

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2024

Читать онлайн
Read online

**Соседова Л.М., Вокина В.А., Рукавишников В.С.**

Методические подходы к созданию биологической модели задымления при ландшафтных пожарах

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Длительная задымлённость от ландшафтных пожаров вызывает различные нарушения состояния здоровья. В первую очередь поражают дыхательная система, сердечно-сосудистая и нервная. Для обоснования безопасных уровней воздействия дыма ландшафтных пожаров необходимо создание адекватной биологической модели задымления, близкой к натурным условиям.

Цель исследования – разработать и апробировать методические подходы к созданию биологической модели задымления при ландшафтных пожарах для обоснования безопасных уровней воздействия.

Материалы и методы. Используя разработанную биологическую модель, изучали воздействие дыма ландшафтного пожара на белых крыс. Оценивали функциональное состояние ЦНС по показателям поведения и результатам электрэнцефалографии (ЭЭГ), проводили морфологическое исследование коры головного мозга и семенников, а также обследовали потомство сразу после рождения и в половозрелом возрасте.

Результаты. Изучен биологический ответ организма белых крыс, подвергавшихся ингаляционному воздействию дыма ландшафтных пожаров в различных по длительности режимах. Выявлены основные критериальные показатели нарушения здоровья со стороны центральной нервной и репродуктивной систем животных.

Ограничения исследования. Исследование ограничено отсутствием данных о репродуктивной токсичности дыма ландшафтных пожаров и безопасных уровнях его воздействия на ЦНС.

Заключение. Апробация разработанной методики позволила выявить экспозиционную нагрузку оксида углерода и мелкодисперсных взвешенных частиц размером менее 2,5 мкм ($PM_{2,5}$), при которой изменения нервной и репродуктивной систем являются минимальными. Предложена методика расчёта безопасных уровней воздействия для центральной нервной и репродуктивной систем, а также по критерию влияния на потомство. Разработан алгоритм изучения влияния дыма ландшафтных пожаров на организм.

Ключевые слова: ландшафтные пожары; биологическая модель; крысы; нервная система; репродуктивный потенциал; экспозиционная доза; безопасный уровень

Соблюдение этических стандартов. Экспериментальные исследования получили положительное заключение локального этического комитета ФГБНУ ВСИМЭИ (протокол № 32 от 10.01.2023 г.), все манипуляции с животными осуществлялись в соответствии с директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, используемых для научных целей, Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS N 123).

Для цитирования: Соседова Л.М., Вокина В.А., Рукавишников В.С. Методические подходы к созданию биологической модели задымления при ландшафтных пожарах. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(9): 1050–1055. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-1050-1055> <https://elibrary.ru/dveit>

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

Участие авторов: Соседова Л.М. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Вокина В.А. – сбор материала и обработка данных, написание текста, статистический анализ, редактирование; Рукавишников В.С. – руководство, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликты интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований, предусмотренных государственным заданием, а также в рамках гранта № 075-15-2020-787 Минобрнауки России.

Поступила: 04.06.2024 / Поступила после доработки: 15.08.2024 / Принята к печати: 23.09.2024 / Опубликована: 16.10.2024

Larisa M. Sosedova, Vera A. Vokina, Viktor S. Rukavishnikov

Methodological approaches to the creation of a biological model of smoke in landscape fires

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Long-term smoke from landscape fires causes various health problems, primarily affecting the respiratory, cardiovascular, and nervous systems. To substantiate safe levels of exposure to smoke from landscape fires, it is necessary to create an adequate biological model for smoke that is close to natural conditions.

The aim of the study is to develop and test methodological approaches to creating a biological model for smoke during landscape fires to substantiate safe levels of exposure.

Materials and methods. Using the developed biological model, we studied the effects of smoke from landscape fires on white rats. We assessed the functional state of the central nervous system based on rat behaviour and EEG examination results, conducted a morphological study of the cerebral cortex and testes of white rats, and examined the offspring immediately after birth and at puberty.

Results. We studied the biological response of white rats exposed to inhalation smoke from landscape fires for different durations. The main criterion indicators of health disorders in the central nervous and reproductive systems of animals were identified.

Limitations. The study is limited by the lack of data on safe levels of exposure to smoke from landscape fires on the central nervous system and reproductive toxicity.

Conclusion. Testing of the developed method allowed identifying the exposure load of carbon monoxide and ultrafine particles $PM_{2,5}$, at which changes in the nervous and reproductive systems are minimal. A method for calculating safe levels of exposure for the central nervous and reproductive systems, as well as for the effect on offspring, is proposed. An algorithm for conducting research in studying the effect of smoke from landscape fires on the body has been developed.

