

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТОКСИКОЛОГИЯ
ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY

© АНДРЕЕВА Е.С., ВОКИНА В.А., 2023

Андреева Е.С., Вокина В.А.

Влияние дыма лесных пожаров на снижение биоразнообразия и функциональное состояние живых организмов (обзор литературы)

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Российская Федерация

Введение. Актуальность данной работы обусловлена растущей экологической проблемой, связанной с масштабными лесными пожарами и недостаточной изученностью выживания, адаптации и размножения животных после продолжительного воздействия вредных компонентов дыма.

Цель обзора — сбор и анализ информации о загрязнённости окружающей среды вследствие задымления от лесных пожаров и их воздействие на животных, находящихся в зоне задымления.

Материал и методы. Материалом для анализа послужили источники литературы, опубликованные за период до 2022 г. в изданиях, индексируемых в базах научных данных Scopus, Web of Science, Publons, Springer, PubMed, включающих работы отечественных и зарубежных учёных-исследователей по этой тематике.

Результаты. При возникновении лесных пожаров в окружающую среду выделяется смесь газообразных соединений, содержащая ультрадисперсные твёрдые частицы, угарный газ, озон, полициклические ароматические углеводороды, диоксиды азота и серы, альдегиды, хлорированные диоксины, свободные радикалы и многие другие соединения. При этом существенный ущерб наносится широкому биоразнообразию животного мира, который является крайне важным индикаторным звеном практически любого биоценоза.

Ограничения исследования. Результаты исследования могут быть экстраполированы только на популяции животных, находящихся в зоне задымления от лесных пожаров.

Заключение. Увеличение масштабных задымлений всё больше приводит к риску исчезновения диких животных, испытывающих воздействие высоких концентраций токсичных компонентов дыма. Необходимо постоянное поддержание и восстановление биотического потенциала популяций исчезающих видов животных в лесных экосистемах, а также более глубокое изучение механизмов возникновения опасных для организма животных последствий при воздействии дыма лесных пожаров.

Ключевые слова: дым лесных пожаров; биоразнообразие; экологические сообщества; обзор литературы

Для цитирования: Андреева Е.С., Вокина В.А. Влияние дыма лесных пожаров на нарушение биоразнообразия и функциональное состояние живых организмов (обзор литературы). *Токсикологический вестник*. 2023; 31(5): 304–312. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-5-304-312>

Для корреспонденции: Андреева Елизавета Сергеевна, младший научный сотрудник ФГБНУ «ВСИМЭИ», 665827, г. Ангарск, Российская Федерация. E-mail: liza.2995@mail.ru

Участие авторов: Андреева Е.С. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Вокина В.А. – сбор и обработка материала, написание текста. *Все соавторы* – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Поступила в редакцию: 26 июня 2023 / Принята к печати: 19 октября 2023 / Опубликовано: 30 октября 2023

Elizaveta S. Andreeva, Vera A. Vokina

Influence of forest fire smoke on the decline of biodiversity and the state of living organisms (literary review)

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

Introduction. The relevance of this work is due to the growing environmental problem associated with large-scale forest fires and insufficient knowledge of the survival, adaptation and reproduction of animals after prolonged exposure to harmful smoke components.

The aim of the review is to collect and analyze information on environmental pollution due to smoke from forest fires and their impact on animals in the smoke zone.

Material and methods. The material for the analysis was the literature sources published for the period up to 2022, in publications indexed in the Scopus, Web of Science, Publons, Springer, PubMed databases, including domestic and foreign research scientists on this topic.

Results. When forest fires occur, a mixture of gaseous compounds is released into the environment, containing ultrafine solid particles, carbon monoxide, ozone, polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrogen and sulfur dioxide, aldehydes, chlorinated dioxins, free radicals and many other compounds. At the same time, significant damage is caused to a wide biodiversity of the animal world, which is an extremely important indicator link in almost any biocenosis.

Conclusions. The increase in large-scale smoke is increasingly leading to the risk of extinction of wildlife exposed to high concentrations of toxic components of smoke. It is necessary to constantly maintain and restore the biotic potential of populations of endangered species in forest ecosystems, as well as a deeper study of the mechanisms of the occurrence of consequences that are dangerous for the animal organism when exposed to forest fire smoke.

Keywords: wildfire smoke; biodiversity; ecological communities; review

For citation: Andreeva E.S., Vokina V.A. Influence of forest fire smoke on the decline of biodiversity and the state of living organisms (literary review). *Toksikologicheskii vestnik / Toxicological Review*. 2023; 31(5): 304-312. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-5-304-312> (In Russian)

For correspondence: Elizaveta S. Andreeva, Junior Researcher at the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, 665827, Angarsk, Russian Federation. E-mail: liza.2995@mail.ru

Information about the author:

Andreeva E.S., <https://orcid.org/0000-0002-3709-8676>

Scopus Author ID: 57221105691

Vokina V.A., <https://orcid.org/0000-0002-8165-8052>

Scopus Author ID: 22635657500

Contribution of the authors: Andreeva E.S. – concept and design of the study, writing text, editing; Vokina V.A. – collection and processing of the material, writing text. *All co-authors* – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

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

Funding. The work was carried out according to the plan of research work within the framework of the state assignment.

Received: June 26, 2023 / Accepted: October 19, 2023 / Published: October 30, 2023

Введение

За последние десятилетия проблема лесных пожаров приобрела глобальный масштаб, что связано с возрастающей антропогенной нагрузкой на лесные территории и изменением климатических условий, которые сопровождаются увеличением температуры и снижением количества осадков [1, 2]. Такие изменения приводят к увеличению продолжительности сезона и площади лесных пожаров,

вследствие чего происходит разрушение экосистем, приводящее к серьезной потере или деградации естественной среды обитания биотических сообществ [3, 4]. По данным зарубежных и российских исследователей, за последние десять лет наблюдается устойчивый рост лесных пожаров в планетарном масштабе. Об этом свидетельствуют экологические катастрофы, связанные с бушевавшими лесными пожарами в России, США, Бразилии, Аргентине, Канаде и Австралии [5–7].

