

ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 502.338:630*43+58.056+528.88

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ ЛЕСНЫХ ЗЕМЕЛЬ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. Б. З. Цыдыпов^а, *, Е. Ж. Гармаев^а, Б. О. Гомбоев^а, А. А. Аюржанаев^а, Б. В. Содномов^а,
С. Д. Пунцукова^а, С. Г. Андреев^а, М. А. Мотошкина^а

^аБайкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ, Россия

*e-mail: bz61@binm.ru

Поступила в редакцию 15.07.2021 г.

После доработки 10.09.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Определены особенности трансформации отдельных компонентов природной среды в районах юга Восточной Сибири (подробно проанализирована территория Бурятии) в условиях изменения климата, которые оказывают критическое влияние на экосистемные услуги лесных земель. Применена система последовательных и взаимодополняемых методов, позволяющая объективно провести анализ этого влияния и его оценку: методы дистанционного зондирования, картографирования, корреляционный анализ, методы выявления общей экономической ценности и “адаптации на основе экосистем”. Рассчитаны тренды температуры воздуха, количества осадков и нормированного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для влажного (1982–1999 гг.) и засушливого (2000–2018 гг.) периодов. Рост температуры, как наиболее критический параметр состояния лесных земель, наблюдается для всей территории исследования; при этом зоны с невысокими темпами роста приземной температуры перемежаются с зонами с высокими темпами роста, как в широтном, так и в долготном направлениях. Влажный период характеризуется положительными трендами суммы осадков практически для всей территории юга Восточной Сибири. В засушливый период наблюдается отрицательная динамика количества выпавших осадков для преобладающей части рассматриваемой территории. Влажный период отмечен почти повсеместным ростом NDVI. В засушливый период для лесной растительности характерна разнонаправленность трендов NDVI и осадков; здесь влияние на динамику NDVI оказывает температура. Указанные закономерности предопределяют и изменения в развитии экосистемных услуг лесных земель. Определено, что изменение климата негативно влияет на преобладающую часть экосистемных услуг лесных земель. Наибольшее негативное влияние за длительный период наблюдений (1936–2015 гг.) оказали лесные пожары, которые к концу указанного периода значительно возросли как по количеству, так и по площади распространения. Рассмотрен комплекс мер, способствующих адаптации управления лесными землями к изменению климата.

Ключевые слова: изменение климата, NDVI, тренды, экосистемные услуги, лесные пожары, адаптация, лесные земли юга Восточной Сибири

DOI: 10.31857/S2587556622010125

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При постановке проблемы применен следующий алгоритм: выявление изменения климата на рассматриваемой территории с выделением двух периодов (влажного и засушливого) > влияние данного изменения на лесные земли в районе исследований > выявление последствий указанного влияния > изучение деформации функций лесных земель вследствие выявленных последствий или изменения объемов экосистемных услуг леса > разработка мер по адаптации к выявленным последствиям.

При этом в пространственном аспекте применен “принцип матрешки”, когда изменение кли-

мата рассматривается на более обширной территории севера Центральной Азии для обнаружения значимых трендов приземной температуры воздуха и количества осадков, оказавших критическое влияние на состояние лесных земель. Само состояние лесных земель рассмотрено для территории Республики Бурятия в составе административных районов для более крупномасштабной оценки потерь лесного покрова по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). И, наконец, расчет экосистемных услуг леса осуществлен для российской части бассейна р. Селенги (БРС) как более детальный анализ оценки и тенденций развития указанных услуг в связи с изменением климата. Данный принцип также согласуется

с известным положением об “игре масштабами” Н.Н. Баранского, когда в рассматриваемом нами случае от общих положений изменения климата на обширной территории осуществляется переход к более детальным последствиям данного изменения на меньших территориях.

Изменение климата. Начиная со второй половины 1970-х годов наблюдается повышение темпов потепления глобального климата. Оно подтверждается многолетними данными станций сети Всемирной метеорологической организации и национальных сетей (Кокорин, 2014). В XX в. и в нынешнем столетии выделяются три интервала смены направлений изменения климата: потепление 1910–1945 гг., слабое похолодание 1946–1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1970-х годов по настоящее время (Гармаев и др., 2017). На рубеже 1980–90-х годов потепление произошло скачкообразно. Последние годы отмечены особенно высокими температурами воздуха (Обязов, 2015). В России изменения в сторону повышения температуры воздуха выражены сильнее, чем на планете в целом (Второй ..., 2014).

Следует отметить, что глобальное потепление климата в последние десятилетия имеет отчетливое проявление на территории северной части Центральной Азии, особенно в Забайкалье. Этому способствуют следующие факторы: 1) внутриконтинентальное расположение; 2) общая приподнятость территории над уровнем моря; 3) особенности атмосферной циркуляции (Antokhina et al., 2015). С 1885 по 2012 г. среднегодовая температура воздуха повысилась здесь на 2.0°C (Обязов, 2015), на планете в то же время она увеличилась на 0.85°C (Кокорин, 2014). Установлено, что с 70-х годов XX в. темпы потепления в Улан-Удэ выросли до $0.36^{\circ}\text{C}/10$ лет, в Новоселенгинске потепление происходит с темпом $0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в Кяхте – $0.16^{\circ}\text{C}/10$ лет (Гармаев и др., 2017). Длительные вариации количества осадков имеют выраженную цикличность (Андреев и др., 2016), при этом последняя засушливая фаза началась в 1999 г. (Обязов, Смахтин, 2012), которая является рекордной по продолжительности за весь период инструментальных наблюдений.

Лесные пожары. Глобальное потепление климата, более интенсивно проявляющееся в рассматриваемом регионе, оказывает негативное влияние на расположенные здесь лесные земли. Исследуемый регион характеризуется контрастностью природных процессов, где периодически повторяющиеся засухи и сопутствующие им лесные пожары чередуются с разрушительными кратковременными паводками, вызывающими катастрофические наводнения. По данным Росгидромета, за последние 15 лет число опасных гидрометеорологических явлений выросло в 2 раза. По одному из сценариев изменения климата,

основанному на модели общей циркуляции атмосферы, длительность пожароопасного сезона в среднем широтном поясе России может увеличиться на 50–60 дней, т.е. на 30–40%. Увеличение длительности опасных сезонов приведет к росту общего числа пожаров на 30–41% (Доклад ..., 2019).

Исследование причин и масштабов лесных нарушений на глобальном и региональном уровнях является важным направлением при выработке решений по устойчивому управлению лесными ресурсами. Составляя большую часть биомассы Земли, лес обеспечивает спектр функций от средообразующих и климаторегулирующих до рекреационных и сырьевых. В результате оценки глобального изменения лесного покрова в рамках проекта Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН выявлено уменьшение площади лесов на 3% с 1990 по 2015 г. (Global ..., 2015). Наибольшее снижение характерно для тропических лесов, незначительное колебание – для бореальных и субтропических лесов, а увеличение – для лесов умеренной зоны (Keenan et al., 2015). Очевидно, что оценки в разных регионах будут существенно отличаться друг от друга. Для территории Российской Федерации выявлен значительный разброс оценок площади леса и его потерь; при этом отмечается, что снижение лесопокрываемых площадей характерно для высоких широт и Забайкалья (Schepaschenko et al., 2015). Также существует проблема несоответствия статистических данных различных ведомств (Сидоров, Санжиева, 2018). Подобные глобальные, национальные и региональные оценки (в том числе субрегиональные) необходимы для решения ряда задач, связанных с защитой леса, моделированием углеродного цикла, определением ресурсного потенциала и др., и требуют привлечения разнообразных методов и средств, но ключевым источником среди них являются методы дистанционного зондирования.

