс-самцов могут являться показателем повышенной стрессированности и тревожности.

При анализе результатов ЭЭГ животных опытных и контрольных групп, подвергавшихся воздействию торфяного дыма в ювенильном периоде, выявлены различия в биоэлектрической активности у взрослых самцов и самок. Снижение амплитудных характеристик ЭЭГ самцов, подвергавшихся воздействию дыма в раннем пренатальном возрасте, происходило в основном за счёт снижения средних амплитуд дельта- и тета-ритмов. Снижение средней амплитуды дельта-ритма опытных самцов составило 43 и 50% в левом и правом полушариях мозга соответственно ($p = 0,038$ и $p = 0,007$; табл. 2). Амплитуда тета-ритма в левом полушарии была снижена на 9% по сравнению с контролем ($p = 0,007$), в правом полушарии – на 8% ($p = 0,026$; см. табл. 2).

Анализ основных ритмов ЭЭГ показал, что у самцов белых крыс индекс дельта-ритма в обоих полушариях также имел тенденцию к снижению ($p = 0,053$; см. табл. 2). У самцов опытной группы в левом и правом полушариях

наблюдалось статистически значимое снижение индексов тета-ритма на 40–48% по сравнению с группой контроля ($p = 0,002$ и $p = 0,001$ соответственно). Представленность высокочастотного бета-ритма у них превышала показатели контрольной группы. В левом полушарии данные изменения имели высокую статистическую значимость ($p = 0,005$).

У взрослых самок белых крыс выявлено статистически значимое превышение средней амплитуды высокочастотного бета-ритма в правом и левом полушариях на 75–82% ($p = 0,002$ и $p = 0,005$ соответственно; см. табл. 2). Средняя амплитуда низкочастотного бета-ритма в обоих полушариях была повышена на 29–30% относительно контроля, однако статистическую значимость наблюдаемые изменения имели лишь в левом полушарии ($p = 0,002$). Изменения амплитудных характеристик в других диапазонах волн на ЭЭГ самок белых крыс не выявлены. У этих же самок наблюдалось достоверное повышение индекса представленности высокочастотного бета-ритма в обоих полушариях в 1,8–2 раза ($p = 0,022$; см. табл. 2).

Таблица 3 / Table 3

Морфометрические показатели ткани сенсомоторной коры головного мозга белых крыс при воздействии дыма торфяных пожаров, *Me* (Q_{25} ; Q_{75})Morphometric indicators of the sensorimotor cortex tissue of white rats exposed to peat fire smoke, *Me* (Q_{25} ; Q_{75})

Показатель Indicators	Контроль Control	Самки Females
Число нормальных нейронов на единицу площади The number of normal neurons per area unit	265.5 (202.8; 274.5)	238.1 (186.2; 337.2)
Число глиоцитов на единицу площади Number of gliocytes per area unit	103.9 (84.3; 108.0)	113.9 (97.6; 128.5)
Число дегенеративно изменённых нейронов на единицу площади Number of degeneratively altered neurons per area unit	2.7 (2.3; 3.7)	5.0 (2.9; 9.6)
Число актов нейрофагии на единицу площади Number of acts of neurophagy per area unit	0.5 (0.3; 0.9)	1.1 (0.5; 2.1)

Результаты гистологической и морфометрической оценки состояния сенсомоторной коры головного мозга белых крыс при воздействии дыма торфяных пожаров не отличалась от контрольных значений. Кровенаполнение сосудов вещества мозга животных опытной группы было в норме. Сосудистые стенки не имели изменений (табл. 3).