Цель настоящего обзора — сбор и анализ информации о загрязнённости окружающей среды вследствие задымления от лесных пожаров и их воздействие на стабильность популяций животного мира дикой природы, снижение биоразнообразия, а также функциональные изменения основных органов и систем животных, находящихся в зоне задымления.

Материал и методы

Объектом исследования являлся обзор токсического действия продуктов горения лесной биомассы и возникновение опасных для организма животных последствий при воздействии дыма лесных пожаров. Обзор основан на систематическом поиске литературных источников, опубликованных за период до 2022 г., в изданиях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science, Publons, Springer, PubMed, включающих работы отечественных и зарубежных учёных-исследователей по этой тематике. Поисковые запросы выполняли по следующим ключевым словам: дым лесных пожаров, $PM_{2,5}$ (ультрадисперсные твёрдые частицы диаметром 2,5 мкм), газообразные соединения, животные, ключевые виды, поведение, ЦНС, репродуктивная система и т. д.

Результаты и обсуждение

Масштабы лесных пожаров. Согласно данным отчёта Европейской системы информации о лесных пожарах (EFFIS) за 2020 г., общая площадь, пройденная лесными пожарами, составила 1 075 145 га, что на 35% больше по сравнению с 2019 г. При этом в 39 странах наблюдалось увеличение числа пожаров, которые достигали экстремально больших площадей (30 тыс. га). Большой интерес представляет анализ ущерба на особо охраняемых природных территориях, где обитают редкие и исчезающие виды растений и животных. Так, общая площадь, пройденная лесными пожарами на данных территориях в 2020 г. составила 331 га, что выше среднего показателя за последние 9 лет [8].

На территории лесного фонда Российской Федерации за период с 2016 по 2020 г. средняя площадь лесных пожаров составила около 10 млн га в год, в периоды аномальной горимости лесов данный показатель достигал 16–18 млн га [9, 10]. Известно, что лесами в РФ занято более 20% мировой лесной площади, причём большая часть расположена в Сибири и до 90% общей площади всех лесных пожаров в России приходится на данную территорию [11]. Так 2019 г. в Восточной Сибири были зафиксированы самые масштабные лесные

пожары за последние 20 лет [12]. Основные очаги были расположены в Красноярском крае, Иркутской области и Республике Саха (Якутия), из-за чего было уничтожено около 5 млн га леса [13].

Положительные последствия лесных пожаров повышающие биоразнообразие. Несмотря на регулярное возникновение масштабных лесных пожаров и их разрушительное действие для экосистем, в современной литературе многими исследователями фактор лесных пожаров рассматривается как биокатализатор необходимых изменений в окружающей среде, играющий решающую роль в создании высококачественной среды обитания для некоторой части видов и групп живых организмов [14, 15]. При этом следует учитывать, что возрастающая интенсивность лесных пожаров требует длительного восстановления популяций некоторых ключевых видов животных наземной и подземной биоты. Известно, что эти виды животных оказывают значительное влияние на жизнь других сообществ, так как являются крайне важным индикаторным звеном практически любого биоценоза и колебание их численности сказывается на стабильности популяций всего биотического сообщества, что приводит к изменению механизмов поведения, приспособления и выживаемости животных [16].

Необходимо учитывать, что лесные пожары являются одним из важнейших природных факторов, оказывающих огромное влияние на формирование леса с доисторических времён, и большинство растений и животных адаптировано к периодическим пожарам [17]. Так, например, известно, что пирогенный фактор необходим для прорастания семян некоторых видов растений, чем обеспечивается дополнительное обсеменение площади гари [18]. Также существуют некоторые виды древесных пород, у которых чешуи шишек покрыты смолой и высыпание семян возможно только в результате нагрева во время пожара [19].

Для многих хищников появление дыма сигнализирует о возможности охотиться на насекомых и мелких млекопитающих, которые спасаются от огня [20]. Таким образом, некоторые лесные сообщества могут сохранять свою определённую нишу при периодическом воздействии пирогенного фактора [21]. Однако, когда изменяется пожарный режим, увеличивается сила и частота пожаров, устойчивость лесных биоценозов к пожару может быть снижена, что приведёт к нарушению функций лесной экосистемы. К тому же животные подвергаются высоким концентрациям токсичных компонентов дыма, вследствие чего возникает вероятность формирования нару-

шений функционального состояния организма и морфологических изменений систем и органов, связанных с длительным задымлением лесных территорий. Поэтому сохранение видового биоразнообразия после продолжительного воздействия дыма лесных пожаров является одной из важнейших проблем экологии, так как нехватка кислорода и воздействие токсичных соединений в составе дыма негативно сказывается на состоянии живых организмов, снижая их выживаемость, адаптацию и размножение.

Характеристика дыма лесных пожаров. Известно, что дым от лесных пожаров сохраняется в атмосферном воздухе достаточно длительное время, распространяется на большие расстояния и пересекает географические границы, затрагивая области, удалённые от первоначального источника задымления [22]. В результате этого риск неблагоприятного воздействия дыма от одного лесного пожара на здоровье и поведение живых организмов увеличивается в пространственном масштабе. К тому же известно, что, несмотря на постепенное снижение содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, более мелкие частицы пребывают во взвешенном состоянии до нескольких недель и даже месяцев. Аэрозоли оседают под действием силы тяжести, вымываются осадками из воздуха и в конечном итоге происходит как самоочищение атмосферы от продуктов горения, так и загрязнение других сред, при этом токсичные вещества продолжают оказывать негативное действие, как на человека, так и на растительность и животный мир.