Keywords: landscape fires; biological model; rats; nervous system; reproductive potential; exposure dose; safe level

Compliance with ethical standards. A positive conclusion was received from the local ethics committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution VSIMEI for conducting experimental studies (Protocol No. 32 dated 10.01.2023); all manipulations with animals were carried out in accordance with Directive of the European Parliament and of the Council of the European Union 2010/63/EC of 22.09.2010 on the protection of animals used for scientific purposes and the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes (ETS N 123).

For citation: Sosedova L.M., Vokina V.A., Rukavishnikov V.S. Methodological approaches to the creation of a biological model of smoke in landscape fires. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024; 103(9): 1050–1055. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-1050-1055> <https://elibrary.ru/dvbeit> (In Russ.)

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

Contribution: Sosedova L.M. – concept and design of the study, writing the text, editing; Vokina V.A. – collection of material and data processing, writing the text, statistical analysis, editing; Rukavishnikov V.S. – management, editing. *All authors* are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version

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

Acknowledgments. The work was carried out in accordance with the scientific research plan provided for by the state assignment, as well as within the framework of grant No. 075-15-2020-787 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Received: June 4, 2024 / Accepted: September 23, 2024 / Published: October 16, 2024

Введение

Ландшафтные пожары ежегодно становятся стихийным бедствием во многих странах, оказывают пагубное влияние на здоровье населения в зоне задымления и пожарных, спасателей, сотрудников МЧС, ликвидирующих возгорание. Преимущественно страдает респираторная система, особенно у чувствительной группы, к которой относятся лица с болезнями дыхательных путей, дети и беременные [1, 2]. Репродуктивная токсичность дыма ландшафтных пожаров и его влияние на последующее поколение изучены мало, как и механизмы поражения репродуктивной и нервной систем. Особый интерес представляют экспериментальные исследования, позволяющие в модельных экспериментах оценить последствия экспозиции продуктами горения. Для исследования механизмов развития неблагоприятных эффектов при воздействии дыма ландшафтных пожаров на молекулярном, клеточном, тканевом и организменном уровнях необходима экспериментальная модель, позволяющая воссоздавать задымление, соответствующее натурным условиям. В научной литературе встречается описание экспериментальных установок, создающих эффекты задымления, но практически во всех горение создаётся одним видом древесины или только оксидом углерода, что не соответствует задымлению при ландшафтных пожарах [3–5]. В реальных условиях природных пожаров биомасса горения представлена подстильным материалом (остатки листьев, ветки, трава и т. п.) и древесиной крупных деревьев. Отдельного внимания заслуживает горение торфа. В состав дыма, выделяющегося при горении биомассы (древесины, хвои, листья, мха, торфа), входят мелкодисперсные твёрдые частицы, оксид углерода (CO), окиси азота и серы, альдегиды, полиароматические углеводороды (ПАУ), летучие органические соединения, хлорированные диоксины и свободные радикалы и множество других веществ, оказывающих общетоксическое или избирательное действие на организм [6, 7]. Для обоснования критерии нарушения здоровья и определения безопасных уровней воздействия дыма природных пожаров нами разработан алгоритм, позволяющий с использованием биологической модели установить причинно-следственные связи влияния многокомпонентной смеси дыма ландшафтного пожара на организм животных с анализом зависимости «экспозиция – ответ». Конечной целью разработки биологической модели является обоснование безопасных уровней воздействия продуктов горения лесной биомассы по результатам оценки функционального состояния центральной нервной системы, влияния на некоторые показатели репродуктивной функции и состояние потомства.

Материалы и методы

Этапы исследования:

1. *Ингаляционная затравка животных дыром природных пожаров.* Экспозицию дыром горения лесной биомассы проводили в динамическом режиме в ингаляционных камерах. Образцы лесной биомассы (торф, лесная подстилка)

отобраны в экологически чистом районе, ранее не подвергавшемся горению. Разработанное нами устройство позволяет воздействовать продуктами горения биомассы на большое количество животных, контролировать и изменять концентрации продуктов горения для создания нужных условий экспозиции, например, моделировать условия реального задымления, а также изменять длительность воздействия. На устройство получен патент на полезную модель «Устройство для моделирования интоксикации продуктами горения биомассы у мелких лабораторных животных» [8]. Устройство состоит из экспозиционной камеры для размещения экспериментальных животных, в которую из металлической ёмкости подаётся дым горения биомассы, компрессора для подачи в камеру чистого воздуха, вентилятора, ротаметра, зонда для отбора проб воздуха.