Оценка динамики потерь леса по данным ДЗЗ. Важнейшей информацией, которая позволяет исследовать происходящие на поверхности Земли процессы, являются данные ДЗЗ. С их помощью решается обширный класс задач, связанных с оценкой изменения климата, мониторингом стихийных бедствий, изучением динамики геосистем и т.д. При этом исследование вариаций характеристик растительного покрова с помощью данных ДЗЗ приобретает особое значение на фоне происходящих климатических изменений (Медведева и др., 2011). Спутниковые данные применяются для решения целого ряда научных проблем, включая вопросы мониторинга и моделирования изменений лесного покрова под влиянием природных и антропогенных факторов. Современные подходы к изучению нарушенности лесного покрова в значительной степени основаны на долгосрочном мониторинге и простран-

ственно-временном анализе динамики лесного покрова (Барталев и др., 2010, 2012, 2014).

Одним из наиболее распространенных направлений дистанционной оценки площадей гарей и степени повреждения растительного покрова после пожаров является использование различных вегетационных индексов, полученных в результате обработки разновременных снимков среднего и низкого пространственного разрешения спутников *Landsat* и *MODIS*. Это объясняется наличием мультиспектральных каналов в видимой и инфракрасной зонах электромагнитного спектра, приемлемым уровнем пространственного разрешения для проведения тематического картографирования, большой архивной базой данных снимков, начиная с 1970-х годов.

Многочисленными исследованиями была выявлена тесная корреляционная связь между показателями степени повреждения полога леса и значениями индексов вегетации. Среди последних наиболее распространен нормированный разностный вегетационный индекс NDVI, основывающийся на поглощении и отражении растительностью электромагнитного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах соответственно. NDVI часто используется исследователями при работе как с единовременными, так и с разновременными (до и после пожара) изображениями (Барталев и др., 2010; Escuin et al., 2008). Значительно реже при оценке гарей применяются индекс гарей BAI (*Burn Area Index*) и почвенный вегетационный индекс SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*). В последние годы широкое применение находят композитный индекс гарей CBI (*Composite Burn Index*) и нормированный индекс гарей NBR (*Normalized Burn Ratio*) (Escuin et al., 2008; Kasischke et al., 2008; Loboda et al., 2007). Учеными Института космических исследований РАН предложена оценка степени повреждения лесов пожарами по разновременным спутниковым снимкам MODIS на основе коротковолнового вегетационного индекса SWVI (*Short-Wave Vegetation Index*) (Барталев и др. 2010; Стыценко и др., 2013).

В рамках наших исследований было предусмотрено проведение актуальной оценки динамики площади леса исследуемой территории по материалам ДЗЗ. Важность данной оценки обуславливается также и тем, что предыдущие оценки основывались лишь на статистических данных (Борисова, 2017; Доржиев и др., 2017; Сидоров, Санжиева, 2018), которые, однако, могут значительно расходиться с данными ДЗЗ (Содномов и др., 2020).

Экосистемные услуги. Глобальное изменение климата несет в себе как угрозы, так и новые возможности для развития различных территорий, а также необходимость разработки региональных мер по смягчению негативного влияния изменения климата и адаптации к последствиям клима-

тических изменений. В этих условиях актуальными становятся оценка и анализ объемов и динамики изменений в общей экономической ценности экосистемных услуг, включая возникающие риски. Эти риски выражаются в проявлении и частоте возникновения экстремальных природных и техногенных явлений – засух, лесных пожаров, наводнений, изменения состояния водных ресурсов и загрязнения воздуха. Оценка экосистемных услуг как ключевой части “зеленой” экономики активно разрабатывается и в России (Бобылев и др., 2012; Тишков, 2010; Экосистемные ..., 2016, 2020). При этом упор делается на расчет показателя скорректированных чистых накоплений, который учитывает потери природных благ в социально-экономическом развитии страны и ее субъектов. Предлагаемый нами подход позволяет расширить оценку причин изменения экосистемных услуг лесных земель исследуемого региона в контексте глобального и регионального потепления климата и следующего за этим возникновения условий ухудшения состояния лесных земель вследствие возникновения, главным образом, пожароопасных состояний рассматриваемой территории.

В статье представлены результаты оценки экосистемных услуг леса как важнейшей части природных ресурсов на российской части бассейна р. Селенги. Также представлен анализ динамики лесных пожаров на рассматриваемой территории как приоритетного экстремального природного явления, обусловленного природными и антропогенными факторами, частота и распространение которого являются одним из последствий глобального изменения климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследований. Районы юга Восточной Сибири подвержены потере лесопокрываемых территорий. В Республике Бурятия, входящей в состав региона, эти территории занимают около 85% площади. Лесной фонд республики постоянно изменяется, причем основную роль в этих изменениях играют лесные пожары (Государственный ..., 2018). Помимо пожаров на состояние лесов оказывает влияние целый ряд негативных антропогенных и природных факторов. Это, например, промышленные выбросы в атмосферу и, как следствие, ее загрязнение, вырубki, воздействие насекомых-вредителей, болезни деревьев и т.д., которые приводят к снижению продуктивности, нарушению устойчивости и уничтожению лесных массивов.

Преобладающими породами являются лиственница сибирская, сосна обыкновенная и сосна сибирская (кедр), которые образуют легкогоримые светлохвойные леса, что вкупе с весенней засухой (как и засушливым климатом в целом) приводит к регулярным пожарам (Евдокименко,

Иванов, 2017). Распространена коммерческая рубка леса, стимулируемая инвестициями из КНР (Шуфан и др., 2018). Вредители (сибирский коконопряд, пилильщик сосновый и др.) и возбудители болезней способствуют масштабному повреждению леса (Ставников, 2013). Хотя и не обширное, но ранее не описанное в литературе деструктивное воздействие на кедровый древостой в Бурятии могут оказывать сильные ветры в сочетании с постоянным антропогенным прессом. Шквальные ветры приводят к образованию ветровалов на средневысотных горных хребтах в районах, где ведется добыча кедрового ореха (Черных и др., 2019).

Климатические и метеорологические данные. Проведен анализ многолетних рядов температуры воздуха и атмосферных осадков в целом по бассейну оз. Байкал на основе материалов метеостанций и глобальной геопространственной базы данных метеопараметров CRU TS 4.03 (*Climate Research Unit*, пространственное разрешение $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) (Dabaeva et al., 2016; Harris et al., 2014).

Данные по осадкам (Р) и температуре (Т) на метеостанциях получены с сервера Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (www.meteo.ru) и использованы для оценки состояния увлажненности по годам (Булыгина и др., 2015). Для каждой метеостанции проведен расчет аномалий Р и Т весеннего и летнего периодов. Также проведена оценка влагообеспеченности территорий по ГТК – гидротермическому коэффициенту Г.Т. Селянинова (отношение десятикратной суммы осадков в миллиметрах за период с температурами выше 10°C к сумме температур в градусах за то же время), который был рассчитан по суточным данным Р и Т к 1 августа до наступления обильных осадков.