Зарубежные авторы провели исследование процесса переноса загрязняющих веществ от лесных пожаров на большие расстояния и установили, что качество воздуха было изменено на расстоянии более чем тысячи километров от источника задымления [23]. В 2021 г. вследствие лесных пожаров на территории Республики Саха (Якутия) выгорело 8,7 млн га леса. Задымление было такой силы, что шлейф дыма достигал Урала, Хакасии, Ямала, Забайкальского края, Иркутской области, Югры, Сахалина и других субъектов Российской Федерации, а также Казахстана, Аляски (США) [24].

Дым лесных пожаров представляет собой сложный газоаэрозольный комплекс, основными компонентами которого являются органический углерод, а также различные газы, включая диоксид углерода, монооксид углерода, оксиды азота и серы, летучие органические соединения (такие как формальдегид и бензол), а также ультрадисперсные твёрдые частицы диаметром < 10 мкм [25].

Большинство зарубежных исследований сосредоточено на изучении ультрадисперсных твёрдых частиц, которые составляют значительную долю частиц, выделяющихся в результате лесных пожаров [26]. Известно, что ультрадисперсные твёрдые частицы, образующиеся при лесных пожарах, состоят из множества различных компонентов, включая кислоты, неорганические соединения, органические химические вещества, золу, сажу, металлы, частицы почвы или пыли, которые обладают более высоким окислительным потенциалом, чем частицы из городской окружающей среды, из-за присутствия в них большего количества полярных органических соединений [27].

Во время масштабных лесных пожаров в США в штатах Колорадо 2012, Калифорнии 2003, 2008 и 2017 гг., которые непрерывно продолжались в течение нескольких месяцев, была сформирована база данных по широко варьирующим концентрациям ультрадисперсных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} . Так концентрации $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе во время лесных пожаров в Колорадо составили 0,19 мг/м³. В дни интенсивных лесных пожаров уровни $PM_{2,5}$ достигали 50 мг/м³ [28]. В результате пожаров в Южной Калифорнии в 2003 г. уровни PM_{10} увеличились в 3–4 раза, причём в одном из регионов данный показатель достигал 0,21 мг/м³ [29]. Т.С. Wegesser и соавт. (2009) во время лесных пожаров в долине реки Сакраменто (Калифорния, США) установили значения концентраций $PM_{2,5}$, которые достигали 0,26 мг/м³ [30]. Лесные пожары в Северной Калифорнии в 2017 г. привели к повышению концентрации $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе до 0,19 мг/м³. Таким образом, данные показатели загрязнения воздуха твёрдыми частицами значительно превышали национальные стандарты качества атмосферного воздуха по $PM_{2,5}$ (0,015 мг/м³) и PM_{10} (0,045 мг/м³).

Как было отмечено ранее, ежегодно в лесах Сибири наблюдаются лесные пожары, вследствие чего происходит перенос и накопление аэрозольно-газовых примесей в акватории озера Байкал [31, 32]. Однако информации о выбросах загрязняющих веществ от лесных пожаров в атмосферу Байкальского региона крайне мало. Большинство исследователей также сходятся во мнении о недостаточной информации характера влияния дымовых аэрозолей на флору и фауну Прибайкалья, что определяет необходимость их дальнейшего более глубокого изучения [32–35]. В настоящее время исследователями Сибирского отделения РАН (Институт физических материалов, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева,

Лимнологический институт) проводятся летние экспедиции по изучению количественного и качественного состава аэрозольных примесей в период задымления акватории озера Байкал от лесных пожаров. Так в июле 2018 г. в Сибири во время лесных пожаров были установлены высокие концентрации газовых смесей в приземном слое атмосферы озера Байкал, дельты реки Селенги, Баргузинского залива и бухты Песчаная. Было отмечено резкое повышение концентрации диоксида серы (SO_2) до $0,04 \text{ мг/м}^3$ и диоксида азота (NO_2) до $0,03 \text{ мг/м}^3$ [33]. В исследовании G. Zhamsueva и соавт. (2021) был проведён анализ и дана оценка загрязнения воздуха над озером Байкал в период задымления от лесных пожаров в Сибири летом 2019 г. [34]. Полученные результаты свидетельствовали о резком увеличении содержания SO_2 до $0,032 \text{ мг/м}^3$ вблизи мыса Мужинай на северо-восточном побережье озера Байкал. Самые высокие концентрации SO_2 наблюдались вблизи бухты Сосновка из-за близости лесных пожаров, и составили до $0,047 \text{ мкг/м}^3$. Далее в 2020 г. авторами были проведены экспериментальные исследования, где был изучен дисперсный состав аэрозолей и газовых примесей во время маршрутных судовых измерений в акватории озера Байкал в период задымления от лесных пожаров [35]. Авторы отмечают, что, в отличие от прошлых лет, в период экспедиционных исследований в 2020 г. лесных пожаров в самом Байкальском регионе не наблюдалось [32]. Основные очаги лесных пожаров были сосредоточены в северных районах Иркутской области и Якутии. Во время появления дымовых шлейфов наблюдались высокие концентрации SO_2 — до $0,018 \text{ мг/м}^3$. С уменьшением влияния дымовых выбросов вдоль маршрута судна было отмечено значительное снижение концентрации SO_2 .

Влияние пожаров на диких животных. Согласно данным литературы, большинство исследований, касающихся оценки влияния лесных пожаров на популяции диких животных, проводятся на основании динамики их плотности и анализа пространственного распределения животных, среда обитания и пищевые ресурсы которых были изменены на постпожарных ландшафтах [36–38]. В то же время влияние дыма лесного пожара как экологического фактора, обуславливающего нарушения формирования и восстановления сообществ животных, остаётся недостаточно изученным. Существуют лишь некоторые данные о влиянии дыма лесных пожаров на здоровье и поведение диких животных, включая млекопитающих, птиц, рептилий и насекомых [39, 40].

В таблице представлены данные результатов исследований токсического эффекта дыма лесных пожаров на диких животных.