В течение экспозиции через равные промежутки времени проводили отбор проб воздуха для качественного и количественного определения содержания в дымовой смеси химических ингредиентов и ультрадисперсных частиц. Критериальным показателем целевого уровня загрязнения воздуха в экспозиционных камерах служил уровень CO и PM_{2,5} – основных маркёров изменения качества воздушной среды при пожарах. Исследования проведены в пяти различных по длительности экспериментах, средние концентрации CO находились на уровне 20–30 мг/м³, PM_{2,5} – 0,37–0,93 мг/м³. Суммарная длительность воздействия дыма биомассы в условиях эксперимента составила 1; 4; 8; 20 (4 ч/день, 5 дней) и 80 (4 ч/день, 5 дней в неделю, 4 нед) часов. Контрольным животным в аналогичных экспозиционных камерах подавали чистый воздух. Для каждого варианта экспозиции рассчитано значение экспозиционной нагрузки на массу тела, определяемое как произведение средней концентрации CO и PM_{2,5}, длительности воздействия, объёма лёгочной вентиляции [9].

2. *Обследование животных.* После окончания экспозиции функциональное состояние ЦНС оценивали с использованием стандартных методик, таких как тест «открытое поле» [10], водный лабиринт Морриса [11], а также проводили ЭЭГ-обследование [12]. Оценку состояния репродуктивной системы проводили по показателям выживаемости потомства, гистологическому исследованию гонад. У потомства в половозрелом возрасте оценивали двигательную и исследовательскую активность и биоэлектрическую активность головного мозга. Для микроскопического исследования сенсомоторной зоны коры головного мозга и сперматогенного эпителия готовили послойные серийные срезы тканей толщиной 5 мкм. В окрашенных гематоксилином-эозином препаратах мозга подсчитывали общее число нейронов, число клеток астроглии, число дегенеративно изменённых клеток, число актов нейронофагии; оценивали индекс сперматогенеза, количество клеток Лейдига и Сертоли, количество нормальных сперматогоний.

3. *Статистическая обработка и оценка полученных результатов.* Для статистического анализа применяли программный продукт Statistica 6.1. Проверку распре-

Результаты обследования белых крыс, подвергшихся воздействию дыма природных пожаров

The results of the examination of white rats exposed to the smoke of wildfires

Показатели Indices		Характеристика экспозиции Exposure characteristics				
		длительность воздействия, ч exposure time, h				
		1	4	8	20	80
		экспозиционная доза, мг/кг exposure dose, mg/kg				
		0.64	2.56	5.13	12.83	51.33
Центральная нервная система (ЦНС) Central nervous system (CNS)	Поведение Behaviour	0	2	3	4	4
	ЭЭГ EEG	1	2	2	2	2
Репродуктивная система Reproductive system	Гистология мозга Brain histology	0	0	0	2	2
	Суммарный балл Total score	1	4	5	8	8
	Гонадотоксичность Gonadal toxicity	0	0	0	0	2
	ЦНС потомства Offspring CNS	0	0	3	3	3
	Смертность потомства Offspring mortality	0	0	0	1	1
	Суммарный балл Total score	0	0	3	4	6

деления признаков выполняли с помощью *W*-критерия Шапиро – Уилка. В случае ненормального распределения признаков для межгруппового сравнения использовали *U*-критерий Манна – Уитни, при нормальном распределении – *t*-критерий Стьюдента. При оценке различий между несколькими группами применяли поправку Бонферрони, учитывающую множественные проверки гипотез.

Показатели ЦНС и репродуктивного потенциала животных оценивали в баллах в соответствии с количеством статистически значимо изменённых величин. Так, при комплексной оценке нейротоксического эффекта дыма природных пожаров на основе поведенческих показателей, результатов электроэнцефалографического обследования и морфологического анализа ткани головного мозга животных максимальный балл составил 8. Максимальный балл при анализе влияния на репродуктивную систему с учётом гонадотоксического эффекта (изменение индекса сперматогенеза), смертность потомства в первую неделю жизни и показатели ЦНС половозрелого потомства составил 6.

В настоящем исследовании мы уделяли особое внимание концентрациям СО и $PM_{2.5}$, при минимальных значениях которых начинают выявляться изменения со стороны изучаемых систем. Критически значимыми в данном случае считали изменения, выходящие за пределы приспособительных физиологических реакций, отличающиеся достоверно от аналогичных показателей контрольной группы. Для изучения зависимости «доза – эффект» проведён регрессионный анализ, позволивший обосновать безопасные уровни воздействия с учётом концентраций СО и $PM_{2.5}$ в воздухе и времени нахождения в условиях задымления.