Оценка долговременных вариаций характеристик растительного покрова. Использован разработанный алгоритм оценки долговременных вариаций характеристик растительного покрова по NDVI, который характеризует запас надземной фитомассы. Алгоритм содержит процедуры предварительной обработки данных: восстановление отсутствующих значений, сглаживание временного ряда фильтром Савицкого–Голея (Содномов и др., 2018). Полученные после удаления сезонной компоненты значения NDVI используются для построения линейной регрессии и определения тренда. Исходными данными послужили временные ряды *GIMMS NDVI3g* спектрорадиометра AVHRR серии спутников NOAA (Tucker et al., 2005). Низкое пространственное (8 км) и высокое временное (1–2 раза в сутки, в зависимости от широты места съемки) разрешение позволяют охватывать обширные площади и извлекать максимум информации для анализа динамики расти-

тельного покрова. Продукт сформирован из максимальных значений NDVI за 15-дневный период, таким образом минимизируется влияние атмосферы на качество изображения. В работе использованы снимки, полученные в период вегетации растительного покрова с 1982 по 2015 г.

Для пространственного сопоставления трендов *GIMMS NDVI3g* и метеопараметров использованы данные реанализа *NCEP/NCAR* (Kalnay et al., 1996). Установление границ засушливых земель проведено по широко признанному индексу аридности, известному также как индекс влажности – отношение годового количества осадков к потенциальной эвапотранспирации (Золотокрылин, 2002). Для расчетов использован набор метеорологических данных ENVIREM с пространственным разрешением 1 км^2 , усредненных за период с 1961 по 1990 г. (Title and Bemmels, 2005).

Расчет трендов осадков и *GIMMS NDVI3g* проведен для двух периодов: влажного (1982–1999 гг.) и засушливого (2000–2015 гг.). Разделение проведено именно так, поскольку в Забайкалье смена с влажной на засушливую фазу увлажненности приходится на рубеж тысячелетия (Обязов, Смахтин, 2012). При оценке изменений растительного покрова также использованы данные полевых геоботанических и дендрохронологических исследований, космоснимки сверхвысокого разрешения интернет-сервиса *Google Earth* и данные аэрофотосъемки с борта беспилотника.

Потери лесного покрова по данным ДЗЗ. Для оценки потери лесного покрова использована онлайн-веб-платформа *Global Forest Watch (GFW)*¹, созданная в результате сотрудничества NASA, Университета Мэриленда, Google, Геологической службы США, ESRI, Vizzuality, Агентства США по международному развитию и др. (Hansen et al., 2013). Проект *GFW* в режиме почти реального времени отслеживает состояние мировых лесов с помощью спутниковой съемки. Основной компонент данного проекта – это интернет-ориентированное приложение для оценки пространственно-временной изменчивости древесного покрова земного шара за период с 2001 г. по настоящее время на основе снимков со спутников серии *Landsat* с пространственным разрешением 30 м. Потери площади лесной растительности определены как снижение ее плотности или полное исчезновение вне зависимости от причин: пожары, вырубki, ветровалы и т.д. *GFW* определяет лесную растительность как растительность высотой более 5 м вне зависимости от ее типа. Для определения факторов, влияющих на потерю лесного покрова, использован продукт *GFW Tree Cover Loss by Dominant Driver* с разрешением 10 км,

¹ <https://www.globalforestwatch.org> (дата обращения 10.07.2021).

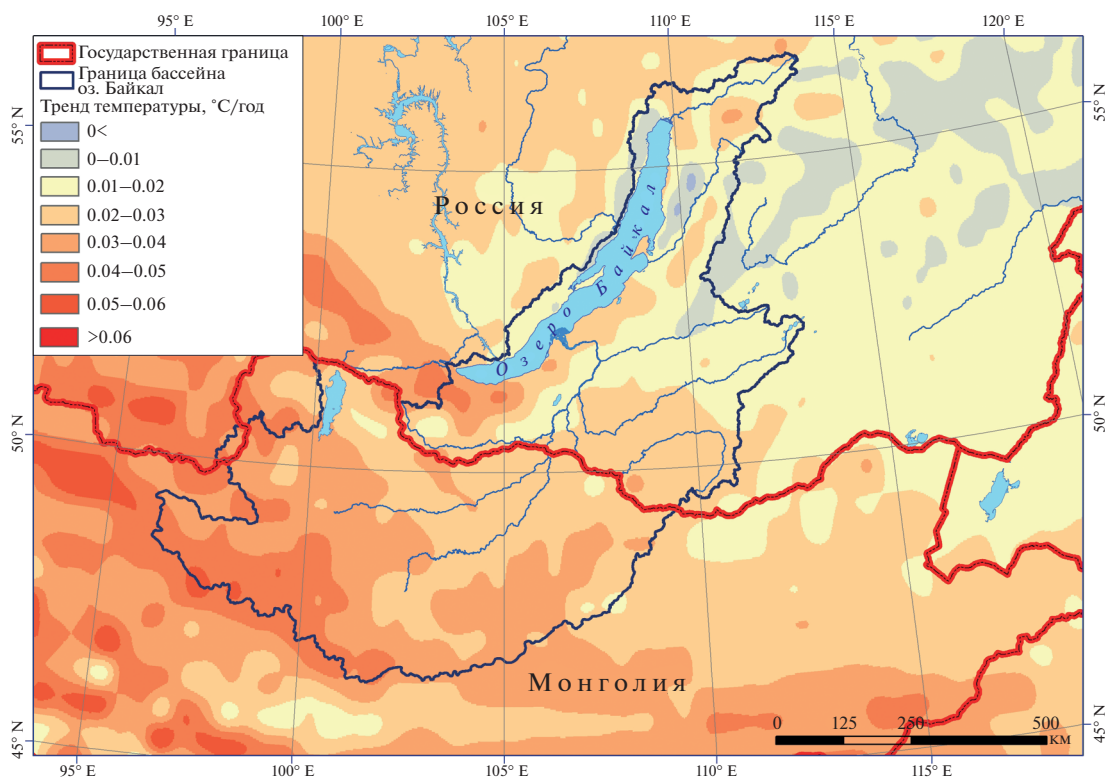


Рис. 1. Картограмма линейных трендов приземной температуры воздуха за 1982–2018 гг., °С/год.

который состоит из следующих категорий: 1) вырубка лесов — крупномасштабное обезлесение, связанное в первую очередь с увеличением площади сельскохозяйственных земель; 2) сельское хозяйство — временное уменьшение площади лесного покрова вследствие сельскохозяйственной деятельности; 3) лесное хозяйство — лесозаготовки, предполагающие незначительную степень сведения леса с последующим восстановлением; 4) лесные пожары — все лесные пожары вне зависимости от причины их возникновения за исключением сведения леса пожарами для нужд сельского хозяйства; 5) урбанизация — вырубка лесов для расширения селитебных территорий (Curtis, 2018). В регионе исследования выражены только 2 фактора: лесное хозяйство и лесные пожары.