Обсуждение

В ряде регионов Российской Федерации (Якутия, Забайкальский край, Республика Бурятия, Дальний Восток и др.) масштабные природные пожары происходят регулярно, в пожароопасный период население ежегодно подвергается воздействию продуктов горения, поэтому исследования воздействия дыма лесных пожаров в долгосрочной перспективе имеют высокую значимость. Дым от лесных пожаров представляет собой сложную химическую смесь газов и мелких частиц и является одним из основных источников твёрдых частиц, в том числе мелкодисперсных ($PM_{2.5}$) [10], которые, по мнению [11], стали причиной более 8,8 млн преждевременных смертей по всему миру. Эпидемиологические исследования [3, 12, 13] доказывают, что воздействие лесных пожаров, дыма от сжигания древесины и биомассы повышает риск респираторных инфекций и снижения функции лёгких у детей и подростков. Острые последствия лесных пожаров или сжигания биомассы в некоторой степени изучены, однако влияние компонентов дыма, в том числе и твёрдых частиц, внутриутробно или в раннем детстве и долгосрочные последствия воздействия изучены недостаточно. Особенно значимы критические периоды развития, когда интенсивное воздействие может формировать повышенную чувствительность и обуславливать нарушения здоровья во взрослом возрасте. Ранний постнатальный период, вероятно, является критическим периодом восприимчивости дыхательной системы к загрязнению воздуха [14]. Эмбриональный и ранний постнатальный периоды онтогенеза исключительно важны и в динамике развития головного мозга. Формирование и свойства этого органа определяются не только генетическими факторами, но и средой, создаваемой в комплексе с внешними факторами [15]. В исследованиях мы придерживались следующей возрастной периодизации развития белых лабораторных крыс: новорождённые (1–2-я недели), 1 мес (ранний постнатальный), 6 мес (репродуктивный), 12 мес (зрелый), 2 года (старческий) [16]. При этом периоды новорождённости и ранний постнатальный условно именуются критическими периодами онтогенеза белых крыс. Неблагоприятные воздействия в данный высокочувствительный для мозга период могут нарушать нормальное развитие нервной системы, созревание коры головного мозга и вызывать необратимые последствия [17]. Одним из таковых может стать пребывание в раннем постнатальном возрасте в среде с высокой степенью или длительностью задымления от природных пожаров. К возможным механизмам негативных эффектов дыма от лесных пожаров относится способность твёрдых частиц вызывать сочетание окислительного стресса и воспаления, что может дополнительно вызывать физиологические [18–20] или эпигенетические изменения [21, 22]. Анализ результатов проведённого моделирования интоксикации торфяным дымом в ранний постнатальный период подтвердил высказанную гипотезу о длительных негативных последствиях воздействия задымления для ЦНС. Нами были оценены последствия экспозиции торфяным дымом белых крыс в критический период онтогенеза на функциональное состояние нервной системы взрослых особей. Анализ результатов тестирования белых крыс в условиях «открытого поля» показал повышенную чувствительность к воздействию торфяного дыма, имеющую явно выраженные гендерные отличия. У самцов, подвергшихся воздействию торфяного дыма, были выявлены значительные отклонения видоспецифического поведения, в то время как структура поведения опытных самок не отличалась от контрольных. Самцы демонстрировали резкое

сокращение пребывания в центре арены и уменьшение площади исследования, что свидетельствует об угнетении активно-поисковой составляющей поведения. По мнению авторов [23, 24], угнетение двигательной активности относится к проявлениям защитного торможения, которое возникает у животных в ответ на развивающийся стресс. Существенное снижение исследовательской активности у половозрелых самцов (3–3,5 мес), подвергавшихся воздействию торфяного дыма в ранний постнатальный период, может свидетельствовать о возможном нарушении адаптационных механизмов организма, сохраняющемся длительным периодом.

Известно, что формирование активности основных ритмов ЭЭГ в основном происходит в первый месяц постнатального онтогенеза животных. Среди признаков зрелости в динамике биоэлектрической активности головного мозга важную информацию несёт частотно-амплитудный спектр ЭЭГ. Гендерные различия у крыс в половозрелом возрасте выявлены и при изучении результатов электроэнцефалографии. Последствия экспозиции торфяным дымом имели разнонаправленное действие на ряд показателей спектральных характеристик ЭЭГ у самцов и самок белых крыс. У самцов наблюдали снижение амплитудных характеристик ЭЭГ, происходившее в основном за счёт волн низкочастотного диапазона (дельта- и тета-ритмы). Известно, что во время поисково-исследовательской активности во всех отведениях и особенно в области теменной коры над гиппокампом начинают доминировать тета-ритмы. Полученное в нашем эксперименте уменьшение амплитуд волн дельта- и тета-ритмов во многом обуславливает снижение исследовательской активности и повышенную тревожность самцов белых крыс, наблюдаемые при тестировании в «открытом поле».

