

— ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТА —

УДК 502.572: 504.055: 910.27
DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.014*А.В. Остроухов, Г.В. Харитонов*

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

**ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
РЕК И ОЗЁР УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ
СРЕДНЕАМУРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ**

Аннотация. Ландшафтные пожары, являющиеся важным фактором функционирования и трансформации геосистем (наземные геосистемы, атмосферный воздух, растительный и животный мир), оказывают существенное влияние и на водные экосистемы. Настоящая работа посвящена оценке влияния пожаров на водные экосистемы урбанизированных территорий Среднеамурской низменности (в пределах Хабаровского края). Задачами работы являются оценка горимости и пирогенной трансформации исследуемой территории на основе анализа и дешифрирования многолетних рядов данных ДЗЗ; анализ особенностей состава и закономерностей постпирогенного изменения донных отложений ключевого участка (бассейн р. Симми, малый приток р. Амур). Для определения среднесуточных характеристик природных пожаров и тенденций их изменения были использованы безоблачные данные свободного доступа со спутников Landsat 5, 7 и 8 за период с 1984 по 2020 гг. Обработка данных ДЗЗ проводилась методом экспортного дешифрирования в программе ArcGIS 10.5.

На основе многолетних рядов данных ДЗЗ были выделены площади ландшафтных пожаров за период с 1984 по 2020 год. Анализ полученных данных свидетельствует о значительных масштабах и высокой повторяемости пирогенного воздействия на геосистемы территории. Результаты работы показывают значительное занижение площадей луговых пожаров по данным официальной статистики. По среднесуточным данным ДЗЗ в пределах Среднеамурской низменности пожарами затронуто от 27 до 35 % лесных экосистем, а в отдельные годы площади пожаров превышают 50 % территории, что сопоставимо с площадями лесных пожаров в Хабаровском крае в целом. При этом по официальным данным на лесные пожары в крае приходится лишь 8,9 %. Недооценка влияния луговых пожаров связана, по нашему мнению, в первую очередь с несовершенством методов автоматического картирования гарей, что приводит к занижению их площадей.

В пределах ключевой территории были изучены донные отложения р. Симми. Отбор проб (15 образцов, по стандартным методикам) был проведен в мае 2018 года (на третий год после осеннего пожара 2016 г.) и в июле 2019 г. после весеннего (март–апрель) пожара. Основными методами исследования были гранулометрический и валовой химический анализы, а также сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Гранулометрический состав определяли методами седиментации по Качинскому и лазерной дифракции на анализаторе размера частиц (SALD-2300, Shimadzu, Japan). Валовой состав определяли рентгенфлуоресцентным методом (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). СЭМ-анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMN (TESCAN, Czech Republic). Основные методы исследования были дополнены стандартными физико-химическими методами анализа.

Полученные нами данные для ключевого участка свидетельствуют, что прохождение луговых пожаров на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава отложений. В первые месяцы

ОСТРОУХОВ Андрей Вячеславович – к.г.н., в.н.с., Институт водных и экологических проблем ДВО РАН. E-mail: Ostran2004@bk.ru

OSTROUKHOV Andrei Viacheslavovich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS. E-mail: Ostran2004@bk.ru

ХАРИТОНОВА Галина Владимировна – д.б.н., г.н.с., Институт водных и экологических проблем ДВО РАН. E-mail: Ostran2004@bk.ru

KHARITONOVA Galina Vladimirovna – Doctor of Biological Sciences, Principal researcher, Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS. E-mail: Ostran2004@bk.ru

после пожара реакцией речной системы является секвестирование растворимых соединений Р, которые образуются при «огневой» минерализации. Это происходит в результате связывания фосфат-ионов в вивианит, растворимость которого чрезвычайно мала в отсутствие сульфатов и сульфат-редуцирующих бактерий. Вивианит осаждается на поверхности глинисто-железистых микроагрегатов взвешенной фракции наносов, которая со временем (2–3 года) выносится потоком, что приводит к снижению масштабов воздействия пожара на локальных участках.

Ключевые слова: ландшафтные пожары, Среднеамурская низменность, данные дистанционного зондирования, геоинформационный анализ, водные объекты, донные отложения.

A. V. Ostroukhov, G. V. Kharitonova

Institute of Water and Ecology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia

THE EFFECT OF WILDFIRES ON THE COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS OF RIVERS AND LAKES IN URBANIZED AREAS OF THE MIDDLE AMUR LOWLAND

Abstract. Wild fires is an important factor in the functioning and transformation of geosystems. The aim of the study is to assess the impact of fires on the aquatic ecosystems of urbanized areas of the Middle Amur Lowland (within Khabarovsk Krai). The tasks of the work are to assess the burnability and pyrogenic transformation of the territory based on the analysis of long-term earth remote sensing (ERS) data series and to analyze the composition and patterns of post-pyrogenic changes in the bottom sediments of the key site (basin of the Simmi River, small tributary of the Amur River). Cloudless data of free access from Landsat 5, 7 and 8 satellites for 37-yr (1984 – 2020) were used to determine the average long-term characteristics of wildfires and trends in their changes. ERS processing was carried out by the expert decryption method in the ArcGIS 10.5 program.

The analysis of allocated wild fires indicates a significant scale and high repeatability of pyrogenic effects on the geosystems of the territory. Grass fires affected from 27 to 35 % of non-forest ecosystems, exceed 50 % in some years, which is comparable to the areas of forest fires. But according to official data, due to the imperfection of the methods of automatic mapping of the burnt-out territory, non-forest fires in the region account for only 8.9 %.

The bottom sediments were studied in the key site. Sampling (15 samples, according to standard methods) was carried out in May 2018 (in the third year after the autumn fire of 2016) and in July 2019 after the spring (March–April) fire. The main research methods were granulometric and gross chemical analyses and scanning electron microscopy (VEGA 3 LM scanning electron microscope, TESCAN, Czech Republic). The granulometric composition was determined by laser diffraction on a particle size analyzer (SALD-2300, Shimadzu, Japan). The gross composition was determined by X-ray fluorescence method (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). Our data indicate that the passage of grass fires in the catchment area entails a change in the chemical composition of BS formed in the post-pyrogenic period. In the first months after the fire, the reaction of the river system is the sequestration of soluble P compounds, which are formed during “fire” mineralization. This occurs as a result of the binding of phosphate ions into vivianite. It is precipitated on the surface of clay-ferruginous microaggregates of a suspended sediment fraction, which over time (2-3 years) is carried out by the stream. The latter leads to a reduction in the scale of the impact of the fire.

Keywords: landscape fires, Middle Amur lowlands, remote sensing data, geo-information analysis, water bodies, bottom sediments.