Результаты

Для количественной оценки нейро- и репротоксичности дыма природных пожаров, основанной на изучении зависимости «доза – эффект», проведено исследование при ингаляционной экспозиции различной длительности. Комплексная оценка полученных результатов биомоделирования задымления от горения лесной биомассы позволила выявить изменения некоторых показателей со стороны ЦНС и репродуктивной системы при воздействии дыма природных пожаров в течение 1; 4; 8; 20 и 80 ч. В таблице представлена расчётная величина экспозиционной нагрузки по суммарной концентрации СО и $PM_{2.5}$ в воздухе на период экспозиции, а также приведены обобщённые результаты обследования животных, подвергавшихся задымлению, в баллах (см. таблицу).

На основе полученных экспериментальных данных для нейротоксического и репротоксического эффектов дыма природных пожаров построены кривые зависимости «доза – эффект» (рис. 1), показывающие, что биологический ответ на токсическое воздействие компонентов дыма со стороны нервной и репродуктивной систем не является линейным. Уравнения линейной регрессии, полученные в ходе исследования, могут применяться для прогнозирования тяжести токсического эффекта при нахождении в условиях задымления. Кроме того, с помощью данных уравнений можно рассчитать экспозиционную дозу, при которой изменения в изучаемых системах будут минимальными, а уровень воздействия – допустимым (см. рис. 1). В данном случае допустимое значение экспозиционной дозы, рассчитанное по содержанию СО и $PM_{2.5}$, по проявлению нейротоксического

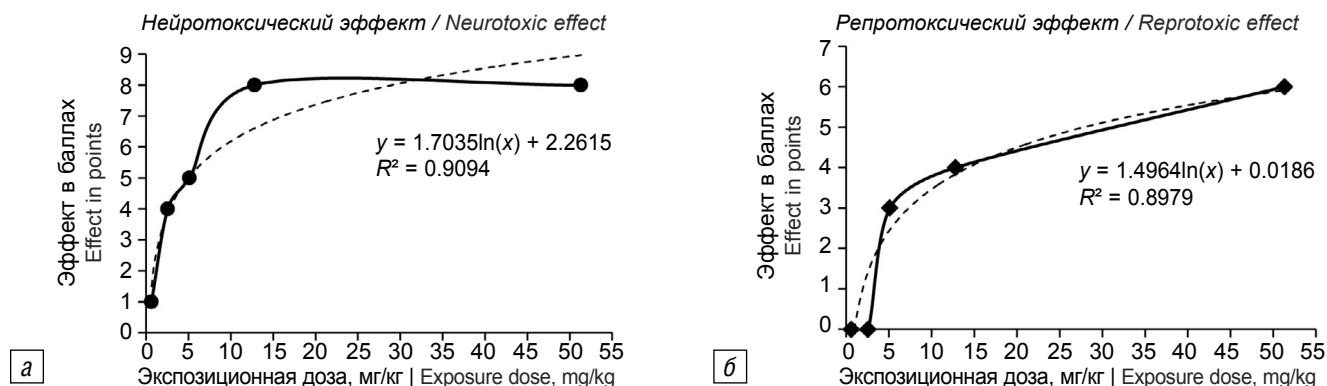


Рис. 1. Зависимость «доза – эффект» между экспозиционной нагрузкой и токсическим эффектом дыма природного пожара, выраженным в баллах, для ЦНС (а) и репродуктивной системы (б) белых крыс.

Fig. 1. Dose-effect relationship between the toxic effect of wildfire smoke, expressed in points and exposure load, for the central nervous system (a) and reproductive system (b) in rats.