Так, во время пожаров в лесах и торфяниках Индонезии в 2015 г., было установлено, что уровни акустической активности экологического сообщества резко упали во время задымления на 37,5%. Авторы связывают наблюдаемый эффект с уровнем загрязнения воздуха по показателям средних концентраций шести распространённых загрязнителей воздуха: $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , O_3 и NO_2 . Для частичного восстановления акустических уровней потребовалось 4 мес после того, как дым от лесного пожара рассеялся [39].

В исследовании D.I. Rappaport и соавт. (2022) [41] также была изучена акустическая активность животных в лесах Амазонки в период задымления. Установлено, что сигналы между животными стали более тихими и менее связанными. Также авторы установили, что скопления птиц в лесах Амазонки, многократно подверженных задымлению от лесных пожаров, почти полностью отличаются от близлежащих длительно не горевших лесов. Исследователи считают, что акустическая активность экологических сообществ таких, как хоры сверчков, вибрации цикад, занимающих значительные территории акустического пространства, может служить маркером деградации леса [41].

Малочисленные исследования нейробиологии поведения некоторых видов животных в период задымления от лесных пожаров в основном направлены на изучение приматов и птиц, являющихся ключевыми видами, здоровье и поведение которых в первую очередь зависит от качества среды обитания [40, 42]. W.M. Erb и соавт. (2018) [40] при изучении последствий крупномасштабных лесных пожаров на острове Борнео установили, что дым от лесных пожаров отрицательно влияет на двигательную активность, поведенческие реакции и энергетический баланс человекообразных обезьян [40]. Также известно, что мелкие млекопитающие в условиях задымления от лесных пожаров переходят в состояние резко пониженной жизненной активности. Данное состояние сопровождается оцепенением животных, что обеспечивает им сохранение потребления энергии и может иметь функциональное значение для выживания млекопитающих на задымлённых лесных территориях [43].

Таким образом, изменение поведения диких животных в период задымления от лесных пожаров может быть опосредовано как изменением окружающей среды (нарушение видимости), так и действием факторов стресса и токсичных соединений в составе дыма.

Краткая характеристика экспозиции и токсического эффекта дыма на диких животных
Brief description of exposure and toxic effect of smoke on wild animals

Животные	Вид пожара	Характеристика экспозиции	Токсический эффект	Источник
Птицы и насекомые	Лесной и торфяной	21 день PSI* = 97–267	Снижение средних уровней акустической активности до 37,5%	B.P. Y.-H. Lee и соавт. (2017) [39]
	Лесной	Нет данных	Изменение состава акустического сообщества, суточного профиля акустического пространства и пиков акустической активности	D.I. Rappaport и соавт. (2022) [41]
Борнейские орангутанги (Pongo pygmaeus wurmbii)	Лесной	Средняя концентрация $PM_{10} = 0,58 \text{ мг/м}^3$, диапазон $PM_{10} = 0,06\text{--}1,8 \text{ мг/м}^3$	Изменение показателей активности и энергетического баланса (длительность отдыха и двигательной активности, пройденный путь, потребление калорий, содержание кетонов в моче)	W.M. Erb и соавт. (2018) [40]
Желтоногие антехины (Antechinus flavipes: Dasyuridae)	Лесной	Нет данных	Снижение латентного периода оцепенения и повышение продолжительности периода оцепенения	J.K. Matthews и соавт. (2017) [43]
Птицы	Лесной	Средняя концентрация $PM_{2,5} = 0,0086 \text{ мг/м}^3$, диапазон $PM_{2,5} = 0\text{--}0,31 \text{ мг/м}^3$	Снижение вероятности наблюдения птиц при повышенных концентрациях $PM_{2,5}$ для 16 видов (из 71). Положительная корреляция между концентрацией $PM_{2,5}$ и вероятностью наблюдения 10 видов птиц (из 71)	O.V. Sanderfoot and B. Gardner (2021) [44]
	Лесной	Нет данных	Положительная корреляция между концентрациями SO_2 , NO_2 и CO со смертностью мигрирующих видов птиц	D. Yang и соавт. (2021) [45]
Афалины (Tursiops truncatus)	Лесной	Нет данных	Во время пожара и через месяц после окончания выявлено низкое содержание кальция и высокий уровень углекислого газа в сыворотке, низкое содержание нейтрофилов и высокая концентрация хлоридов. А также увеличение процента эозинофилов во время пожара и моноцитов и билирубина через месяц после окончания пожара.	S. Venn-Watson и соавт. (2013) [46]
Макаки-резус (Macaca mulatta)	Лесной	10 дней Средняя концентрация $PM_{2,5} = 0,015 \pm 0,0012 \text{ мг/м}^3$. Максимальная концентрация $PM_{2,5} = 0,078 \text{ мг/м}^3$	Снижение ёмкости вдоха, остаточного объёма, жизненной ёмкости лёгких. Синтез IL-8 был значительно снижен у самок, влияние на синтез IL-6 было наиболее выражено у самцов.	C. Black и соавт. (2017) [47]
	Лесной	12 дней уровень $PM_{2,5}$ превышал $0,035 \text{ мг/м}^3$ Максимальная концентрация $PM_{2,5} = 0,19 \text{ мг/м}^3$	Выявлена связь между воздействием дыма на ранних сроках беременности и повышенным риском потери беременности	B.E. Willson и соавт. (2021) [48]
	Лесной	Пренатальное воздействие в первой трети беременности в течение 14 дней, средняя концентрация $PM_{2,5} = 0,075 \text{ мг/м}^3$	Повышение уровня маркера воспаления, изменение реакции кортизола на стресс, дефицит памяти и более пассивная поведенческая реакция	J.P. Capitanio и соавт. (2022) [49]

Примечание. * PSI (индекс стандартов загрязнителей) – тип индекса качества воздуха, который представляет собой число, используемое для обозначения уровня загрязняющих веществ в воздухе, рассчитывается на основе средних концентраций шести распространённых загрязнителей воздуха: мелких твердых частиц ($PM_{2,5}$), твёрдые частицы (PM_{10}), диоксид серы, окись углерода, озон, и диоксид азота.