Введение

Изучение функционирования и трансформации геосферы под влиянием деятельности человека является одним из приоритетных научных направлений в настоящее время [1]. Большое количество работ посвящено оценке масштабов и влиянию природных пожаров в бореальной зоне северного полушария [2–4] (главным образом лесных [5–7] и торфяных [8–9]), а также последствиям сельскохозяйственных палов в Северной Америке [10], Восточной Европе [11–12] и Азии [13]. В России – крупнейшей лесной державе мира – решению проблем, связанных с лесными пожарами, всегда уделялось большое внимание [14]. В последние десятилетия много работ появилось и о пожарах на нелесных территориях – степных и лесостепных пространствах Европейской части России, юга Западной Сибири, степей засушливой континентальной части Восточной Сибири. Проведенные исследования степных территорий (Европейская

часть России, Белоруссия, Литва и др.) выявили значительные площади неучтенных сгоревших сельскохозяйственных угодий и пастбищ [15]. Показано, что на долю Европейской территории России приходится 31–36 % мировых сельскохозяйственных палов.

Подобными исследованиями экосистемы луговых и лугово-болотных сообществ бореальной зоны охвачены слабо. По сравнению с лесными, пожары в этих экосистемах (при низких показателях эмиссии углерода) за счет значительной скорости накопления горючих материалов характеризуются высокой повторяемостью [16]. Особенностью бореальных лугов является наличие двух пожароопасных сезонов (весна и/или осень), что отличает их от австралийских бушей и африканских саванн, сравнимых по массе горючих растительных материалов [17]. Сезон весенних травяных палов в лугово-болотных экосистемах начинается со схода снега и высыхания прошлогодней травы (ветоши) на открытых участках, заканчивается с началом активного роста травянистой растительности. Длится он обычно не более 3–4 недель. Начало осенних пожаров приходится на конец вегетации и заканчивается с выпадением снега.

Одним из таких регионов бореальной зоны, где широко распространены лугово-болотные экосистемы, является российская часть трансграничной Амуро-Сунгарийской равнины – Среднеамурская низменность. В пределах Хабаровского края ее площадь составляет 4,1 млн. га. Практически ежегодно здесь наблюдаются масштабные природные пожары, охватывающие луговые и лугово-болотные экосистемы (рис. 1). Предпосылками их возникновения являются климатические особенности территории, специфика растительного покрова, характер освоения [18].

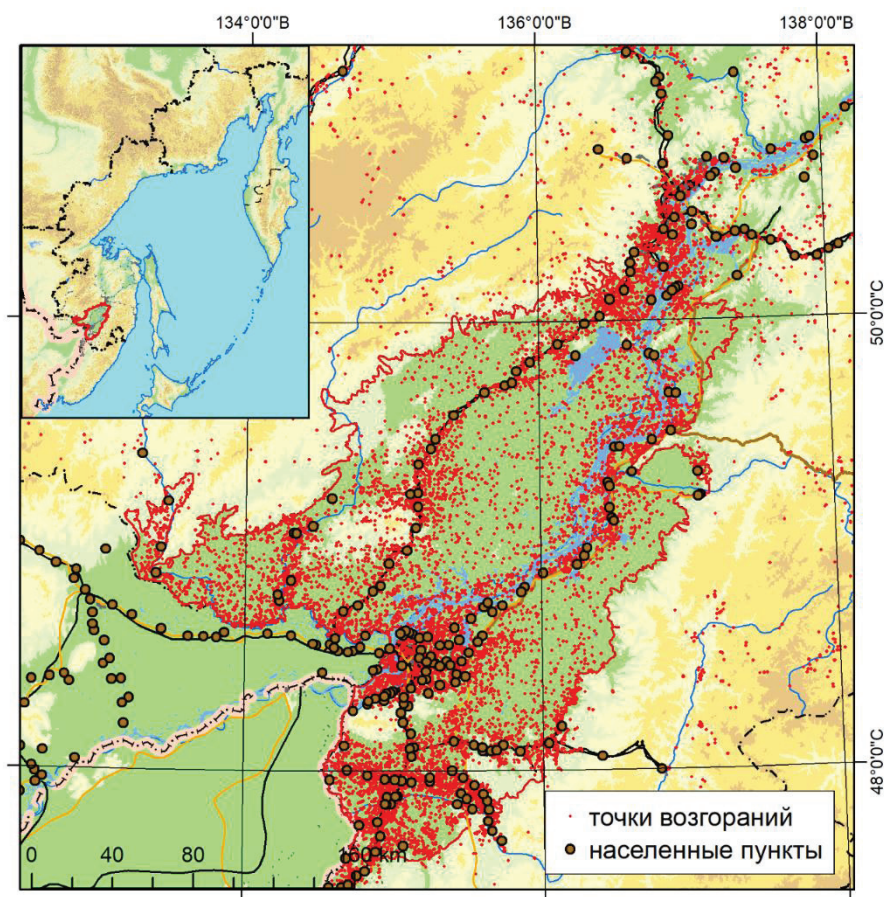


Рис. 1. Точки возгораний за 2000 – 2020 годы в пределах Среднеамурской низменности (по данным ИСДМ – Рослесхоз [19])

Активное (промышленное и сельскохозяйственное) освоение Среднеамурской низменности началось с конца XIX в., но происходило весьма неравномерно. Вначале хозяйственная

деятельность охватила только ее западную, а позже – южную правобережную часть. В настоящее время общая площадь нарушенных земель составляет 7,6 % [18]. Для системы расселения и землепользования Среднеамурской низменности характерна высокая концентрация освоенных земель и населённых пунктов главным образом вдоль основных транспортных магистралей (Биробиджан – Хабаровск – Владивосток, Хабаровск – Комсомольск-на-Амуре) и вокруг крупнейших городов (Хабаровск, Комсомольск – на – Амуре). Именно для этих территорий с высокой степенью освоенности характерно максимальное количество возгораний (рис. 1). К сожалению, в статистических данных (с 2000 по 2021 годы) системы ИСДМ Рослесхоз информация о пространственных границах пожаров отсутствует. Пожары на нелесных землях включены в официальную статистику лишь с 2016 года. Это определяет актуальность задачи картирования пожаров по многолетнему ряду данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Влияние столь масштабного фактора как ландшафтные пожары отмечается не только для наземных геосистем, атмосферного воздуха, растительного и животного мира, но и для водных экосистем [20–21]. Прохождения пожара на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава речных и озерных вод, что не может не отражаться на химическом составе донных отложений, формирующихся в постпирогенный период [22].

Целью настоящей работы является оценка влияния пожаров на состав донных отложений рек и озёр урбанизированных территорий Среднеамурской низменности (в пределах Хабаровского края). Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Оценка горимости и пирогенной трансформации исследуемой территории на основе анализа и дешифрирования многолетних рядов данных ДЗЗ.
2. Анализ особенностей состава и закономерностей постпирогенного изменения донных отложений ключевого участка (р. Симми, малый приток р. Амур).

Материалы и методы

В данной работе для выделения площадей, пройденных огнём, по данным ДЗЗ из двух основных подходов: 1. детектирование активного горения, основанное на применении данных низкого пространственного разрешения (250–500–1000 м) с высокой частотой съемки (MODIS, VIIRS и др.) [11, 23] и 2. картографирование гарей с использованием данных среднего и высокого пространственного разрешения (10–15–30 м) в видимом и инфракрасном диапазоне [24–25], нами был использован второй подход. Выбор обусловлен низким уровнем пространственного разрешения данных ДЗЗ активного горения. В результате узкая кромка огня и малая площадь зоны горения в пределах луговых и лугово-болотных экосистем, а также сильное задымление препятствуют обнаружению пожара [23, 26].