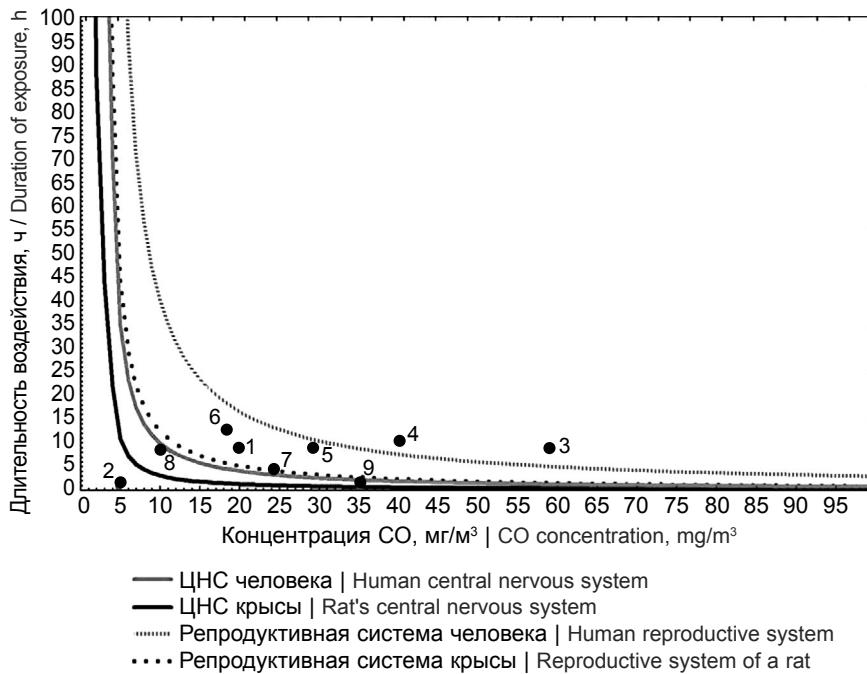


Рис. 2. Кривая зависимости времени воздействия и концентрации дыма природных пожаров (по концентрации CO) в условиях допустимой экспозиционной нагрузки по показателям ЦНС и репродуктивной системы. Зоной под каждым графиком ограничен допустимый для изучаемых систем уровень воздействия дыма.

Fig. 2. Curve of the dependence of exposure time and smoke concentration from wildfires (by CO concentration) under conditions of permissible exposure load according to CNS and reproductive system parameters. The zone below each graph limits the permissible smoke exposure level for the systems studied.

эффекта выражено до 1 балла у экспериментальных животных при воздействии дыма природных пожаров составило 0,72 мг/кг, репротоксического – 2,68 мг/кг.

Поскольку экспозиционная нагрузка рассчитывается по средним концентрациям токсикантов и длительности контакта с ними, достижение допустимого значение возможно в условиях краткосрочного воздействия высоких концентраций дыма и наоборот. Использование полученных уравнений позволяет теоретически оценить максимальное время нахождения в условиях задымления при заданном уровне его интенсивности (по содержанию CO и PM_{2,5}), причём сделать это возможно как для экспериментальных животных, так и для человека (с расчётом минутного объёма дыхания).

На рис. 2 представлены результаты вычисления допустимых уровней воздействия дыма природных пожаров (по содержанию CO) при различной длительности и интенсивности воздействия на изучаемые системы. Расчётные допустимые уровни у человека, превышающие значения для крыс, обусловлены более высокой интенсивностью метаболизма у последних (в три раза выше, чем у человека [13]). Для проверки предложенного методического подхода на график нанесены точки, которыми обозначены некоторые принятые в России и за рубежом безопасные уровни воздействия CO в воздухе рабочих мест и населённых пунктов [14, 15].

Как видно на рис. 2, большинство рассмотренных допустимых уровней воздействия CO, принятых в разных странах и организациях, находятся в пределах рассчитанных нами допустимых значений экспозиционной нагрузки дымом природных пожаров. При этом допустимые для России концентрации CO как в воздухе рабочей зоны, так и в атмосферном воздухе населённых мест являются наиболее близкими к расчётым безопасным уровням воздействия. Однако следует отметить, что по нарушениям со стороны ЦНС все указанные величины безопасного профессионального воздействия превышают расчёты допустимые уровни экспозиционной нагрузки и для лабораторных животных, и для человека. В проведённых ранее исследованиях нами выявлен значительный токсический эффект торфяного дыма при круглосуточном воздействии на уровне 40 мг/м³.

● Утвержденные допустимые уровни воздействия CO: Approved permissible levels of exposure to CO:

- 1 20 мг/м³ в течение 8 ч (ПДК_{р.з.})
20 mg/m³ for 8 hours (MPC_{working zone})
- 2 2–5 мг/м³ в течение 20–30 мин (ПДК_{м.р.})
2–5 mg/m³ for 20–30 minutes (MPC_{maximum single concentration})
- 3 58,2 мг/м³ в течение 8 ч (OSHA¹)
58,2 mg/m³ for 8 hours (OSHA);
- 4 40,7 мг/м³ в течение 10 ч (NIOSH²)
40,7 mg/m³ for 10 hours (NIOSH)
- 5 29,1 мг/м³ в течение 8 ч (ACGIH³)
29,1 mg/m³ for 8 hours (ACGIH)
- 6 18,6 мг/м³ в течение 13 ч (NWCG⁴)
18,6 mg/m³ for 13 hours (NWCG)
- 7 4 мг/м³ в течение 24 ч (ВОЗ)
4 mg/m³ for 24 hours (WHO)
- 8 10 мг/м³ в течение 8 ч (ВОЗ)
10 mg/m³ for 8 hours (WHO)
- 9 35 мг/м³ в течение 1 ч (ВОЗ)
35 mg/m³ for 1 hour (WHO)

¹ OSHA (Occupational Safety and Health Administration, США) – Управление по охране труда.

² NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health, США) – Национальный институт охраны труда.

³ ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, США) – Американская ассоциация государственных промышленных гигиенистов.

⁴ NWCG (National Wildfire Coordinating Group, США) – Национальная координационная группа по лесным пожарам.

Обсуждение

Описанный выше подход к прогнозированию токсического эффекта у животных с расчётом экспозиционной нагрузки и использованием регрессионных уравнений (см. рис. 1) показал ожидаемый уровень нарушений репродуктивной системы 4,5 балла, ЦНС – 7,5 балла. Результаты экспериментальных исследований согласуются с прогнозом и демонстрируют значительное нарушение поведенческих показателей, изменений биоэлектрической активности мозга и морфологической структуры нервной ткани животных. В то же время при отсутствии выраженного влияния на процессы сперматогенеза данный режим воздействия дыма сопровождался изменением функционального состояния ЦНС у потомства экспонированных животных. Таким образом, предложенная нами зависимость (см. рис. 2) позволяет определить необходимый для исследования уровень и время экспозиции дымом при изучении его влияния на репродуктивное здоровье и состояние нервной системы в эксперименте.

Данный расчётный метод показал, что опасность воздействия дыма природных пожаров, особенно с позиции отдалённых эффектов, может быть существенно недооценена при ориентации исключительно на уровень загрязнения воздуха CO и PM_{2,5}. Следует особо подчеркнуть, что дым горения лесной биомассы содержит многокомпонентную смесь газов и твёрдых частиц, которые могут способствовать формированию аддитивных или потенцирующих эффектов, усиливая риск развития нарушений здоровья человека.

Разработанная нами модель задымления при ландшафтных пожарах предназначена для изучения биологических эффектов ответной реакции организма и прогнозирования риска нарушений здоровья при воздействии дыма. Экспериментальным моделированием можно установить безопасные для здоровья уровни CO и PM_{2,5} мг/м³, образующихся при ландшафтных пожарах, с учётом различной интенсивности и длительности воздействия. В методических подходах к исследованиям биологического ответа организма при моделировании воздействия дыма природных пожаров мы