Оценка экосистемных услуг. В качестве базовой методики для оценки благ и услуг, поступающих от экосистемы, выбрана методика на основе концепции общей экономической ценности (Millennium ..., 2005; Pagiola et al., 2004). В настоящее время все активнее используется новый подход “адаптации на основе экосистем”, который направлен на совершенствование управления экосистемами для обеспечения общественных выгод. Данный подход определяется как использование экосистемных услуг как части общей стратегии для того, чтобы помочь людям адапти-

роваться к негативным последствиям изменения климата (Secretariat ..., 2009). Он принимается в качестве основного подхода к адаптации лесного сектора к изменению климата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка долговременных изменений растительного покрова. В результате обработки данных CRU TS 4.03 установлен статистически значимый тренд увеличения температуры воздуха и уменьшения количества осадков. Рост приземной температуры наблюдается для всей рассматриваемой территории, при этом зоны с невысокими и высокими темпами роста перемежаются как в широтном, так и в долготном направлениях (рис. 1).

Выделены два периода по режиму увлажнения: 1982–1999 гг. — влажный; 2000–2018 гг. — засушливый. Влажный период характеризуется положительными трендами суммы осадков практически для всей рассматриваемой территории, при этом наибольшие темпы роста отмечены для хр. Хамар-Дабан (14 мм/год) и района Среднего Байкала (10 мм/год) (рис. 2а). В засушливый период наблюдается отрицательная динамика количества выпавших осадков. Экстремальное снижение увлажнения отмечается для Хамар-Дабана и составляет –30 мм/год. В бассейнах рр. Верхняя Ангара и Баргузин темпы снижения достигают

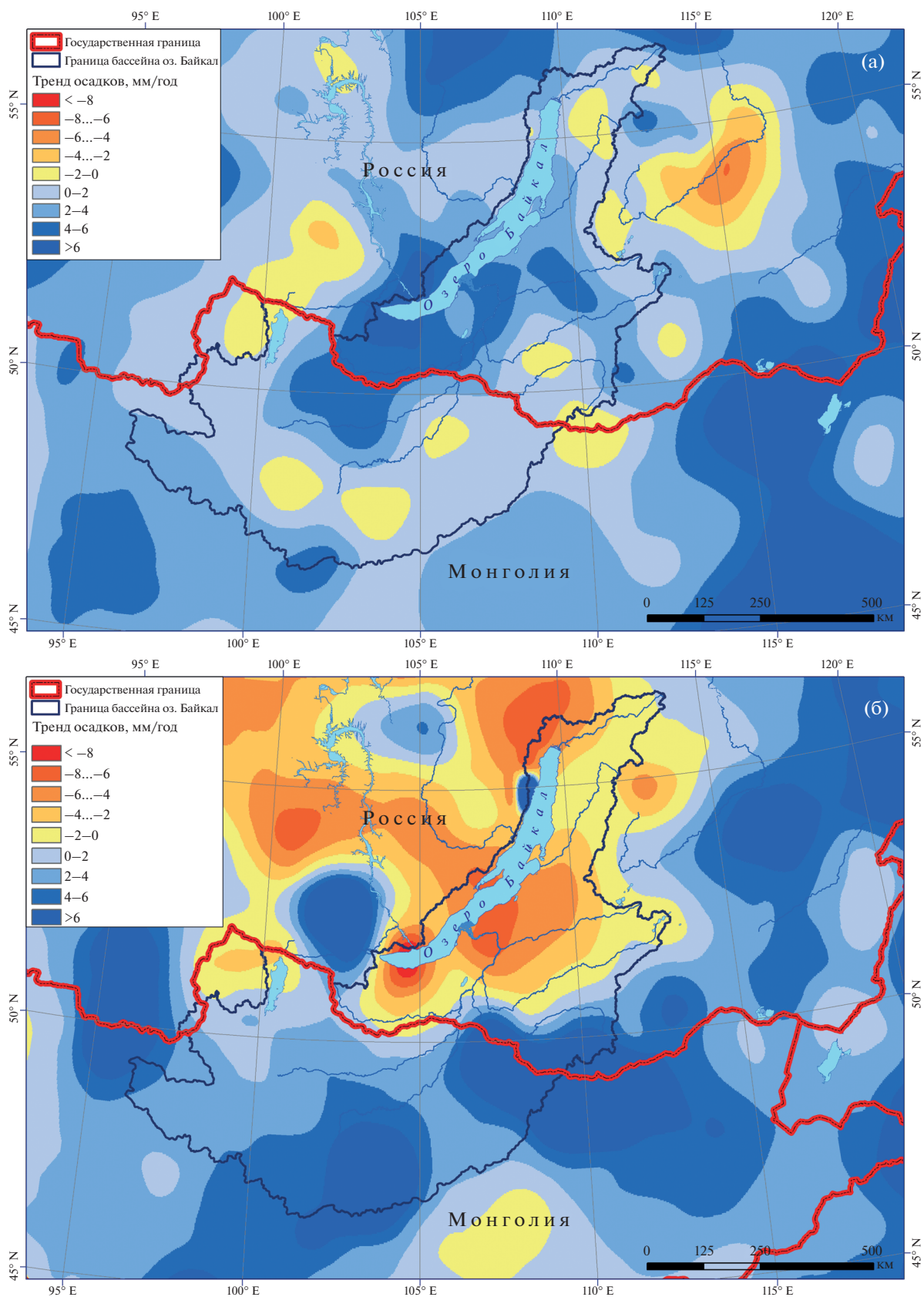


Рис. 2. Картограммы линейных трендов количества осадков (мм) за 1982–1999 гг. (а) и 2000–2018 гг. (б).