Высокая повторяемость травяных пожаров (ежегодная, иногда и двукратная за год), чередование лет с малой и высокой горимостью определили необходимость использования данных длительного периода наблюдений для определения среднемноголетних характеристик природных пожаров и тенденций их изменения [17]. Выделение гарей в травяных экосистемах затрудняется высокой скоростью возобновления растительного покрова в весенний и выпадением снега в осенний период. Поэтому были использованы все безоблачные данные свободного доступа со спутников Landsat 5, 7, 8 (475, 328 и 189 шт. соответственно) за период с 1984 по 2020 гг. (сайт Earth Explorer <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Обработка данных ДЗЗ проводилась методом экспертного дешифрирования в программе ArcGIS 10.5. Для компенсации возможных ошибок дешифрирования из площадей весенних пожаров текущего года удалялись территории, пройденные пожарами осенью предыдущего.

В пределах ключевой территории были изучены донные отложения р. Симми (Болоньский государственный природный заповедник) в нижнем течении, оз. Килтасин (озеро-видное расширение русла р. Симми) и протоки Ерсуйн, соединяющей его с оз. Болонь. Отбор проб (15 образцов, по стандартным методикам) был проведен в мае 2018 года (на третий год после осеннего пожара 2016 г.) и в июле 2019 г. после весеннего (март–апрель) пожара. Известно, что наибольшее содержание биогенных элементов в почве и речных водах наблюдается в первые 3–4 месяца после пожара. Через 2–4 года их содержание падает и приближается к фоновым значениям [27]. Данные 2018 г. [28] соответствуют остаточному влиянию обширного осеннего пожара 2016 г.,

которым было пройдено 80 % территории заповедника. Пожар 2019 г. был менее интенсивным и затронул главным образом правобережье р. Симми.

При отборе использовали стандартное оборудование и методики. Основные методы исследования – сканирующая электронная микроскопия (СЭМ-анализ), валовой химический (РФА) и гранулометрический анализы – были дополнены стандартными физико-химическими методами анализа. Гранулометрический состав определяли методами седиментации по Качинскому и лазерной дифракции на анализаторе размера частиц (SALD-2300, Shimadzu, Japan). Валовой состав определяли рентгенофлуоресцентным методом (Pioneer S4, Bruker AXS, Germany). СЭМ-анализ был проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH (TESCAN, Czech Republic). Элементный состав наиболее репрезентативных участков образцов был проанализирован с использованием X-мак 80 энергодисперсионного спектрометра (Oxford Instruments, UK). РФА анализы проводились в аналитическом центре ИТИГ ДВО РАН, Хабаровск.

Результаты и обсуждения

В результате обработки данных ДЗЗ за 1984–2020 гг. в пределах Среднеамурской низменности были выделены территории, пройденные пожарами в весенний и осенний периоды (рис. 2). В этом временном ряду среднеегодовое воздействие составило 25,4 %. Минимальные масштабы пирогенного воздействия наблюдались в 1984, 1994, 2010 годах, когда пожарами было охвачено 5,7, 5,3 и 2,8 % территории соответственно. В самые неблагоприятные годы (1996, 2005) этот показатель превышал 50 %. Суммарная площадь пожаров за этот период составила более 38 млн. га или 938 % от площади территории – значительные площади территорий подвергались воздействию огня многократно.

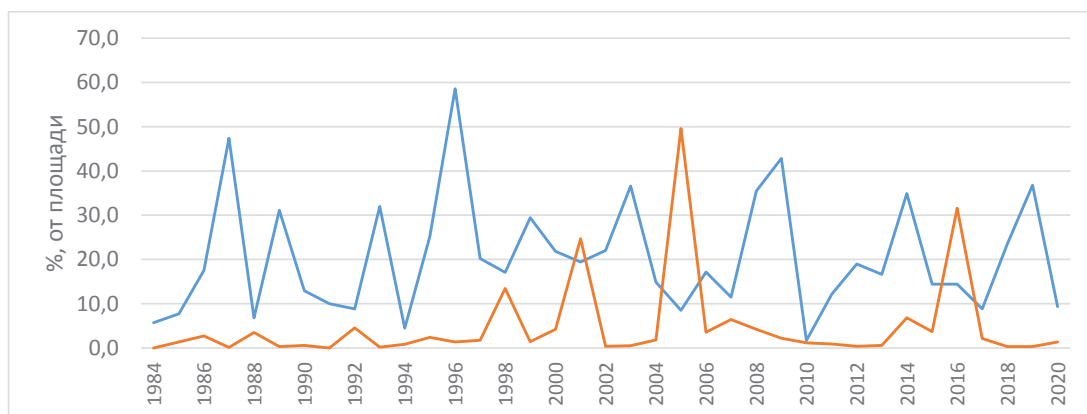


Рис. 2. Площади весенних (синяя линия) и осенних (красная линия) пожаров на территории Среднеамурской низменности в 1984 – 2020 годах

По многолетним статистическим данным на юге Российского Дальнего Востока самая высокая горимость природных экосистем наблюдается в весенний период [29]. В это время возникает примерно половина всех возгораний лесов (49,2 %). В летний период отмечено 36,9 % от общего числа пожаров, которые обычно связаны с длительными засухами, а осенью – не более 13,5 % [30].

Цикл луговых пожаров в среднем составляет 2–4 года, что связано с накоплением горючего материала в природных экосистемах (главным образом, ветоши трав) [31]. Среднее количество пожаров за 37-летний период на исследуемой территории не превышает 4–10, однако для отдельных участков территории повторяемость пожаров составила 36 раз (рис. 3). Это, прежде всего, наиболее освоенные земли городских и сельских поселений с хорошо развитой транспортной инфраструктурой и сельскохозяйственные земли (юго-западная и южная части Среднеамурской низменности), а также участки, прилегающие к железнодорожным и крупным автомобильным магистралям.