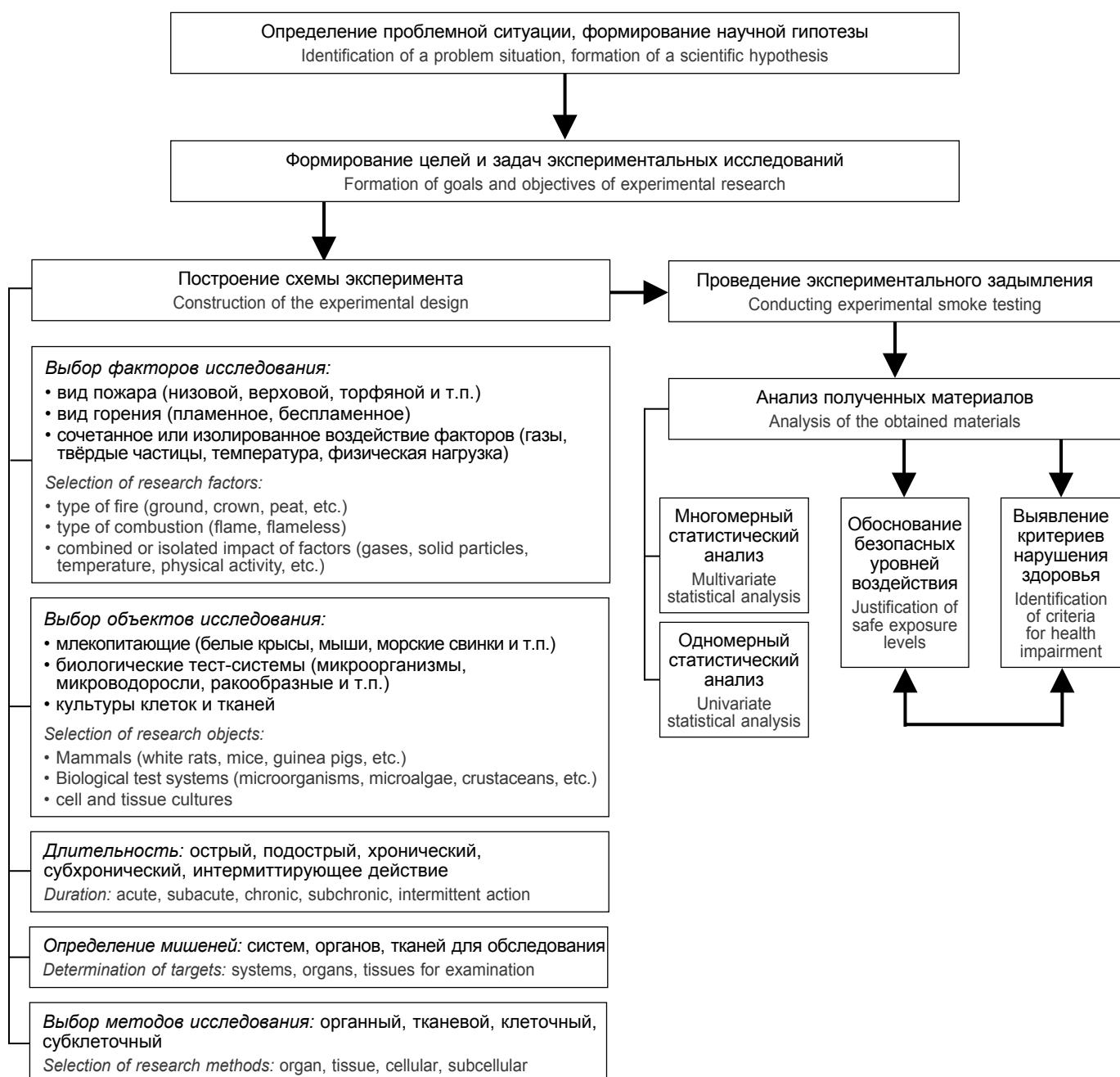


Рис. 3. Алгоритм создания биологической модели для изучения воздействия дыма ландшафтных пожаров на организм.

Fig. 3. An algorithm for creating a biological model to study the effects of smoke from landscape fires on the body.

определенную последовательность (этапность) эксперимента, из множества компонентов дымовой смеси выделили наиболее значимые и информативные при определении их содержания, предложили методику расчёта безопасных уровней воздействия для центральной нервной, репродуктивной систем и влияния на потомство. Ниже представлен алгоритм создания биологической модели для изучения воздействия дыма ландшафтных пожаров на организм (рис. 3).

Заключение

Многолетние экспериментальные исследования позволили создать модели природных пожаров с различным содержанием основных компонентов дыма и длительностью экспозиции. Моделирование продемонстрировало особенности токсического эффекта дыма природных пожаров, вли-

яние на функциональное состояние ЦНС и репродуктивной системы в условиях различной длительности и интенсивности экспозиции. Выявлены основные критериальные показатели нарушения здоровья со стороны центральной нервной и репродуктивной систем животных в зависимости от уровня экспозиции. Разработанные методические подходы позволяют специалистам экологической службы и научных организаций гигиенического профиля выявлять причинно-следственные связи результатов воздействия многокомпонентной смеси дыма ландшафтного пожара на организм с анализом зависимости «экспозиция – ответ» и оценить риск развития нарушений здоровья со стороны различных органов и систем. Контролирующие органы могут использовать предложенные критерии для лиц, находившихся в условиях задымления, сравнивая полученную экспозиционную нагрузку с рекомендованным безопасным уровнем.

Литература (п.п. 1–7, 10, 14, 15 см. References)

8. 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 № 2022107278; 2022.
9. Лемешевская Е.П., Куренкова Г.В., Жукова Е.В. *Профессиональный риск здоровью работников промышленных предприятий*. Иркутск; 2016. <https://elibrary.ru/ikagty>
11. Хоцкин Н.В., Куликов В.А., Завьялов Е.Л., Фурсенко Д.В., Куликов А.В. Проведение и автоматизация теста «водный лабиринт Морриса» в условиях SPF-вивария. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015; 19(4): 388–93. <https://doi.org/10.18699/VJ15.049> <https://elibrary.ru/vhrppj>
12. Вокина В.А., Соседова Л.М., Новиков М.А., Андреева Е.С., Титов Е.А., Рукавишников В.С. и др. Эффекты действия суточной экспозиции торфяного задымления на репродуктивную и нервную системы самцов белых крыс. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(7): 648–52. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-7-648-652> <https://elibrary.ru/ykwiqs>
13. Асташкин Е.И., Ачкасов Е.Е., Афонин К.В., Берзин И.А., Бескова Т.Б., Болотских Л.А. и др. *Руководство по лабораторным животным и альтернативным моделям в биомедицинских исследованиях*. М.: Профиль-2С; 2010. <https://elibrary.ru/uaockn>