В отличие от самцов у особей женского пола наблюдалось повышение амплитуды и индекса в большей степени за счёт быстроволновой активности бета-ритма, то есть спектр ЭЭГ сдвигался в сторону более высокочастотных ритмов, и, следовательно, повышался уровень активации. Выявленные нами неспецифические изменения амплитуды и индекса основных ритмов во всех диапазонах могут свидетельствовать о формировании в мозге половозрелых животных с экспозицией дымом природных пожаров в ранний постнатальный период нового уровня функциональной активности. Возможно, это обусловлено активацией как процессов возбуждения, так и торможения, что подтверждается разнонаправленными показателями биоэлектрической активности головного мозга у самцов и самок. С позиции гендерной чувствительности можно сделать вывод о том, что наиболее выраженные изменения значений спектров ЭЭГ наблюдались у особей мужского пола.

Результаты гистологического анализа ткани коры головного мозга не выявили нарушений в структуре нервной ткани. Вероятно, последствия экспозиции имели в большей мере функциональные проявления со стороны нервной системы, которые отражались в изменении показателей ЭЭГ. Известно, что ранний постнатальный период характеризуется нейропластичностью и высокой адаптивностью к воздействию, в связи с чем воздействие дыма не вызвало морфологических изменений нервной ткани. Таким образом, воздействие дыма природных пожаров в ранний постнатальный период, когда происходит становление и формирование биоэлектрической активности головного мозга, приводит в течение онтогенеза к патологическим изменениям электроэнцефалографии у взрослых самцов белых крыс. Данные нарушения лежат в основе изменения видоспецифического поведения.

Заключение

Анализ особенностей биоэлектрической активности головного мозга крыс позволил оценить отдалённые последствия воздействия дыма природных пожаров у взрослого

индивида после экспозиции в раннем постнатальном периоде.

В целом результаты проведенных исследований свидетельствуют о следующем.

1. Онтогенетическими особенностями крыс, перенёсших в раннем постнатальном периоде воздействие дымом природных пожаров, является изменение функционального состояния ЦНС.

2. Дым природных пожаров как неблагоприятный фактор среды, воздействующий в ранние постнатальные периоды, способствует нарушению амплитудно-частотных свойств суммарной биоэлектрической активности коры мозга у взрослых половозрелых особей.

3. Наиболее существенные сдвиги в видоспецифическом поведении и биоэлектрической активности мозга проявляются у самцов белых крыс.

Литература

(п.п. 1–5, 9–14, 18–22, 24 см. References)