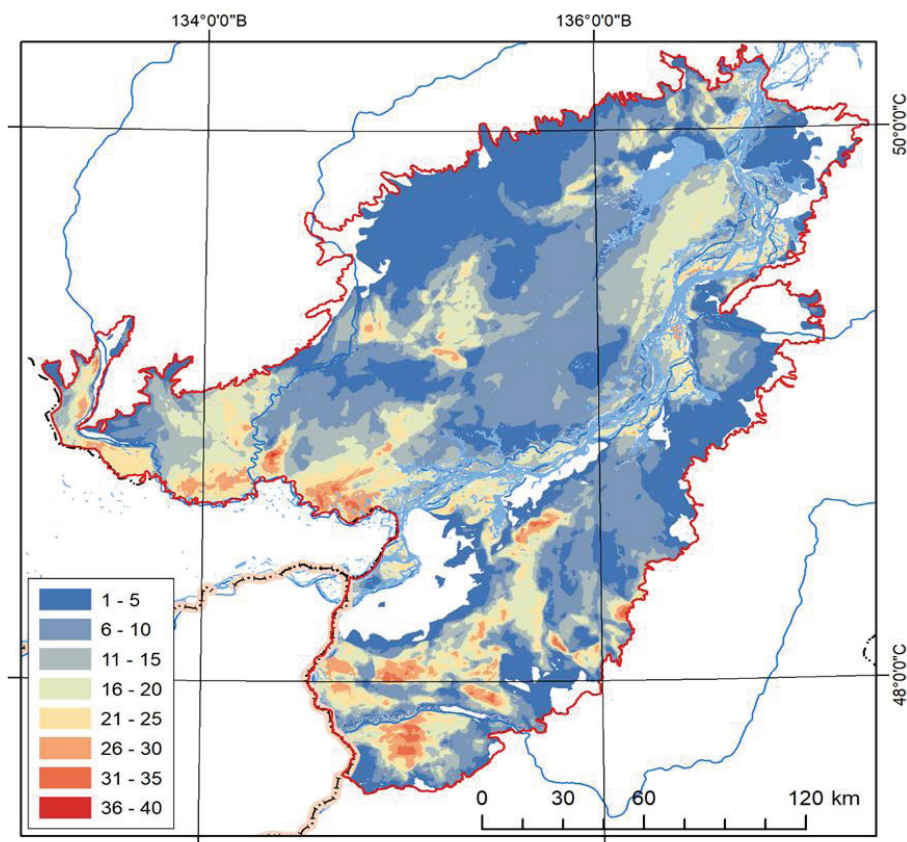


Рис. 3. Повторяемость пожаров за период с 1984 по 2020 годы

Для проверки достоверности картографических материалов, полученные результаты сравнивались с данными Глобальных ежегодного картирования сгоревших лесных площадей (GABAM) 30 метрового разрешения [25] и данными о количестве горячих точек VIIRS с сайта Fire Information for Resource Management System (FIRMS) [32] за 2012, 2016, 2018, 2020 гг.

Рис. 4 свидетельствует о значительной недооценке площади пожаров на исследуемой территории как по материалам картирования гарей в автоматическом режиме на основе данных Landsat-8 (GABAM), так и на основе детектирования HS (VIIRS), что отмечалось ранее для других территорий [11, 33-34]. Однако наши результаты близки к данным, полученным в результате экспертного дешифрирования материалов среднего и высокого пространственного разрешения (Sentinel-2) [35]. Так, площадь гарей весной 2020 г. по нашим данным составила 349,5 тыс. га, а по данным Гринпис – 354,5 тыс. га. Небольшая разница объясняется недоучетом сельскохозяйственных палов.

Причинами недооценки площадей пожаров могут стать многие факторы: задымление территории и поглощение CO₂ в атмосфере; малый запас биомассы и соответственно низкая интенсивность пожара; относительно малый размер пожара и/или его прохождение узкой длинной полосой в совокупности с высокой скоростью движения кромки огня при низком пространственном разрешении спутниковых приборов, используемых для детектирования действующих пожаров; быстрое возобновление и рост травянистой растительности в весенний период в сочетании с большим интервалом съёмки снижает излучение в ИК-канале и затрудняет автоматическую классификацию гарей; неоднородность наземного покрова, которая усложняет выбор соответствующей фоновой температуры.

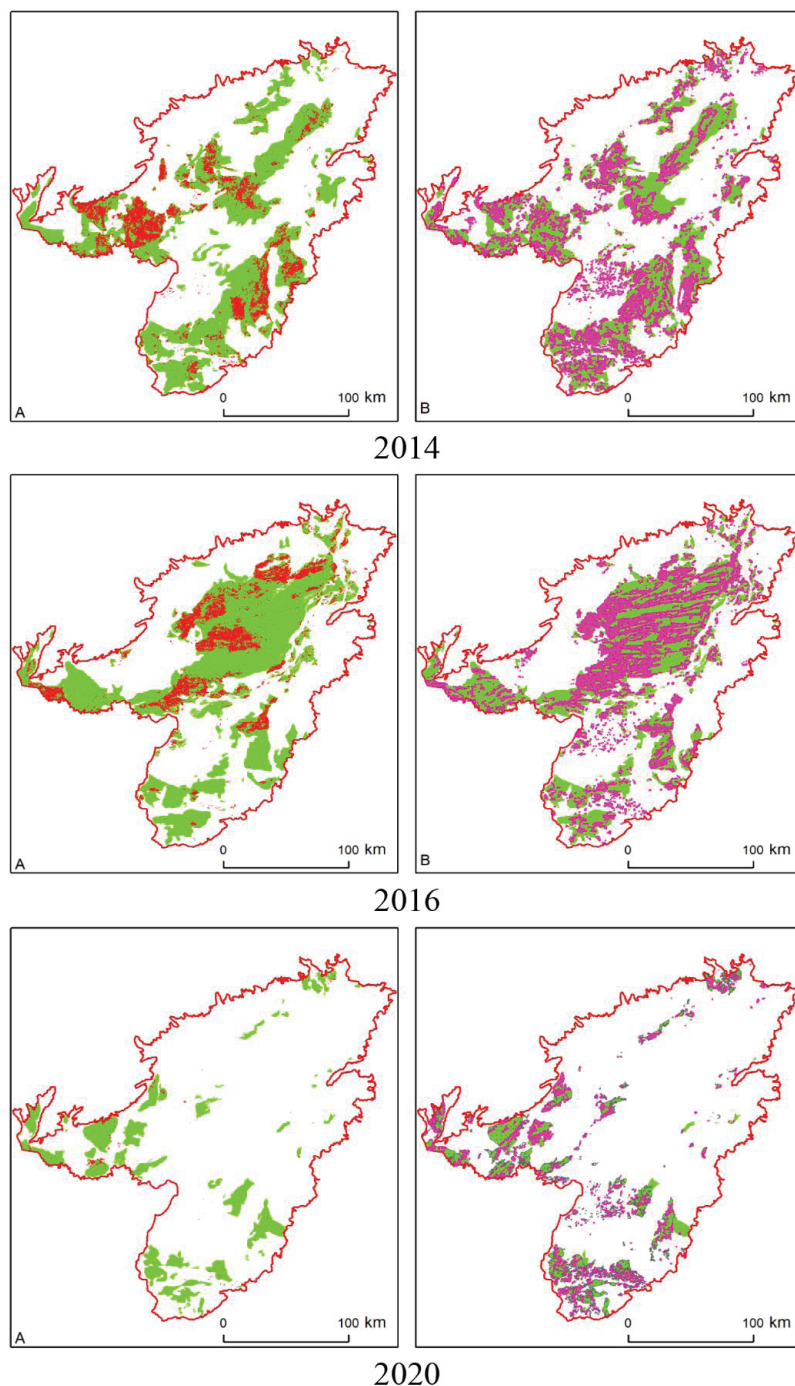


Рис. 4. Площади гарей в 2014, 2016, 2020 годах по разным данным (зелёный – наши материалы, красный – GABAM [26], розовый – VIIRS [32], серый – Greenpeace [35])

Анализ пространственного распределения пожаров в пределах исследуемой территории свидетельствует о совпадении участков высокой повторяемости пожаров с положением освоенных земель и объектов транспортной инфраструктуры. Кроме сельскохозяйственного землепользования причинами пожаров являются охота, рыбалка и заготовка дикоросов, с которыми связана высокая повторяемость пожаров вдоль рек и озёр, выполняющих роль транспортных артерий в северной и центральной части равнины. Всё это свидетельствует об антропогенном

характере основной части природных пожаров, что не противоречит данным официальной статистики [36] и подтверждается полевыми исследованиями [29].