References

1. Abdo M., Ward I., O'Dell K., Ford B., Pierce J.R., Fischer E.V., et al. Impact of wildfire smoke on adverse pregnancy outcomes in Colorado, 2007–2015. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019; 16(19): 3720. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193720>
2. Holm S.M., Miller M.D., Balmes J.R. Health effects of wildfire smoke in children and public health tools: a narrative review. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2021; 31(1): 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-00267-4>
3. Akintunde J.K., Abioye J.B., Ebinama O.N. Potential protective effects of naringin on oculo-pulmonary injury induced by PM₁₀ (wood smoke) exposure by modulation of oxidative damage and acetylcholine esterase activity in a rat model. *Curr. Ther. Res. Clin. Exp.* 2020; 92: 100586. <https://doi.org/10.1016/j.curtheres.2020.100586>
4. Yang R.Q., Guo P.F., Ma Z., Chang C., Meng Q.N., Gao Y., et al. Effects of simvastatin on iNOS and caspase-3 levels and oxidative stress following smoke inhalation injury. *Mol. Med. Rep.* 2020; 22(4): 3405–17. <https://doi.org/10.3892/mmr.2020.11413>
5. Leiphrakpam P.D., Weber H.R., Ogun T., Buesing K.L. Rat model of smoke inhalation-induced acute lung injury. *BMJ Open Respir. Res.* 2021; 8(1): e000879. <https://doi.org/10.1136/bmjjresp-2021-000879>
6. Singh D., Tasew D.D., Nelson J., Chalbot M.G., Kavouras I.G., Tesfaigzi Y., et al. Physicochemical and toxicological properties of wood smoke particulate matter as a function of wood species and combustion condition. *J. Hazard. Mater.* 2023; 441: 129874. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129874>
7. Szramowiat-Sala K., Korzeniewska A., Sornek K., Marcza M., Wieronska F., Berent K., et al. The properties of particulate matter generated during wood combustion in in-use stoves. *Fuel*. 2019; 253: 792–801. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.026>
8. Вокина В.А., Андреева Е.С., Новиков М.А., Соседова Л.М. А устройство для моделирования интоксикации у мелких лабораторных животных продуктами горения биомассы. Патент РФ № 2022107278; 2022. (in Russian)
9. Lemeshevskaya E.P., Kurenkova G.V., Zhukova E.V. *Occupational Health Risk of Industrial Workers [Professional'nyi risk zdror'yu rabotnikov promyshlennyykh predpriyatiy]*. Irkutsk; 2016. <https://elibrary.ru/ikagty> (in Russian)
10. Kulikov A.V., Tikhonova M.A., Kulikov V.A. Automated measurement of spatial preference in the open field test with transmitted lighting. *J. Neurosci. Methods*. 2008; 170(2): 345–51. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2008.01.024>
11. Khotskin N.V., Kulikov V.A., Zavyalov E.L., Fursenko D.V., Kulikov A.V. Conducting and automating the water Morris maze test in SPF conditions. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*. 2015; 19(4): 388–93. <https://doi.org/10.18699/VJ15.049> <https://elibrary.ru/vhrppj> (in Russian)
12. Vokina V.A., Sosedova L.M., Novikov M.A., Andreeva E.S., Titov E.A., Rukavishnikov V.S., et al. Effects of daily exposure to peat smoke on the reproductive and nervous systems in male white rats. *Gigiena i Sanitariya [Hygiene and Sanitation, Russian journal]*. 2023; 102(7): 648–52. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-7-648-652> <https://elibrary.ru/ykwiqs> (in Russian)
13. Astashkin E.I., Achkasov E.E., Afonin K.V., Berzin I.A., Beskova T.B., Bolotskikh L.A., et al. *Guide to Laboratory Animals and Alternative Models in Biomedical Research [Rukovodstvo po laboratornym zhivotnym i al'ternativnym modeljam v biomeditsinskikh issledovaniyakh]*. Moscow: Profil'-2S; 2010. <https://elibrary.ru/uaockn> (in Russian)
14. WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide; 2021. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
15. National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 281, Carbon Monoxide. Available at: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbon-Monoxide>

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, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: vokina.vera@gmail.com

Рукавишников Виктор Степанович, научный руководитель ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: rvs_2010@mail.ru

Information about the authors

Larisa M. Sosedova, MD, PhD, DSci., professor, head of the Laboratory of biomodelling and translation medicine of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1052-4601> E-mail: sosedlar@mail.ru

Vera A. Vokina, MD, PhD, researcher of the Laboratory of biomodelling and translation medicine of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8165-8052> E-mail: vokina.vera@gmail.com

Viktor S. Rukavishnikov, scientific supervisor of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2536-1550> E-mail: rvs_2010@mail.ru