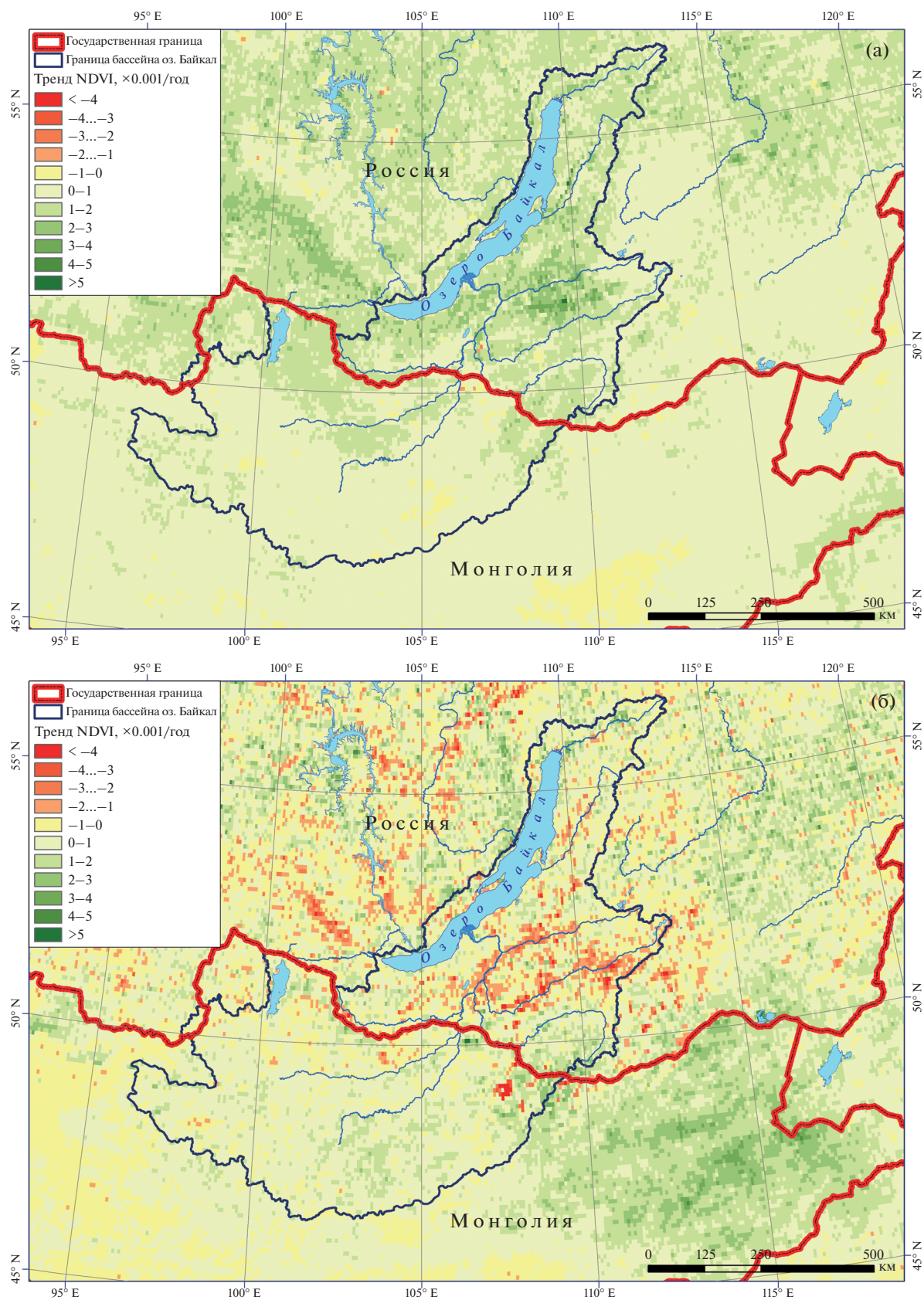


Рис. 3. Пространственное распределение линейных трендов *GIMMS NDVI3g* за 1982–1999 гг. (а) и 2000–2015 гг. (б).

Таблица 1. Доля положительных и отрицательных трендов *GIMMS NDVI3g* бассейна оз. Байкал, %

Период	Тренд NDVI	Семиаридная зона	Сухая субгумидная зона	Гумидная зона
Влажный (1982–1999 гг.)	Положительный	82.9	98.5	97.6
	Отрицательный	17.1	1.5	2.4
Засушливый (2000–2015 гг.)	Положительный	73.8	52.9	50.3
	Отрицательный	26.2	47.11	49.7

значений –18 мм/год (рис. 26). Основная причина маловодья 2000–2018 гг. в бассейне Байкала – уменьшение количества осадков из-за ослабления циклонической деятельности, которое было отмечено также и в начале, и в середине этого периода (Antokhina et al., 2015).

На основе сопряженного анализа временных серий вегетационного индекса *GIMMS NDVI3g*, метеорологических рядов реанализа *NCEP/NCAR* и натурных полевых исследований проведена количественная оценка долговременных изменений растительного покрова в засушливых и гумидных зонах. В результате анализа пространственного распределения трендов *GIMMS NDVI3g* в бассейне оз. Байкал выявлено, что во влажный период, как для гумидной, так и для засушливых зон, преобладают положительные значения трендов (табл. 1, рис. 3а). В засушливый период высокие темпы роста отрицательных трендов NDVI выявлены в сухой субгумидной (31 раз) и гумидной (21 раз) зонах, что указывает на их наибольшую чувствительность к режиму увлажнения (см. табл. 1, рис. 3б).

Влажный период отмечен почти повсеместным ростом NDVI (см. рис. 3а). Менее интенсивный рост вегетационного индекса наблюдается в сухой субгумидной зоне Витимской таежно-плоскогорной провинции, где тренд осадков имеет слабоотрицательный наклон. В засушливый период сплошные зоны с отрицательным трендом NDVI характерны для семиаридных и сухих субгумидных степных ландшафтов в межгорных котловинах – это долины рр. Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин, Уда и Джиды (см. рис. 3б). В Витимской таежно-плоскогорной провинции отрицательные тренды NDVI наблюдаются, помимо лесной растительности, в травяно-моховых болотах и вейниковых лугах. Байкальское нагорье (Северо-Байкальская таежно-нагорная провинция) с гумидным климатом также характеризуется отрицательными трендами NDVI. Уменьшение осадков, масштабные пожары (1998, 2006, 2015 гг.) усиливают тренд в негативном значении. Несмотря на слабые положительные тренды осадков в Прибайкальской гольцово-горнотаежной провинции, тренды NDVI на большей части горного массива имеют отрицательный знак. Разнонаправленность трендов NDVI и осадков в большей степени характерна для лесной расти-

тельности. Здесь влияние на динамику NDVI оказывает температура воздуха. В результате анализа пространственной корреляции рядов среднегодовых значений ГТК и NDVI выявлено, что положительная связь наблюдается для межгорных котловин, где распространены степные сообщества, а отрицательная корреляция – для лесных ландшафтов. Таким образом, осадки в большей степени влияют на NDVI степной растительности, а температура воздуха – на NDVI лесной (Garmaev et al., 2020).

Воздействие же лесных пожаров на ландшафты более значительно и часто сопровождается каскадным эффектом. Лесные массивы, подвергшиеся пожарам до 2000-х годов, характеризуются положительными значениями трендов, обусловленных постпирогенными восстановительными сукцессиями на поздних стадиях. Пожары, прошедшие с 2000 г. по настоящее время, как правило, дают отрицательные значения трендов, поскольку на данных территориях распространены ранние стадии вторичных сукцессий (бурьяны, закустаривание). Характерной особенностью пространственного распределения трендов NDVI являются их максимальные и минимальные значения на участках с восстановлением и вырубкой леса соответственно.