Таким образом, анализ полученных нами данных ДЗЗ за многолетний период (1984–2020 гг.) свидетельствует о значительных масштабах и высокой повторяемости пирогенного воздействия на геосистемы территории Хабаровского края, прилегающие главным образом к зонам основного расселения и землепользования. Результаты работы показывают значительное занижение площадей луговых пожаров по данным официальной статистики. По среднемноголетним данным ДЗЗ в пределах Среднеамурской низменности пожарами затронуто от 27 до 35 % нелесных экосистем, а в отдельные годы площади пожаров превышают 50 % от площади территории, что сопоставимо с площадями лесных пожаров в Хабаровском крае в целом. При этом по официальным данным на нелесные пожары в крае приходится лишь 8,9 %.

Для исследуемой территории значительное влияние луговые пожары оказывают не только на наземные экосистемы, но и на водные объекты. Полученные нами данные для ключевого участка (бассейн р. Симми, малый приток Амура) свидетельствуют, что прохождение луговых пожаров на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава донных отложений, формирующихся в постпирогенный период.

В качестве основного маркера “пожарной нагрузки” на состав донных отложений мы использовали содержание в них фосфора по следующим причинам. Во-первых, фосфор является одним из важнейших макроэлементов (С, N и P) огневой минерализации. Во-вторых, основная масса углерода в виде CO_2 и пылевых аэрозолей попадает в воздушную среду [37], обогащение азотом в виде растворимых солей, как правило, связано с водой средой [38]. В то время как фосфор уже в первые месяцы после пожаров в виде нерастворимых фосфатов железа и кальция аккумулируется в донных отложениях [39–40]. И в-третьих, луговые ценозы сравнению лесными и кустарниковыми характеризуются большим содержанием фосфора по [41].

Согласно данным полученным ранее [42–43], донные отложения р. Симми характеризуются существенно более высоким содержанием валового железа по сравнению с кальцием. Так, если содержание кальция в образцах не превышало 1 % (в пересчете на CaO), то содержание валового Fe много выше – до 6 % в пересчете на Fe_2O_3 . Электронно-микроскопический анализ отложений показал, что повышенное содержание железа связано не только с кластогенными зернами акцессорных минералов, содержащими железо, таких как ильменит и др., но и с глинисто-железистыми микроагрегатами. Хорошо известно, что в водных объектах оксиды/гидроксиды Fe(III) играют важную роль в связывании и осаждении фосфат-ионов. Поскольку фосфаты Fe(III) подвержены микробному и химическому восстановлению и служат источником для Fe^{2+} и ортофосфата, они могут выступать в качестве прекурсора фазы вивианита. Кроме того, присутствие органических веществ (до 2,3 % С) позволяет предполагать образование в отложениях вивианита $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Новообразование вивианита в отложениях были диагностированы после весеннего пожара (март–апрель 2019 г.) в период максимального поступления в речные воды фосфат-ионов (первые месяцы после пожара), когда содержание фосфора в донных отложениях достигало 2200 мг/кг (в пересчете на P_2O_5). Образование вивианита было зафиксировано во всех точках отбора в составе глинисто-железистых микроагрегатов размером до 100 мкм. Согласно ЭДС анализу атомное соотношение Fe:P в вивианит-глинистых микроагрегатах составляет 3:2. Несколько меньшее количество глинистых микроагрегатов с участием вивианита для части образцов было связано с присутствием сульфат-ионов и сульфат-восстанавливающих бактерий, и образованием менее растворимого, чем вивианит фрамбоидного пирита FeS_2 . Доля вивианитовой фазы (количество глинистых микроагрегатов с участием вивианита) в отложениях значительно уменьшалось в местах отбора проб с более высокими скоростями потока. Образование вивианита было отмечено и для отдельных биологических темплатов (органические остатки, одноклеточные микроорганизмы), но с большим соотношением Fe:P до 10:1. Отметим, что фосфаты кальция в донных отложениях встречаются лишь в виде отдельных выветрелых зерен апатита.

Обнаружение вивианита в поверхностном слое отложений свидетельствует о недавнем его образовании. Обычно технические проблемы затрудняют прямую идентификацию вивианита в донных отложениях, для его определения используют различные методы мацерации, тяжелые

жидкости в том числе [39]. В нашем случае определение проводилось без специальной подготовки образцов. Поэтому с большой долей вероятности триггером образования вивианита в донных отложениях следует считать повышенные содержания в речной воде фосфат-ионов, поступающих с территории водосбора в результате пожаров.

На третий год после интенсивного пожара 2016 г., когда огнем было пройдено почти 80 % ключевого участка, вивианит в отложениях обнаружен не был. Поскольку растворимость вивианита крайне мала, причиной последнего следует считать подвижность новообразований в водном потоке вследствие их малого размера (менее 100 мкм). Во взвешенном состоянии частицы размером менее 100 мкм могут переноситься на большие расстояния, это транзитная составляющая речных наносов.

Заключение

В ходе работы на основе многолетних рядов данных ДЗЗ были выделены площади ландшафтных пожаров за период с 1984 по 2020 год. Анализ полученных данных говорит о значительных масштабах и высокой повторяемости пирогенного воздействия на геосистемы территории, прежде всего, прилегающих к зонам основного расселения и землепользования. Результаты работы показывают значительное занижение площадей луговых пожаров по данным официальной статистики. По среднесуточным данным ДЗЗ в пределах Среднеамурской низменности пожарами затронуто от 27 до 35 % нелесных экосистем, а в отдельные годы площади пожаров превышают 50 % от площади территории, что сопоставимо с площадями лесных пожаров в Хабаровском крае в целом. При этом по официальным данным на нелесные пожары в крае приходится лишь 8,9 %. Недооценка влияния луговых пожаров связана, по нашему мнению, в первую очередь с несовершенством методов автоматического картирования гарей, приводящих к занижению их площадей.

Исследования показали, что значительное влияние ландшафтные пожары оказывают не только на наземные экосистемы, но и на водные объекты. Полученные нами данные для ключевого участка (бассейн р. Симми, малый приток Амура) свидетельствуют, что прохождение луговых пожаров на водосборной территории влечет за собой изменение химического состава донных отложений, формирующихся в постпирогенный период. В первые месяцы после пожара года реакцией речной системы является секвестирование растворимых соединений Р, которые образуются в результате «огневой» минерализации. Это происходит в результате связывания фосфат-ионов в вивианит, растворимость которого чрезвычайно мала в отсутствие сульфатов и сульфат-редуцирующих бактерий. Вивианит образуется на поверхности глинистых микроагрегатов взвешенной фракции наносов, которая со временем (2–3 года) удаляется потоком, что приводит к снижению масштабов воздействия пожара.