Влияние дыма лесных пожаров на дыхательную систему. Известно, что дым от лесных пожаров оказывает негативное влияние на животных, дыхательная система которых чувствительна к загрязнениям в атмосферном воздухе. В работе O.V. Sanderfoot и B. Gardner (2021) [44] установлено, что во время продолжительного задымления от лесных пожаров наблюдалось отсутствие многих видов птиц, авторы связывают такие реакции с высокими концентрациями $PM_{2.5}$ в окружающей среде. Снижение вероятности обнаружения птиц в условиях задымления от лесных пожаров может быть обусловлено, с одной стороны, непосредственным влиянием токсических компонентов дыма, многие из которых оказывают выраженное раздражающее действие на дыхательную систему и провоцируют реакцию избегания у птиц. С другой стороны, токсический эффект дыма может быть опосредован влиянием на поведенческие реакции, физическую активность и способность к вокализации диких птиц, что значительно усложняет процесс их обнаружения и идентификации. Следует также учитывать, что при высокой интенсивности задымления поиск и распознавание птиц может быть затруднён снижением видимости [44]. Полученные данные O.V. Sanderfoot и B. Gardner (2021) подтверждаются исследованием D. Yang и соавт. (2021) [45]. По мнению исследователей, выбросы ультрадисперсных твёрдых частиц и летучих органических соединений вследствие лесных пожаров приводят к утрате мест обитания многих видов птиц и представляют серьёзную угрозу для дикой природы [45].

Известно, что китообразные, как и птицы, обменивают большую часть воздуха в лёгких, что может подвергнуть их большому риску неблагоприятных последствий для здоровья, чем других млекопитающих во время задымления лесными пожарами [46].

Влияние дыма лесных пожаров на репродуктивный потенциал. Следует отметить, что негативные последствия для здоровья, связанные с вдыханием дыма от лесных пожаров, могут повлиять на репродуктивный потенциал популяций диких животных. Однако в литературе таких исследований представлено крайне мало, описаны лишь эксперименты, в которых животные намеренно подвергались воздействию дыма или составляющих дыма в контролируемых лабораторных условиях. В исследованиях C. Black и соавт. (2017) в период сильного задымления от лесных пожаров, произошедших в Северной Калифорнии летом 2008 г. было установлено, что воздействие дыма

привело к значительному снижению общей ёмкости лёгких у макак-резус (*Macaca mulatta*), обследованных в раннем возрасте. Исследователи отмечают, что изменения, произошедшие у животных, имеют половые различия, которые зависят от возраста [47]. Данные о влиянии воздействия дыма от лесных пожаров в Калифорнии на фертильность, время родов и исходы беременности макак-резус представлены в исследовании B.E. Willson и соавт. (2021) [48]. Так, авторами установлено, что воздействие повышенных уровней $PM_{2.5}$ при лесных пожарах на ранних сроках беременности может иметь негативное влияние на исходы беременности у приматов [48].

J.P. Capitanio и соавт. (2022) [49] изучали последствия воздействия дыма от лесного пожара, произошедшего в Калифорнии в ноябре 2018 г., на макак-резус на ранних сроках беременности, в частности изучали воздействие высоких концентраций $PM_{2.5}$. Авторы пришли к выводу, что у животных, подвергавшихся воздействию дыма от лесных пожаров, наблюдалось повышение значения маркера системного воспаления, такого как С-реактивный белок (СРБ), пониженный уровень кортизола, снижение поведенческих реакций и памяти [49].

В исследовании A. Anderson и соавт. (2022) [50] представлены данные о влиянии десятикратного превышения $PM_{2.5}$ в течение 7 дней на лактирующих коров. Установлена связь между влиянием высоких концентраций $PM_{2.5}$ и увеличением смертности телят и коров в период лактации, а также ослаблением их иммунной системы [50].

В работе L.M. Sosedova и соавт. (2021) [51] приведены данные о длительном воздействии дыма лесного пожара на мужской репродуктивный потенциал белых крыс. Авторы установили, что продукты горения лесной биомассы оказывают негативное влияние на морфофункциональное состояние семенников белых крыс и показатели центральной нервной системы их половозрелого потомства. Авторы также оценили стойкость полученных изменений в репродуктивной функции после прохождения полного цикла сперматогенеза и установили, что через 60 дней после воздействия продуктами горения лесной биомассы у потомства наблюдались изменения в поведении, хотя и заметно менее выраженные. Данный факт исследователи связывают с длительным сохранением в мужской репродуктивной системе информации о неблагоприятных эффектах воздействия дыма, обусловленных, вероятно, изменением генома и/или эпигенома мужских половых клеток [51].

Заключение

Частота и интенсивность крупномасштабных задымлений от лесных пожаров в настоящее время приобрела глобальный характер. Известно, что лесные пожары приводят к утрате генетического, таксономического и функционального биоразнообразия, уничтожают ареалы местообитаний для многих ключевых видов растений, животных и микроорганизмов, а также приводят к утрате функций лесных экосистем. Однако, несмотря на имеющиеся опубликованные данные о влиянии лесных пожаров на биоразнообразие природных комплексов, отсутствуют общепринятые представления и единые концепции, позволяющие определить экологический ущерб при задымлении неповреждённых огнём территорий. Ядовитые газы и аэрозоли, содержащиеся в дыме лесных пожаров, могут оказывать негативное влияние на здоровье и демографию популяций диких животных в гораздо большем пространственном масштабе, чем площадь пройденной огнём территории. Поэтому необходимы дополнительные исследования, чтобы определить, какие таксоны находятся под угрозой от воздействия дыма и выявить его влияние на физиологию, поведение и жизненный цикл данных видов.