Потери площади лесного покрова Республики Бурятия. Количество и площади лесных пожаров в Бурятии подвержены резким колебаниям по годам (по данным Республиканского агентства лесного хозяйства с 1936 г.). В условиях экстремальной погоды (высокая температура воздуха, отсутствие осадков) лесные пожары распространяются бесконтрольно и переходят в разряд крупных, когда дуют сильные, штормовые ветры. В такие годы лесные пожары приобретают катастрофический характер (1943–1944, 1953–1954, 1996, 2003, 2008–2009, 2014–2015 гг.). В начале рассматриваемого периода прослеживается цикл крупных пожаров раз в 10 лет; дальнейшая их динамика показывает, что периоды катастрофических пожаров сокращаются и составляют 5–6 лет (рис. 4). Отметим практически полное отсутствие лесных пожаров в годы устойчивого развития СССР (период между 1955 и 1990 гг.), характеризовавшихся надежной системой охраны лесов. В 2015 г. произошли самые масштабные пожары как по коли-

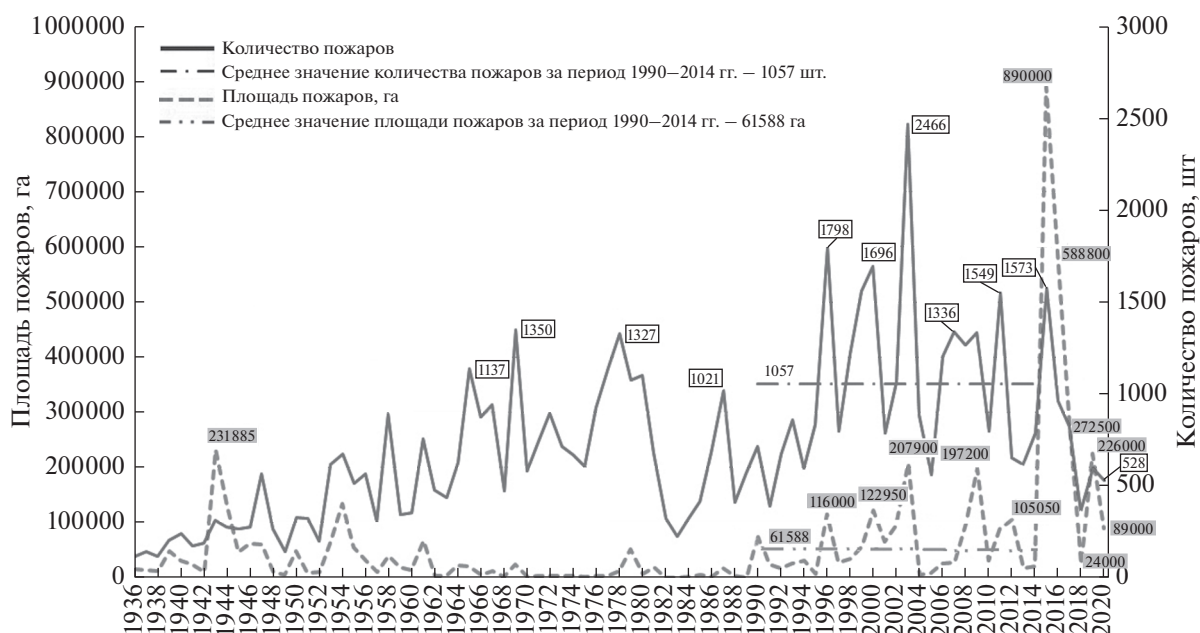


Рис. 4. Динамика лесных пожаров на землях Гослесфонда Республики Бурятия с 1936 по 2020 г.: количество пожаров и лесная площадь.

честву (1573 ед.), так и по площади (890 тыс. га) сгоревших лесов за весь период наблюдения.

В табл. 2 представлены оценки потери леса в районах Республики Бурятия с 2001 по 2019 г. по данным *GFW*; значения сгруппированы по пятилетиям (кроме последнего периода). Наибольшая доля обезлесения в первом пятилетии наблюдалась в Баунтовском, Прибайкальском и Хоринском районах, далее следуют Еравнинский, Кижингинский и Северо-Байкальский районы. За рассматриваемый период 73% лесных потерь в республике наблюдаются в этих северных и восточных районах. Следующее пятилетие характеризовалось практически двукратным снижением потери леса по сравнению с 2001–2005 гг. В данный период наибольшие потери вновь наблюдались в северных районах (Баунтовском и Северо-Байкальском), а также в Прибайкальском и Бичурском. Пятилетие с 2011 по 2015 г. практически совпадает с предыдущим по площади и структуре обезлесения – наибольшие потери в Баунтовском, Северо-Байкальском и Прибайкальском. Последний период 2016–2019 гг. характеризуется четырехкратным ростом площади обезлесенных территорий. Как и прежде, север Бурятии (Баунтовский, Баргузинский, Курумканский, Муйский, Северо-Байкальский районы), а также Прибайкальский и Хоринский районы вносят наибольший вклад в общую потерю леса в республике – 90%.

Преобладающее воздействие на лесные земли в северных районах Бурятии оказывают лесные пожары. Труднодоступные горные массивы явля-

ются препятствием для эффективного тушения пожаров. Следует отметить, что даже охранный статус ООПТ, расположенных в Баргузинском, Курумканском и Северо-Байкальском районах, не смог предотвратить и эффективно противостоять катастрофическим пожарам. Еравнинский и Хоринский районы, где наблюдались большие потери леса, также подвержены пожарам. В Кабанском, Прибайкальском районах и в районах Селенгинского среднегорья потери леса обусловлены хозяйственной деятельностью, однако пожарный фактор также значим. Западные районы Бурятии (Окинский, Тункинский, Закаменский) также подвержены пожарам, однако имеют существенно меньшие потери леса.

В результате анализа данных метеорологических станций выявлено, что погодные условия 2003–2004, 2015–2017 гг. способствовали высокой горимости лесов. Так, осадки, усредненные по метеостанциям северных районов, были существенно ниже нормы: весной аномалия $P_{2003} = -34.5$ мм и $P_{2015} = -14.9$ мм (при норме 44.6 мм), в летний период 2004, 2015, 2016 и 2017 г. аномалии осадков составили -86.6 , -120 , -76.8 , -82 мм соответственно (при норме -226 мм). Наибольшие аномалии T в северных районах проявились в летние месяцы 2015–2017 гг. и составили 2.2, 1.8 и 1.8°C соответственно (при норме 13.4°C). Комплексный показатель влагообеспеченности ГТК (учитывающий и температуру, и осадки) показал наименьшие значения в 2004, 2015 и 2017 г.: 0.88, 0.67 и 0.87 соответственно. ГТК по метеостанциям Тунка и Цакир западной части республики, ха-

Таблица 2. Потери площади лесов Республики Бурятия по данным *GFW*, тыс. га

Район	2001–2005 гг.	2006–2010 гг.	2011–2015 гг.	2016–2019 гг.	Всего за 2001–2019 гг.
Баргузинский	34.0	18.4	7.2	102.1	161.7
Баунтовский	172.2	39.1	72.3	468.5	752.1
Бичурский	5.1	42.5	2.2	5.5	55.3
Джидинский	13.1	10.0	3.9	0.9	27.9
Еравнинский	43.2	13.6	41.0	17.0	114.8
Заиграевский	22.6	17.2	10.9	14.3	65.0
Закаменский	4.5	13.1	8.2	1.2	27.0
Иволгинский	3.8	5.0	1.4	4.1	14.3
Кабанский	9.2	3.7	4.3	22.9	40.1
Кижингинский	45.5	12.2	17.8	10.5	86.0
Курумканский	26.2	6.7	22.0	90.5	145.4
Кяхтинский	0.3	2.4	0.9	0.9	4.5
Муйский	21.4	17.6	16.0	63.4	118.4
Мухоршибирский	2.0	7.9	2.6	2.9	15.4
Окинский	5.9	3.3	2.8	18.2	30.2
Прибайкальский	80.3	30.6	42.4	180.0	333.3
Северо-Байкальский	44.7	40.4	42.5	141.3	268.9
Селенгинский	14.8	8.7	2.5	5.0	31.0
Тарбагатайский	3.7	6.3	2.3	2.5	14.8
Тункинский	3.6	7.1	2.4	5.1	18.2
Хоринский	71.0	27.3	17.7	72.7	188.7
Республика Бурятия	627.2	333.5	336.0	1234.3	2531.0

рактирующей наименьшими потерями лесного покрова, принимал значения больше 1, что соответствует обеспеченному увлажнению.