Работа проводилась при поддержке научного проекта Российского Фонда Фундаментальных Исследований № 19-55-80022 «Влияние урбанизации и наводнений на химическое загрязнение крупных речных бассейнов (на примере Амура)».

Литература

1. Canadell J.G., Pataki D.E., Pitelka L.F. (Eds.). Terrestrial ecosystems in a changing world. – Springer Science & Business Media, 2007.
2. Zhou Y., Xing X., Lang J., Chen D., Cheng S., Wei L., Wei X., Liu C. A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China // Atmos. Chem. Phys. – 2017. – vol. 17. – P. 2839–2864. doi: 10.5194/acp-17-2839-2017.
3. Huang X., Li M., Li J., Song Y. A high-resolution emission inventory of crop burning in fields in China based on MODIS thermal anomalies/fire products // Atmos. Environ. – 2012. – 50. – P. 9–15. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.017.
4. Burling I.R., Yokelson R.J., Akagi S.K., Urbanski S., Wold C., Griffith D.W.T., Johnson T.J., Reardon J., Weise D.R. Airborne and ground-based measurements of the trace gases and particles emitted by prescribed fires in the United States // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – vol. 11. – P. 12197–12216.
5. Sun L., Hu H., Guo Q., L X. Estimating carbon emissions from forest fires during 1980 to 1999 in Daxing'an Mountain, China // Afr. J. Biotech. – 2011. – vol. 10, iss. 41. – P. 8046–8053.

6. Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2010. – vol. 46, iss. 3. – P. 281–293.
7. Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G., Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. For. Res.* – 2012. – vol. 43, iss. 5. – P. 493–506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.
8. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. Influence of ground and peat fires on CO₂ emissions into the atmosphere // *Dokl. Earth Sc.* – 2014. – vol. 459. – P. 1565–1569. doi: 10.1134/S1028334X14120034.
9. Ribeiro K., Pacheco F.S., Ferreira J.W., de Sousa-Neto E.R., Hastie A., Krieger F.G.C., Alvalá P.C., Forti M.C., Ometto J.P. Tropical peatlands and their contribution to the global carbon cycle and climate change // *Glob. Chang. Biol.* – 2021. – vol. 27, iss. 3. – P. 489–505. doi: 10.1111/gcb.15408.
10. Korontzi S., McCarty J., Justice C. Monitoring agricultural burning in the Mississippi River valley region from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2008. – vol. 58, iss. 9. – P. 1235–1239. doi: 10.3155/1047-3289.58.9.1235.
11. McCarty J., Krylov A., Prishchepov A., Banach D., Tyukavina A., Potapov P., Turubanova S. Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012 // Gutman, G., Radeloff, V. (Eds.), *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. – Springer International Publishing, Switzerland, 2017. – P. 193–221. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
12. Gutman G., Radeloff V. Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991 // Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9.
13. Li J., Li Y., Bo Y., Xie S., 2016. High-resolution historical emission inventories of crop residue burning in fields in China for the period 1990–2013 // *Atmos. Environ.* – 2016. – vol. 138. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.002.
14. Барталев С.А. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2012. – том 9, № 2. – С. 9-26.
15. Romanenkov V., Rukhovich D., Koroleva P., McCarty J. Estimating black carbon emissions from agricultural burning, in: Mueller, L., Saporov, A., Lischeid, G. (Eds.). *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia* // *Environmental Science and Engineering*, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-01017-5_20.
16. Tan Z., Tieszen L.L., Zhu Z., Liu S., Howard S.M. An estimate of carbon emissions from 2004 wildfires across Alaskan Yukon River Basin // *Carbon Balance Manag.* – 2007. – vol. 2, iss. 12. doi: 10.1186/1750-0680-2-12.
17. Kusangaya S., Sithole V.B., 2015. Remote sensing-based fire frequency mapping in a savannah rangeland // *S. Afr. J. Geomat.* – 2015. – vol. 4, iss. 1.
18. Ostroukhov A.V., Klimina E.M. Survey of Middle Amur lowland terrain transformations based on remote sensing data. Proceedings of joint symposium on tropical peatland restoration 2018 // *Responsible Management of Tropical Peatland following up to The Jakarta Declaration Jakarta, February 2018*. – IKAPI, Bogor, Indonesia, 2018. – P. 123–129.
19. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Блок мониторинга пожарной опасности // (режим доступа: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml) дата обращения: 09.02.2021.
20. Minshall G.W., Robinson C.T., Royer T.V. Stream Ecosystem Responses to the 1988 Wildfires // *Yellowstone Science. Summer*. – 1998. – P. 15-22.
21. Украинцев А.В., Воздействие лесных пожаров на состояние рек Заиграевского района Республики Бурятия / А.В. Украинцев, А.М. Плюсин, М.К. Чернявский // *Водные ресурсы*. – 2019. – том 46, № 1. – С. 14-23. doi: 10.31857/S0321-059646114-23.
22. Bayley S.E., Schindler D.W., Beaty K.G. Effects of multiple fires on nutrient yields from streams draining boreal forest and fen watersheds: nitrogen and phosphorus // *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences*. – 1992. – vol. 29. – P. 584-596.

23. Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardès R.D., Wang Y., Hu J. Fire detection and fire radiative power in forests and low-biomass lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12 (18), iss. 2870. doi: 10.3390/rs12182870.
24. Salvoldi M., Siaki G., Sprintsin M., Karnieli A. Burned area mapping using multi-temporal Sentinel-2 data by applying the relative differenced aerosol-free vegetation index (RdAFRI) // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12, 17, iss. 2753. doi: 10.3390/rs12172753.
25. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang G., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 489.
26. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I. Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // *Intern. J. Remote Sens.* – 2007. – vol. 28, iss. 6. – P. 1397–1404. doi: 10.1080/01431160600840978.
27. Шешуков М.А., Савченко А.П., Пешков В.В. Лесные пожары и борьба с ними на севере Дальнего Востока. – Хабаровск: Кн. изд-во, 1992. – 96 с.
28. Kharitonova G.V., Shein E.V., Krutikova V.O., Ostrouhov A.V., Kharitonov E.V. (2019) Secondary carbonates in edaphic components of ecosystems // *Soil Physics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 368. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1755-1315/368/1/012020.
29. Sheingauz A. 1996. The role of fire in forest cover, structure, and dynamics in the Russian Far East // Goldammer I.G., Furyaev V.V. (Eds.) *Fire in ecosystems of Boreal Eurasia*, 1996. – P. 186–190.
30. Леса Дальнего Востока. – М.: Лесная промышленность, 1969. – 392 с.
31. Argañaraz J., Gavier-Pizarro G., Zak M., Bellis L. Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina // *Fire Ecol.* – 2015. – vol. iss. 11. – P. 55–73. doi: 10.4996/fireecology.1101055.
32. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) (режим доступа: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>) дата обращения: 09.02.2021.
33. García-Lázaro J.R., Moreno-Ruiz J.A., Riaño D., Arbelo M. Estimation of burned area in the northeastern Siberian boreal forest from a Long-Term Data Record (LTDR) 1982–2015 time series // *Remote Sensing.* – 2018. – vol. 10, iss. 6. – P. 940. doi: 10.3390/rs10060940.
34. Ying L., Shen Z., Yang M., Piao S. Wildfire detection probability of MODIS fire products under the constraint of environmental factors: A study based on confirmed ground wildfire records // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 24. – P. 3031. doi: 10.3390/rs11243031.
35. Карта природных пожаров России в 2020 году. 2021. Greenpeace, (режим доступа: <https://greenpeace.ru/news/2021/04/06/greenpeace-podschital-ploshhad-vseh-landshaftnyh-pozharov-v-rossii-v-2020-godu/>) дата обращения: 09.02.2021.
36. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Хабаровского края за 2019 год. 2020. (режим доступа: <https://mpr.khabkrai.ru/?menu=getfile&id=8149>) дата обращения: 20.05.2021.
37. Urbanski S.P., Wei Min Hao, Stephen B. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions // *Developments in Environmental Science*. Bytnerowicz A., Arbaugh M., Riebau A., Andersen C. (Eds), 2009. – vol. 8. – P. 79–107. doi: 10.1016/S1474-8177(08)00004-1.
38. Nunes J.P., Doerr S.H., Sheridan G., Neris J., Santín C., Emelko M.B., Silins U., Robichaud P.R., Elliot W.J., Keizer J. Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress // *Hydrological Processes.* – 2018. – vol. 32(5). – P. 687–694. doi: 10.1002/hyp.11434.
39. Rothe M., Frederichs T., Eder M., Kleeberg A., Hupfer M.: Evidence for vivianite formation and its contribution to long-term phosphorus retention in a recent lake sediment: a novel analytical approach // *Biogeosciences.* – 2014. – vol. 11. – P. 5169–5180. doi: 10.5194/bg-11-5169-2014.
40. Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // *Earth-Science Reviews.* – 2016. – vol. 158. – P. 51–64. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.04.008.
41. Zhiyao Tang, Wenting Xu, Guoyi Zhou, Yongfei Bai, Jiaxiang Li, Xuli Tang, Dima Chen, Qing Liu, Wenhong Ma, Gaoming Xiong, Honglin He, Nianpeng He, Yanpei Guo, Qiang Guo, Jiangling Zhu, Wenxuan Han, Huifeng Hu, Jingyun Fang, Zongqiang Xie Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems // *PNAS.* – 2018. – vol. 115(16). – P. 4033–4038. doi:10.1073/pnas.1700295114.

42. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Labile Components of Bottom Sediments in the Simmi River (Bolon State Nature) // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2020. – vol. 75 (4-5). – P. 168-175. doi: 10.3103/S0147687420040043.

43. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Impact of fires on eutrophication in rivers (the Simmy River, the Bolon Nature Reserve) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/895/1/012014.

References

1. Canadell J.G., Pataki D.E., Pitelka L.F. (Eds.). *Terrestrial ecosystems in a changing world*. – Springer Science & Business Media, 2007.
2. Zhou Y., Xing X., Lang J., Chen D., Cheng S., Wei L., Wei X., Liu C. A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China // *Atmos. Chem. Phys.* – 2017. – vol. 17. – P. 2839–2864. doi: 10.5194/acp-17-2839-2017.
3. Huang X., Li M., Li J., Song Y. A high-resolution emission inventory of crop burning in fields in China based on MODIS thermal anomalies/fire products // *Atmos. Environ.* – 2012. – 50. – P. 9–15. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.017.
4. Burling I.R., Yokelson R.J., Akagi S.K., Urbanski S., Wold C., Griffith D.W.T., Johnson T.J., Reardon J., Weise D.R. Airborne and ground-based measurements of the trace gases and particles emitted by prescribed fires in the United States // *Atmos. Chem. Phys.* – 2011. – vol. 11. – P. 12197–12216.
5. Sun L., Hu H., Guo Q., L.X. Estimating carbon emissions from forest fires during 1980 to 1999 in Daxing'an Mountain, China // *Afr. J. Biotech.* – 2011. – vol. 10, iss. 41. – P. 8046–8053.
6. Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V. Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in Northern Eurasia for air quality assessment and climate modeling // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2010. – vol. 46, iss. 3. – P. 281–293.
7. Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G., Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Can. J. For. Res.* – 2012. – vol. 43, iss. 5. – P. 493–506. doi: 10.1139/cjfr-2012-0367.
8. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. Influence of ground and peat fires on CO₂ emissions into the atmosphere // *Dokl. Earth Sc.* – 2014. – vol. 459. – P. 1565–1569. doi: 10.1134/S1028334X14120034.
9. Ribeiro K., Pacheco F.S., Ferreira J.W., de Sousa-Neto E.R., Hastie A., Krieger F.G.C., Alvalá P.C., Forti M.C., Ometto J.P. Tropical peatlands and their contribution to the global carbon cycle and climate change // *Glob. Chang. Biol.* – 2021. – vol. 27, iss. 3. – P. 489–505. doi: 10.1111/gcb.15408.
10. Korontzi S., McCarty J., Justice C. Monitoring agricultural burning in the Mississippi River valley region from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2008. – vol. 58, iss. 9. – P. 1235–1239. doi: 10.3155/1047-3289.58.9.1235.
11. McCarty J., Krylov A., Prishchepov A., Banach D., Tyukavina A., Potapov P., Turubanova S. Agricultural fires in European Russia, Belarus, and Lithuania and their impact on air quality, 2002–2012 // Gutman, G., Radeloff, V. (Eds.), *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. – Springer International Publishing, Switzerland, 2017. – P. 193–221. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9_9.
12. Gutman G., Radeloff V. *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991* // Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-42638-9.
13. Li J., Li Y., Bo Y., Xie S., 2016. High-resolution historical emission inventories of crop residue burning in fields in China for the period 1990–2013 // *Atmos. Environ.* – 2016. – vol. 138. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.002.
14. Bartalev S.A. Ocenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyh dannyh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ / S.A. Bartalev, V.A. Egorov, V.YU. Efremov, E.A. Lupyan, F.V. Styckenko, E.V. Flitman // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. – 2012. – tom 9, № 2. – S. 9-26.
15. Romanenkov V., Rukhovich D., Koroleva P., McCarty J. Estimating black carbon emissions from agricultural burning, in: Mueller, L., Saporov, A., Lischeid, G. (Eds.). *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia* // *Environmental Science and Engineering*, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-01017-5_20.