6. Ефимова Н.В., Абраматец Е.А., Тихонова И.В. Влияние химического фактора на здоровье детей с учетом ранних этапов онтогенеза. *Гигиена и санитария*. 2014; 93(6): 83–6. <https://elibrary.ru/tfaaal>
7. Вокина В.А., Андреева Е.С., Новиков М.А., Соседова Л.М. Устройство для моделирования интоксикации у мелких лабораторных животных продуктами горения биомассы. Патент РФ № 213283 U1; 2022. <https://elibrary.ru/rvkskf>
8. О санитарно-эпидемиологическом состоянии территорий Российской Федерации, пострадавших от пожара, и мерах, принимаемых Роспотребнадзором по состоянию на 9 августа 2010 года. Available at: <https://37.rospotrebnadzor.ru/document/1190/>
15. Махмудова Н.Ш. ЭЭГ зрительной и сенсомоторной областей коры головного мозга крыс раннего возраста, перенесших влияние гипокинезии в зародышевый период пренатального развития. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016; (3–3): 23–8. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.072> <https://elibrary.ru/vowxtf>
16. Западнюк И.П., Западнюк В.И., Захария Е.А., Западнюк Б.В. *Лабораторные животные. Разведение, содержание, использование в эксперименте*. Киев: Вища школа; 1983.
17. Кассиль В.Г., Отеллин В.А., Хожай Л.И., Косткин В.Б. Критические периоды развития головного мозга. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2000; 86(11): 1418–25. <https://elibrary.ru/mpewvf>
23. Редина О.Е., Смоленская С.Э., Маркель А.Л. Генетический контроль поведения крыс НИСАГ в тесте открытого поля. *Генетика*. 2022; 58(7): 773–85. <https://doi.org/10.31857/S0016675822070141> <https://elibrary.ru/bksyvt>
1. Schultz E.S., Hallberg J., Bellander T., Bergström A., Bottai M., Chiesa F., et al. Early-life exposure to traffic-related air pollution and lung function in adolescence. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2016; 193(2): 171–7. <https://doi.org/10.1164/rccm.201505-0928OC> <https://elibrary.ru/ywshfd>
2. Künzli N., Avol E., Wu J., Gauderman W.J., Rappaport E., Millstein J., et al. Health effects of the 2003 Southern California wildfires on children. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2006; 174(11): 1221–8. <https://doi.org/10.1164/rccm.200604-519OC>
3. Reid C.E., Maestas M.M. Wildfire smoke exposure under climate change: impact on respiratory health of affected communities. *Curr. Opin. Pulm. Med*. 2019; 25(2): 179–87. <https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000552>
4. Rebuli M.E., Speen A.M., Martin E.M., Addo K.A., Pawlak E.A., Glista-Baker E., et al. Wood smoke exposure alters human inflammatory responses to viral infection in a sex-specific manner. A randomized, placebo-controlled study. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*. 2019; 199(8): 996–1007. <https://doi.org/10.1164/rccm.201807-1287OC>
5. Burbank A.J., Sood A.K., Kesic M.J., Peden D.B., Hernandez M.L. Environmental determinants of allergy and asthma in early life. *J. Allergy Clin. Immunol*. 2017; 140(1): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2017.05.010> <https://elibrary.ru/yiunqc>
6. Efimova N.V., Abramats E.A., Tikhonova I.V. The impact of the chemical factor on children's health with account of the early stages of ontogenesis. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2014; 93(6): 83–6. <https://elibrary.ru/tfaaal> (in Russian)
7. Vokina V.A., Andreeva E.S., Novikov M.A., Sosodova L.M. A device for simulating intoxication in small laboratory animals by biomass combustion products. Patent RF № 213283 U1; 2022. <https://elibrary.ru/rvkskf> (in Russian)
8. On the sanitary and epidemiological state of the territories of the Russian Federation affected by the fire and the measures taken by Rosпотребнадзор as of August 9, 2010. Available at: <https://37.rospotrebnadzor.ru/document/1190/> (in Russian)
9. Kulikov A.V., Tikhonova M.A., Kulikov V.A. Automated measurement of special preference in the open field test with transmitted lighting. *J. Neurosci. Meth*. 2008; 170(2): 345–51. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2008.01.024> <https://elibrary.ru/ljlzlh>
10. Liu J.C., Peng R.D. The impact of wildfire smoke on compositions of fine particulate matter by ecoregion in the Western US. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol*. 2019; 29(6): 765–76. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0064-7> <https://elibrary.ru/oivrwv>
11. Lelieveld J., Pozzer A., Pöschl U., Fnais M., Haines A., Münzel T. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovasc. Res*. 2020; 116(11): 1910–7. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025> <https://elibrary.ru/wokkfk>
12. De Florio-Barker S., Crooks J., Reyes J., Rappold A.G. Cardiopulmonary effects of fine particulate matter exposure among older adults, during wildfire and non-wildfire periods, in the United States 2008–2010. *Environ. Health Perspect*. 2019; 127(3): 37006. <https://doi.org/10.1289/EHP3860>
13. Haikerwal A., Akram M., Del Monaco A., Smith K., Sim M.R., Meyer M., et al. Impact of fine particulate matter (PM2.5) exposure during wildfires on cardiovascular health outcomes. *J. Am. Heart. Assoc*. 2015; 4(7): e001653. <https://doi.org/10.1161/JAHA.114.001653>
14. Wright R.J., Brunst K.J. Programming of respiratory health in childhood: influence of outdoor air pollution. *Curr. Opin. Pediatr*. 2013; 25(2): 232–9. <https://doi.org/10.1097/MOP.0b013e32835e78cc>
15. Mahmudova N.Sh. EEG of visual and sensorimotor cerebral cortex of the infant rats of early age who transferred influence of a hypokinesia to the germinal period of prenatal development. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2016; (3–3): 23–8. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.072> <https://elibrary.ru/vowxtf> (in Russian)
16. Zapadnyuk I.P., Zapadnyuk V.I., Zakhariya E.A., Zapadnyuk B.V. *Laboratory Animals. Breeding, Maintenance, and Use in Experiments [Laboratornye zhivotnye. Razvedenie, soderzhanie, ispol'zovanie v eksperimente]*. Kiev: Vishcha shkola; 1983. (in Russian)
17. Kassil V.G., Otellin V.A., Khozhai L.I., Kostkin V.B. Critical phases of the brain development. *Rossiiskii fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2000; 86(11): 1418–25. <https://elibrary.ru/mpewvf> (in Russian)
18. Land S.C., Wilson S.M. Redox regulation of lung development and perinatal lung epithelial function. *Antioxid. Redox Signal*. 2005; 7(1–2): 92–107. <https://doi.org/10.1089/ars.2005.7.92>
19. Kajekar R. Environmental factors and developmental outcomes in the lung. *Pharmacol. Ther*. 2007; 114(2): 129–45. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2007.01.011> <https://elibrary.ru/mkptyt>
20. Korten I., Ramsey K., Latzin P. Air pollution during pregnancy and lung development in the child. *Paediatr. Respir. Rev*. 2017; 21: 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2016.08.008>
21. Dugershaw B.B., Aengenheister L., Hansen S.S.K., Hougaard K.S., Buerki-Thurnherr T. Recent insights on indirect mechanisms in developmental toxicity of nanomaterials. *Part. Fibre Toxicol*. 2020; 17(1): 3. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00359-x> <https://elibrary.ru/xykkvj>
22. Veras M.M., de Oliveira Alves N., Fajersztajn L., Saldiva P. Before the first breath: prenatal exposures to air pollution and lung development. *Cell Tissue Res*. 2017; 367(3): 445–55. <https://doi.org/10.1007/s00441-016-2509-4> <https://elibrary.ru/ssccpq>
23. Redina O.E., Smolenskaya S.E., Markel A.L. Genetic control of the behavior of ISIAH rats in the open field test. *Russian Journal of Genetics*. 2022; 58(7): 791–803. <https://doi.org/10.1134/s1022795422070146> <https://elibrary.ru/etfjjj>
24. Apukhtin K.V., Shevlyakov A.D., Kotova M.M., Amikishiev S.V., Riga V.D., Volgin A.D., et al. Analysis of rodent grooming and its microstructure in modern neurobiological studies. *J. Evol. Biochem. Phys*. 2024; 60(3): 1125–43. <https://doi.org/10.1134/S0022093024030219> <https://elibrary.ru/oqzhzi>