В настоящем обзоре представлены результаты научных исследований в различных областях, касающихся науки о дикой природе, ветеринарной медицины, экотоксикологии. Несмотря на то, что исследований, непосредственно изучавших воздействие дыма лесных пожаров на дикую природу, в литературе представлено небольшое количество, они свидетельствуют о том, что дым от

лесных пожаров способствует неблагоприятным острым и хроническим последствиям для здоровья диких животных. Установлено, что вдыхание дыма может привести к отравлению различными газами и твёрдыми частицами, острому респираторному дистрессу, неврологическим нарушениям, сердечно-сосудистым заболеваниям, окислительному стрессу и иммуносупрессии у диких животных, включая наземные и водные виды, и эти последствия для здоровья могут способствовать изменениям двигательной активности и вокализации. Некоторые виды также используют дым как сигнал к избеганию огня или сохранению энергетического баланса. Однако существуют значительные пробелы в исследованиях влияния дыма от лесных пожаров на дикую природу. В частности, отсутствие достоверных данных об уровне загрязнения воздуха в существующих исследованиях ограничивает метаанализ и препятствует построению зависимостей «доза–ответ», тем самым исключая возможность прогнозирования последствий для здоровья и поведения животных в условиях снижения качества воздуха, особенно во время экстремальных случаев задымления.

Таким образом, оценка индуцированных дымом эффектов в дикой природе является важной задачей экологии, которая может иметь критические последствия на индивидуальном и популяционном уровнях. Необходимо постоянное поддержание и восстановление биотического потенциала популяций исчезающих видов животных в лесных экосистемах, а также более глубокое изучение механизмов возникновения опасных для организма животных последствий при воздействии дыма лесных пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

(пп. 1–8, 14–16, 18, 20, 22–32, 34, 35, 39–51 см. в References)

- Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017; 14(6): 158–75. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году». Иркутск: ООО «Мегалит»; 2020.
- Харук В.И., Пономарев Е.И. Пространственно-временные характеристики частоты и относительной площади лесных пожаров в лиственных лесах Центральной Сибири. *Российский экологический журнал*. 2017; 48: 507–12. <https://doi.org/10.1134/S1067413617060042>
- Спутниковый мониторинг пожаров на Дальнем Востоке [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fires-dv.kosmosnimki.ru> (дата обращения: 9.09.2022).
- Федеральное агентство лесного хозяйства [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aviales.ru> (дата обращения: 9.09.2022).
- Алейников А.А., Тюрин А.В., Симакин Л.В., Ефименко А.С., Лазников А.А. История пожаров в темновойных лесах Печоро-Ильчского заповедника со второй половины XIX в. по настоящее время. *Сибирский лесной журнал*. 2015; (6): 31–42.
- Цветков П.А. Пирогенные свойства древесных пород. *Лесоведение*. 2011; (2): 25–31. <https://doi.org/10.15372/SJFS20150603>
- Цветков П.А. О последствиях лесных пожаров в Сибири. *Хвойные бореальной зоны*. 2013; 31(5–6): 10–4.
- Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Бальжанов Т.С. Влияние динамических процессов на вариации озона и других малых газовых примесей вблизи береговой зоны озера Байкал. *Оптика атмосферы и океана*. 2015; 28(6): 505–11. <https://doi.org/10.15372/AOO20150602>
- Дыржинов Ж.Д., Гынинова А.Б. Почвы сосновых боров Селенгинского дельтового района и их трансформации под влиянием пожаров. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология»*. 2014; 9: 95–104.
- Белых Л.И., Терентьев Е.С. Опасность лесных пожаров для охотничье-промысловых животных на территории Ольхонского района Иркутской области. *XXI век. Техносферная безопасность*. 2019; 4(3): 268–82. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-268-282>
- Белых Л.И., Садовская Е.А. Влияние лесных пожаров на численность популяций охотничьей фауны на территории Иркутской области. *XXI век. Техносферная безопасность*. 2021; 6(1): 9–28. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-1-9-28>

REFERENCES

- Balmes J.R. The Changing Nature of Wildfires. *Clin. Chest. Med.* 2020; 41(4): 771–6. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2020.08.006>
- Yao J., Brauer M., Wei J., McGrail K.M., Johnston F.H., Henderson S.B. Sub-Daily Exposure to Fine Particulate Matter and Ambulance Dispatches during Wildfire Seasons: A Case-Crossover Study in British Columbia, Canada. *Environ. Health Persp.* 2020; 128(6): 067006. <https://doi.org/10.1289/EHP5792>
- Silvestro R., Saulino L., Cavallo C., Allevato E., Pindozi S., Cervelli E., Conti P., Mazzoleni S., Saracino A. The Footprint of Wildfires on Mediterranean Forest Ecosystem Services in Vesuvius National Park. *Fire*. 2021; 4(4): 95. <https://doi.org/10.3390/fire4040095>
- Magzamen S., Gan R.W., Liu J., O'Dell K., Ford B., Berg K., et al. Differential cardiopulmonary health impacts of local and long-range transport of wildfire smoke. *GeoHealth*. 2021; 5(3): e2020GH000330. <https://doi.org/10.1029/2020GH000330>