Следует отметить, что восстановление лесов после крупных пожаров происходит достаточно медленно, а в некоторых случаях и вовсе не наблюдается. В результате анализа космических снимков высокого пространственного разрешения установлено, что в течение 3–5 лет после крупного пожара гари хорошо дешифрируются как визуальными, так и автоматизированными методами. Отдельные поврежденные пожарами участки леса, расположенные в потенциально пожароопасных местах (возле автодорог, населенных пунктов и т.д.), подвергаются повторному выгоранию после появления молодой поросли лиственных пород деревьев и кустарников. Кроме того, после уничтожения больших площадей леса пожарами проводится сплошная санитарная рубка горелого леса, но процессов лесовосстановления на выгоревших территориях не наблюдается. На месте уничтоженного огнем и добычей древесины леса активно развиваются эрозионные и дефляционные процессы, происходит остепнение. Тем самым, пирогенный фактор приводит не только к потере лесопокрытых площадей, но также и к трансформации ландшафтов.

Экосистемные услуги леса. Потери лесного покрова на исследуемой территории вследствие потепления климата влекут за собой и изменение объемов экосистемных услуг лесных земель, которое входит в завершающее звено (наряду с мерами по адаптации лесопользования к изменению климата) алгоритма проведенного исследования. Детальные экономические оценки и тенденции экосистемных услуг леса российской части бассейна р. Селенги на муниципальном уровне в связи с изменением климата приведены в табл. 3.

Для оценки экосистемных услуг леса использованы подходы международного проекта “Оценка экосистем на пороге тысячелетий” (Millennium ..., 2005). При определении ценности экосистемных услуг в стоимостном выражении в каждом отдельном случае использовался наиболее целесообразный из ряда имеющихся методов (см. табл. 3).

Проведенные расчеты показывают реальную возможность получения значительных доходов от использования лесной экосистемы бассейна р. Селенги. Надо отметить, что полученные оценки не могут быть суммированы, так как при расчете обеспечивающих услуг использовались фактические или планируемые к использованию в ближайшем будущем данные регулирующих и поддерживающих услуг – данные в целом по лес-

Таблица 3. Экономические оценки и тенденции изменения спроса и монетизации экосистемных услуг леса российской части бассейна р. Селенги в связи с изменением климата (в текущих ценах, эквивалентно доллару США)

Экосистемная услуга	Предоставление услуги из-за изменения климата	Спрос на услугу из-за изменения климата	Ценность потока (<i>flow</i>) услуг за год, млн долл. США	Ценность лесного капитала (<i>stock</i>), млн долл. США	%
Обеспечение древесиной и дровами	+/-	+/-	20.6	1030.3	9.4
Обеспечение продуктами леса	-	+	7.3	363.05	3.3
Обеспечение продуктами охоты	-	+	2.3	114.0	1.0
Депонирование углерода	+/-	+	78.3	3913.1	35.7
Фильтрационные функции болотных угодий	-	+	29.4	1471.25	13.4
Водорегулирующая функция лесной экосистемы	-	+	52.1	2605.6	23.8
Культурно-рекреационные услуги	+/-	+/-	24.3	1217.4	11.1
Сохранение естественных условий для биоразнообразия	-	+	4.8	238.6	2.2

Примечание: “-” – снижение предоставления экосистемной услуги из-за изменения климата; “+” – повышение спроса на услугу из-за изменения климата; “+/-” – без изменений.

ному фонду бассейна р. Селенги. Следовательно, необходим расчет коэффициентов (весов). Тем не менее расчеты наглядно показывают, что ценность экосистемных услуг этих лесов сопоставима с валовым продуктом данной территории.

Планы экономического развития региона и уровень цен на природные ресурсы позволяют говорить, что ценность экосистемных услуг будет постоянно расти, а их роль в процессах адаптации к изменению климата – увеличиваться.

Ситуация со значительными пожарами в 2015 г. связана, наряду с другими факторами, и с глобальным изменением климата, которое влияет на рост числа опасных гидрометеорологических явлений, включая периоды жаркой и засушливой погоды, создающей условия для катастрофических пожаров. Относительно катастрофических пожаров лета 2003, 2009 и 2015 гг. (периодичность – 6 лет) можно сказать, что причинами установления высокого уровня горимости лесов явилось наложение двух факторов: экстремальные погодные условия (отсутствие осадков и аномальная жара) и понижение уровня водных объектов бассейна оз. Байкал (как следствие этого – низкие запасы влаги в почве); в результате – ускоренное высыхание почвенного покрова и увеличение массы сухих горючих материалов в лесу.

Лесные пожары “запрограммированы” природой как элемент эволюции лесной экосистемы, но при чрезмерном их возникновении и распространении в условиях экстремальной погоды и неблагоприятного распределения лесного фонда по классам природной пожарной опасности, накопления “сухих” горючих материалов в лесу,

природа сама становится жертвой, неся огромные потери. Помимо этого, такие пожары представляют угрозу населению и населенным пунктам, хозяйственным объектам.

При благоприятных условиях лесные пожары должны способствовать замещению одних типов растительности другими, более приспособленными к новому климату.

Тем не менее, пожары, распространение вредителей и другие негативные воздействия климатических изменений могут нанести ощутимый урон лесному сектору экономики с точки зрения обеспечения древесиной и дровами (табл. 4).

Разработка стратегии. Каким образом можно адаптировать управление лесами и лесопользованием, чтобы для лесов, во-первых, снижался негативный эффект от изменений климата и, во-вторых, они были устойчивее к климатическим изменениям? Речь идет о том, что планирование лесохозяйственной и лесопромышленной деятельности следует осуществлять с учетом текущей и будущей климатической ситуации. Предлагается следующий набор мероприятий, способствующих усилению поглощения и удержания углерода лесами и адаптации управления лесами и лесопользованием к изменению климата (табл. 5).