Сведения об авторах

Соседова Лариса Михайловна, доктор мед. наук, профессор, зав. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: sosedlar@mail.ru

Вокина Вера Александровна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: vokina.vera@gmail.com

Панкова Анна Александровна, мл. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: anna.troznikova.96@bk.ru

Титов Евгений Алексеевич, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины, ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: g57097@yandex.ru

Новиков Михаил Александрович, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины, ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: novik-imt@mail.ru

Савченков Михаил Федосович, доктор мед. наук, профессор, академик РАН; профессор ФГБНУ ВСИМЭИ, 665826, Ангарск, Россия. E-mail: mfs36@mail.ru

About the authors

Larisa M. Sosedova, DSc (Medicine), professor, head, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1052-4601> E-mail: sosedlar@mail.ru

Vera A. Vokina, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8165-8052> E-mail: vokina.vera@gmail.com

Anna A. Pankova, junior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6012-0173> E-mail: anna.troznikova.96@bk.ru,

Evgeny A. Titov, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0665-8060> E-mail: g57097@yandex.ru

Mikhail A. Novikov, PhD (Biology), senior researcher, Laboratory of biomodeling and translational medicine, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, E-mail: novik-imt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6100-6292>

Mikhail F. Savchenkov, DSc (Medicine), professor, academician of the RAS, Professor of East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665826, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1246-8327> E-mail: mfs36@mail.ru