16. Tan Z., Tieszen L.L., Zhu Z., Liu S., Howard S.M. An estimate of carbon emissions from 2004 wildfires across Alaskan Yukon River Basin // *Carbon Balance Manag.* – 2007. – vol. 2, iss. 12. doi: 10.1186/1750-0680-2-12.
17. Kusangaya S., Sithole V.B., 2015. Remote sensing-based fire frequency mapping in a savannah rangeland // *S. Afr. J. Geomat.* – 2015. – vol. 4, iss. 1.
18. Ostroukhov A.V., Klimina E.M. Survey of Middle Amur lowland terrain transformations based on remote sensing data. Proceedings of joint symposium on tropical peatland restoration 2018 // *Responsible Management of Tropical Peatland following up to The Jakarta Declaration* Jakarta, February 2018. – IKAPI, Bogor, Indonesia, 2018. – P. 123–129.
19. Informacionnaya sistema distancionnogo monitoringa Federal'nogo agentstva lesnogo hozyajstva. Blok monitoringa pozharnoj opasnosti // (rezhim dostupa: https://nffc.aviales.ru/main_pages/index.shtml) data obrashcheniya: 09.02.2021.
20. Minshall G.W., Robinson C.T., Royer T.V. Stream Ecosystem Responses to the 1988 Wildfires // *Yellowstone Science*. Simmer. – 1998. – R. 15-22.
21. Ukrainev A.V., Vozdejstvie lesnyh pozharov na sostoyanie rek Zairaevskogo rajona Respubliki Buryatii / A.V. Ukrainev, A.M. Plyusnin, M.K. Chernyavskij // *Vodnye resursy.* – 2019. – tom 46, № 1. – S. 14-23. doi: 10.31857/S0321-059646114-23.
22. Bayley S.E., Schindler D.W., Beaty K.G. Effects of multiple fires on nutrient yields from streams draining boreal forest and fen watersheds: nitrogen and phosphorus // *Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences.* – 1992. – vol. 29. – R. 584-596.
23. Fu Y., Li R., Wang X., Bergeron Y., Valeria O., Chavardès R.D., Wang Y., Hu J. Fire detection and fire radiative power in forests and low-biomass lands in Northeast Asia: MODIS versus VIIRS Fire Products // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12 (18), iss. 2870. doi: 10.3390/rs12182870.
24. Salvoldi M., Siaki G., Sprintsin M., Karnieli A. Burned area mapping using multi-temporal Sentinel-2 data by applying the relative differenced aerosol-free vegetation index (RdAFRI) // *Remote Sens.* – 2020. – vol. 12, 17, iss. 2753. doi: 10.3390/rs12172753.
25. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Zhang X., Wang G., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 489.
26. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I. Multiyear circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // *Intern. J. Remote Sens.* – 2007. – vol. 28, iss. 6. – P. 1397–1404. doi: 10.1080/01431160600840978.
27. SHeshukov M.A., Savchenko A.P., Peshkov V.V. Lesnye pozhary i bor'ba s nimi na severe Dal'nego Vostoka. – Habarovsk: Kn. izd-vo, 1992. – 96 s.
28. Kharitonova G.V., Shein E.V., Krutikova V.O., Ostrouhov A.V., Kharitonov E.V. (2019) Secondary carbonates in edaphic components of ecosystems // *Soil Physics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 368. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1755-1315/368/1/012020.
29. Sheingauz A. 1996. The role of fire in forest cover, structure, and dynamics in the Russian Far East // Goldammer I.G., Furyaev V.V. (Eds.) *Fire in ecosystems of Boreal Eurasia*, 1996. – P. 186–190.
30. Lesa Dal'nego Vostoka. – M.: Lesnaya promyshlennost', 1969. – 392 s.
31. Argañaraz J., Gavier-Pizarro G., Zak M., Bellis L. Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina // *Fire Ecol.* – 2015. – vol. iss. 11. – P. 55–73. doi: 10.4996/fireecology.1101055.
32. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) (rezhim dostupa: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>) data obrashcheniya: 09.02.2021.
33. García-Lázaro J.R., Moreno-Ruiz J.A., Riaño D., Arbelo M. Estimation of burned area in the northeastern Siberian boreal forest from a Long-Term Data Record (LTDR) 1982–2015 time series // *Remote Sensing.* – 2018. – vol. 10, iss. 6. – P. 940. doi: 10.3390/rs10060940.
34. Ying L., Shen Z., Yang M., Piao S. Wildfire detection probability of MODIS fire products under the constraint of environmental factors: A study based on confirmed ground wildfire records // *Remote Sens.* – 2019. – vol. 11, iss. 24. – P. 3031. doi: 10.3390/rs11243031.
35. Karta prirodnih pozharov Rossii v 2020 godu. 2021. Greenpeace, (rezhim dostupa: <https://greenpeace.ru/news/2021/04/06/greenpeace-podschital-ploshhad-vseh-landshaftnyh-pozharov-v-rossii-v-2020-godu/>) data obrashcheniya: 09.02.2021.

36. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Habarovskogo kraya za 2019 god. 2020. (rezhim dostupa: <https://mpr.khabkrai.ru/?menu=getfile&id=8149>) data obrashcheniya: 20.05.2021.
37. Urbanski S.P., Wei Min Hao, Stephen B. Chemical Composition of Wildland Fire Emissions // *Developments in Environmental Science*. Bytnerowicz A., Arbaugh M., Riebau A., Andersen C. (Eds), 2009. – vol. 8. – P. 79–107. doi: 10.1016/S1474-8177(08)00004-1.
38. Nunes J.P., Doerr S.H., Sheridan G., Neris J., Santín C., Emelko M.B., Silins U., Robichaud P.R., Elliot W.J., Keizer J. Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress // *Hydrological Processes*. – 2018. – vol. 32(5). – P. 687–694. doi: 10.1002/hyp.11434.
39. Rothe M., Frederichs T., Eder M., Kleeberg A., Hupfer M.: Evidence for vivianite formation and its contribution to long-term phosphorus retention in a recent lake sediment: a novel analytical approach // *Biogeosciences*. – 2014. – vol. 11. – P. 5169–5180. doi: 10.5194/bg-11-5169-2014.
40. Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // *Earth-Science Reviews*. – 2016. – vol. 158. – P. 51–64. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.04.008.
41. Zhiyao Tang, Wenting Xu, Guoyi Zhou, Yongfei Bai, Jiaxiang Li, Xuli Tang, Dima Chen, Qing Liu, Wenhong Ma, Gaoming Xiong, Honglin He, Nianpeng He, Yanpei Guo, Qiang Guo, Jiangling Zhu, Wenxuan Han, Huifeng Hu, Jingyun Fang, Zongqiang Xie Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems // *PNAS*. – 2018. – vol. 115(16). – P. 4033–4038. doi:10.1073/pnas.1700295114.
42. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Labile Components of Bottom Sediments in the Simmi River (Bolon State Nature) // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2020. – vol. 75 (4-5). – P. 168-175. doi: 10.3103/S0147687420040043.
43. Kharitonova G.V., Ostroukhov A.V., Tyugai Z.N., Kruticova V.O. Impact of fires on eutrophication in rivers (the Simmy River, the Bolon Nature Reserve) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021. doi: 10.1088/1755-1315/895/1/012014.