5. Adame J.A., Lope L., Hidalgo P.J., Sorribas M., Gutiérrez-Álvarez J., Águila A., et al. Study of the exceptional meteorological conditions, trace gases and particulate matter measured during the 2017 forest fire in Doñana Natural Park, Spain. *Sci. Total Environ.* 2018; 645: 710–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.181>
6. Kondo M.C., De Roos A.J., White L.S., Heilman W.E., Mockrin M.H., Gross-Davis C.A., Burstin I. Meta-Analysis of Heterogeneity in the Effects of Wildfire Smoke Exposure on Respiratory Health in North America. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019; 16(6): 960. <https://doi.org/10.3390/ijerph16060960>
7. O'Neill S.M., Diao M., Raffuse S., Al-Hamdan M., Barik M., Jia Y., et al. A multi-analysis approach for estimating regional health impacts from the 2017 Northern California wildfires. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2021; 71(7): 791–814. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1891994>
8. San-Miguel-Ayaz, Durrant J., Boca T., Maianti R., Liberta P., Artes-Vivancos G., et al. *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2020*. Publications office of the European Union, Luxembourg. EUR 30862 EN, 2021. <https://doi.org/10.2760/216466>
9. Lupyatov E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobec D.A., et al. Satellite monitoring of forest fires in the 21st century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on active gorenje detection data). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2017; 14(6): 158–75. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175> (In Russian)
10. State Report "On the state and environmental protection of the Irkutsk region in 2019" [Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushhej sredy" Irkutskoj oblasti v 2019 godu"]. Irkutsk: OOO «Megaprint»; 2020: 314. (In Russian)
11. Haruk V.I., Ponomarev E.I. Spatial and temporal characteristics of the frequency and relative area of forest fires in the larch forests of Central Siberia. *Rossiiskij ekologicheskij zhurnal.* 2017; 48: 507–12. <https://doi.org/10.1134/S1067413617060042> (In Russian)
12. Satellite monitoring of fires in the Far East [Sputnikovyj monitoring pozharov na Dal'nem Vostoke] (Electronic resource). Access mode: <https://fires-dv.kosmosnimki.ru> (date of application: 9.09.2022) (In Russian)
13. Federal Forestry Agency [Electronic resource]. Access mode: <https://aviales.ru> (date of application: 9.09.2022) (In Russian)
14. Stephens S., Collins B.M., Fetting C.J., Finney M.A., Hoffman C.M., Knapp E.E., et al. Drought, tree mortality, and wildfire in forests adapted to frequent fire. *BioScience.* 2018; 68(2): 77–88. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix146>
15. Hood S., Sala A., Heyerdahl E.K., Boutin M. Low-severity fire increases tree defense against bark beetle attacks. *Ecology.* 2015; 96(7): 1846–55. <https://doi.org/10.1890/14-0487.1>
16. Zhao-Hua L., Ling M., Qing-Xi G. Concepts of keystone species and species importance in ecology. *Journal of Forest Research.* 2001; 12(4): 250–2. <https://doi.org/10.1007/BF02856717>
17. Alejnikov A.A., Tyurin A.V., Simakin L.V., Efimenko A.S., Laznikov A.A. The history of fires in the dark coniferous forests of the Pechora-Ilych Reserve from the second half of the XIX century to the present. *Sibirskij lesnoj zhurnal.* 2015; (6): 31–42. <https://doi.org/10.15372/SJFS20150603> (In Russian)
18. Keeley J.E., Fotheringham C.J. History and Management of Crown-Fire Ecosystems: A Summary and Response. *Conservation Biology.* 2001; 15(6): 1561–7.
19. Cvetkov P.A. Pyrogenic properties of wood species. *Lesovedenie.* 2011; (2): 25–31. (In Russian)
20. Hovick T.J., McGranahan D.A., Elmore R.D., Weir J.R., Fuhlendorf S.D. Pyric-carnivory: Raptor use of prescribed fires. *Ecol. Evol.* 2017; (7): 9144–50.
21. Cvetkov P.A. About the consequences of forest fires in Siberia. *Hvojnye boreal'noj zony.* 2013; 31(5–6): 10–4. (In Russian)
22. Dennekamp M., Abramson M.J. The effects of bushfire smoke on respiratory health. *Respirology.* 2011; 16(2): 198–209. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2010.01868.x>
23. Sapkota A., Symons J.M., Kleissl J., Wang L., Parlange M.B., Ondov J., et al. Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore city. *Environ. Sci. Technol.* 2005; 39(1): 24–32. <https://doi.org/10.1021/es035311z>
24. Tomshin O., Solov'yev V. Features of the Extreme Fire Season of 2021 in Yakutia (Eastern Siberia) and Heavy Air Pollution Caused by Biomass Burning. *Remote Sensing.* 2022; 14(19): 4980. <https://doi.org/10.3390/rs14194980>
25. Wohlsein P., Peters M., Schulze C., Baumgärtner W. Thermal injuries in veterinary forensic pathology. *Veterin. Pathol.* 2016; 53(5): 1001–17. <https://doi.org/10.1177/0300985166433682016>
26. Reid J.S., Koppmann R., Eck T.F., Eleuterio D.P. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmos. Chem. Phys.* 2005; 5(3): 799–825. <https://doi.org/10.5194/acp-5-799-2005>
27. Monroe M.C., Watts A.C., Kobziar L.N. *Where there's fire, there's smoke: air quality & prescribed burning in Florida*. Gainesville, FL, USA: IFAS Extension University of Florida, 1999.
28. Alman B.L., Pfister G., Hao H., Stowell J., Hu X., Liu Y., et al. The association of wildfire smoke with respiratory and cardiovascular emergency department visits in Colorado in 2012: a case crossover study. *Environ Health.* 2016; 15(64). <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0146-8>
29. Phuleria H.C., Fine P.M., Zhu Y. Air quality impacts of the October 2003 Southern California wildfires. *J. Geophys. Res.* 2005; 110(7): 1–11. <https://doi.org/10.1029/2004jd004626>
30. Wegesser T.C., Pinkerton K.E., Last J.A. California Wildfires of 2008: Coarse and Fine Particulate Matter Toxicity. *Environ Health Perspect.* 2009; 117(6): 893–7. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800166>
31. Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydypov V.V., Balzhanov T.S., Dementeva A.L., Khodzher T.V. Investigation of Transport and Transformation of Tropospheric Ozone in Terrestrial Ecosystems of the Coastal Zone of Lake Baikal. *Atmosphere.* 2019; 10(12): 739. <https://doi.org/10.3390/atmos10120739>
32. Khodzher T.V., Zagaynov V.A., Lushnikov A.A., Chausov V.D., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., et al. Study of aerosol nano- and submicron particle compositions in the atmosphere of lake Baikal during natural fire events and their interaction with water surface. *Water Air Soil Pollut.* 2021; 232: 266. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05237-6>
33. Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydypov V.V., Balzhanov T.S., Dementeva A.L., Khodzher T.V. Investigation of Transport and Transformation of Tropospheric Ozone in Terrestrial Ecosystems of the Coastal Zone of Lake Baikal. *Optika Atmosfery i Okeana.* 2019; 10(12): 739. <https://doi.org/10.3390/atmos10120739> (In Russian)
34. Zhamsueva G., Zayakhanov A., Tsydypov V., Dementeva A., Balzhanov T. Spatial-temporal variability of small gas impurities over lake Baikal during the forest fires in the summer of 2019. *Atmosphere.* 2021; 12(1): 20. <https://doi.org/10.3390/atmos12010020>
35. Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T., Tsydypov V., Balzhanov T., Dementeva A. Studies of the Dispersed Composition of Atmospheric Aerosol and Its Relationship with Small Gas Impurities in the Near-Water Layer of Lake Baikal Based on the Results of Ship Measurements in the Summer of 2020. *Atmosphere.* 2022; 13(1): 139. <https://doi.org/10.3390/atmos13010139>
36. Dyrzhinov Z.H.D., Gyninova A.B. Soils of pine forests of the Selenginsky delta region and their transformation under the influence of fires. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya».* 2014; 9: 95–104. (In Russian)
37. Belykh L.I., Terent'ev E.S. Danger of forest fires for hunting and commercial animals on the territory of the Olkhonsky district of the Irkutsk region. *XXI vek. Tekhnosfermaya bezopasnost'.* 2019; 4(3): 268–82. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-268-282> (In Russian)
38. Belykh L.I., Sadovskaya E.A. The impact of forest fires on the number of hunting fauna populations in the Irkutsk region. *XXI vek. Tekhnosfermaya bezopasnost'.* 2021; 6(1): 9–28. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-1-9-28> (In Russian)
39. Lee B.P.Y.-H., Davies Z.G., Struebig M.J. Smoke pollution disrupted biodiversity during the 2015 El Niño fires in Southeast Asia. *Environ. Res. Lett.* 2017; 12(9): 1–7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa87ed>
40. Erb W.M., Barrow E.J., Hofner A.N., Utami-Atmoko S.S., Vogel E.R. Wildfire smoke impacts activity and energetics of wild Bornean orangutans. *Scientific Reports.* 2018; 8: 7606. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25847-1>
41. Rappaport D.I., Swain A., Fagan W.F., Dubayah R., Morton D.C. Animal soundscapes reveal key markers of Amazon forest degradation from fire and logging. *Ecology.* 2022; 119(18): e2102878119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2102878119>
42. Brown R.E., Brain J.D., Wang N. The avian respiratory system: a unique model for studies of respiratory toxicosis and for monitoring air quality. *Environ. Health Perspect.* 1997; 105(2): 188–200. <https://doi.org/10.1289/ehp.97105188>
43. Matthews J.K., Stawski C., Körtner G., Parker C.A., Geiser F. Torpor and basking after a severe wildfire: mammalian survival strategies in a scorched landscape. *J. Comp. Physiol.* 2017; 187: 385–93. <https://doi.org/10.1007/s00360-016-1039-4>
44. Sanderfoot O.V., Gardner B. Wildfire smoke affects detection of birds in Washington State. *Ornithological Applications.* 2021; 123(3): 1–14. <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duab028>
45. Yang D., Yang A., Yang J., Xu R., Qiu H. Unprecedented migratory bird die-off: a citizen-based analysis on the spatiotemporal patterns of mass mortality events in the western United States. *Geo Health.* 2021; 5(4): e2021GH000395. <https://doi.org/10.1029/2021GH000395>
46. Venn-Watson S., Smith C.R., Jensen E.D., Rowles T. Assessing the potential health impacts of the 2003 and 2007 firestorms on bottlenose dolphins *Tursiops truncatus* in San Diego Bay. *Inhalation Toxicology.* 2013; 25: 481–91. <https://doi.org/10.3109/08958378.2013.804611>
47. Black C., Gerriets J.E., Fontaine J.H., Harper R.W., Kenyon N.J., Tablin F., et al. Early life wildfire smoke exposure is associated with immune dysregulation and lung function decrements in adolescence. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* 2017; 56(5): 657–66. <https://doi.org/10.1165/rcmb.2016-0380OC>
48. Willson B.E., Gee N.A., Willits N.H., Lie L., Zhang Q., Pinkerton K.E., et al. Effects of the 2018 camp fire on birth outcomes in non-human primates: case-control study. *Reprod. Toxicol.* 2021; 105: 128–35. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2021.08.005>
49. Capitanio J.P., Del Rosso L.A., Gee N., Lasley B.L., Commun N. Adverse biobehavioral effects in infants resulting from pregnant rhesus macaques' exposure to wildfire smoke. 2022; 13: 1774. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29436-9>
50. Anderson A., Rezamand P., Skibieli A.L. Effects of wildfire smoke exposure on innate immunity, metabolism, and milk production in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science.* 2022; 105(8): 7047–60. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22135>
51. Sosedova L.M., Vokina V.A., Novikov M.A., Zhurba O.M., Alekseenko A.N., Rukavishnikov V.S., et al. Paternal biomass smoke exposure in rats produces behavioral and cognitive alterations in the offspring. *Toxics.* 2021; 9(1): 1–11. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1224-1228>

ОБ АВТОРАХ:

Андреева Елизавета Сергеевна (Elizaveta S. Andreeva) – младший научный сотрудник лаборатории биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, г. Ангарск. E-mail: liza.2995@mail.ru

Вокина Вера Александровна (Vera A. Vokina) – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, г. Ангарск. E-mail: vokina.vera@gmail.com