Перечисленные мероприятия нельзя назвать принципиально новыми – они вполне укладываются в российскую систему управления лесным хозяйством и лесопользованием. Новыми можно назвать меры, направленные на улучшение структуры и пород деревьев, устойчивых к изменению климата, лесным пожарам, увеличению биомассы и поглощению углерода, а также разви-

Таблица 4. Последствия изменения климата в бассейне р. Селенги для экосистемной услуги по обеспечению населения древесиной и дровами

Угрозы, связанные с изменением климата	Наблюдаемое и потенциальное воздействие
Первичные климатические угрозы	
Засухи, тепловые волны	Возникновение пожароопасных условий летом, распространение пожаров
Сильные ливни, снегопады, бури, ураганы, а также весенние оттепели, бесснежные зимы	Повреждение и гибель деревьев, накопление легковоспламеняющегося валежника и бурелома
Долгосрочное повышение температуры	Изменение состава растительных комплексов
Опосредованные климатические угрозы	
Наводнения, оползни, лавины и сели	Затруднение доступа к лесосекам
Распространение болезней и вредителей	Повреждение и гибель деревьев, накопление легковоспламеняющегося валежника и бурелома
Распространение чужеродных видов растений	Изменение состава растительных комплексов

Таблица 5. Комплекс мер, способствующих усилению поглощения углерода лесами и адаптации управления лесами и лесопользованием к изменению климата в регионе

Комплекс мер	Мероприятия
Совершенствование управления лесами с целью сдерживания потепления климата	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сохранение старовозрастных (малонарушенных) лесов, расширение площади лесных ООПТ 2. Усиление деятельности по лесовосстановлению на вырубках и гарях, обеспечивающее формирование продуктивных насаждений для увеличения биомассы и поглощения углерода, использование климатически- и пожароустойчивых древесных пород и сортов 3. Лесовосстановление на безлесных территориях, в том числе на выведенных из оборота сельскохозяйственных землях, создание противоэрозионных и полезащитных лесных насаждений в малолесных районах 4. При проведении инвентаризации лесов, формировании лесного реестра, составлении лесных планов — проведение оценки степени климатической устойчивости лесных насаждений 5. Усиление профилактики и борьбы с лесными пожарами, вредителями и болезнями леса
Совершенствование управления эксплуатационной частью лесного фонда	<ol style="list-style-type: none"> 1. Внедрение технологий рубок для предотвращения потерь углерода подстилкой и почвой 2. Переход от сплошных рубок к выборочным 3. Более полная утилизация заготавливаемой древесины, в том числе использование ветвей и прочих порубочных остатков для производства биотоплива 4. Развитие добровольной лесной сертификации по системе FSC (<i>Forest Stewardship Council</i> — Лесной попечительский совет)

тие добровольной лесной сертификации по системе FSC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Бурятии наблюдаются значительные трансформации природной среды. Установлены статистически значимые тренды роста температуры воздуха и уменьшения количества осадков, с идентификацией влажного и засушливого периодов. Во влажный период положительные тренды NDVI наблюдались почти для всей территории исследования, тогда как засушливый период характеризуется значительным ростом отрицательных трендов вегетационного индекса. Динамика NDVI степной растительности в большей степени

зависит от осадков, динамика NDVI лесов — от температуры воздуха. Лесовосстановление, постпирогенная сукцессия, закустаривание залежей и др. обуславливают рост NDVI. Отрицательные тренды NDVI характерны для остепненных экосистем в условиях снижения количества осадков и для лесной растительности, подверженной вырубкам и пожарам.

В результате исследования выявлено, что наибольшие потери лесного покрова Бурятии за последние 20 лет произошли в северных районах республики и наблюдались в 2003—2004, 2015—2017 гг. Основной причиной потерь являются лесные пожары, которым способствовали весенние и летние засухи. В центральной части республики, помимо лесных пожаров, потери обусловле-

ны коммерческой деятельностью по заготовке леса. Западные влагообеспеченные районы меньше подвержены пожарам и, как следствие, в них наблюдаются меньшие потери лесного покрова и его экосистемных услуг.

Таким образом, наше исследование показывает, что преобладающее влияние на экосистемные услуги леса на рассматриваемой территории оказывают лесные пожары, на частоту и площадь которых влияет изменение климата, а также антропогенные факторы. Основными инструментами адаптации лесных земель к изменению климата являются совершенствование управления лесами с целью сдерживания потепления климата, а также совершенствование управления эксплуатационной частью лесного фонда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов НИР № АААА-А19-119060390027-8 и АААА-А21-121011990023-1 Байкальского института природопользования СО РАН.

FUNDING

This work was carried out with the financial support of R&D projects nos. АААА-А19-119060390027-8 and АААА-А21-121011990023-1 of the Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев С.Г., Гармаев Е.Ж., Аюржанаев А.А., Батоцыренов Э.А., Гуржапов Б.О.* Реконструкция водности рек и исторические хроники экстремальных природных явлений Байкальской Азии // Научное обозрение. 2016. № 5. С. 35–38.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
- Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю.* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
- Бобылев С.Н., Минаков В.С., Соловьева С.В., Третьяков В.В.* Эколого-экономический индекс регионов РФ. Методика и показатели для расчета. WWF России, РИА Новости, 2012. 150 с.
- Борисова Т.А.* Лесные пожары в Бурятии: причины и следствия // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География, геоэкология. 2017. № 2. С. 78–84.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В.* Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России // Патент РФ на базу данных № 2015620394. Патентообладатель ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных”. 2015. Бюл. № 3 (101).
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З., Дабеева Д.Б., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Куликов А.И.* Уровенный режим озера Байкал: ретроспектива и современное состояние // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 2. С. 4–18.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году”. М.: Минприроды России; НПП “Кадастр”, 2018. 888 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М., 2019. 79 с.
- Доржиев Ц.З., Бао Юухай, Бадмаева Е.Н., Ванчиндорж Батсайхан, Урбазаев Ч.Б., Юшань.* Лесные пожары в Республике Бурятия за 2001–2016 гг. // Природа Внутренней Азии. 2017. № 3 (4). С. 22–25.
- Евдокименко М.Д., Иванов В.В.* Особенности противопожарного обустройства в лесах Прибайкалья // Сиб. лесн. журн. 2017. № 5. С. 63–75. <https://doi.org/10.15372/SJFS20170506>
- Золотокрылин А.Н.* Индикатор аридности климата // Аридные экосистемы. 2002. Т. 8. № 16. С. 47–69.
- Кокорин А.О.* Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.
- Медведева М.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Использование данных NOAA AVHRR для выявления многолетней динамики растительности Северной Евразии // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 55–62.
- Обязов В.А.* Региональный отклик приземной температуры воздуха на глобальные изменения (на примере Забайкалья) // ДАН. 2015. Т. 461. № 4. С. 459–462.
- Обязов В.А., Смахтин В.К.* Многолетний режим стока рек Забайкалья: анализ и фоновый прогноз // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 1. С. 63–72.
- Сидоров А.А., Санжиева С.Е.* Хронология лесных пожаров в Республике Бурятия // Вестн. КрасГАУ. 2018. № 4 (139). С. 204–208.
- Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж.* Алгоритм оценки долговременных вариаций MODIS NDVI // Журн. СФУ. Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 1. С. 61–68.
- Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Черных В.В., Жарникова М.А.* Потери лесного покрова Республики Бурятия в XXI веке // Успехи современного естествознания. 2020. № 10. С. 44–49.
- Ставников Д.Ю.* Анализ санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Бурятия // Вестн.

- Бурятской гос. сельскохозяйств. акад. им. В.П. Филиппова. 2013. № 2. С. 67–73.
- Стыцанко Ф.В., Барташев С.А., Егоров В.А., Лунян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
- Тишков А.А. Биосферные функции и экосистемные услуги ландшафтов степной зоны России // Аридные экосистемы. 2010. Т. 10. № 1. С. 5–15.
- Черных В.Н., Бондаренко Д.В., Аюшеева Д.М., Раднаева Б.Б. Добыча кедрового ореха как фактор деградации кедровников горно-таежных ландшафтов Забайкалья (на примере тайги хребта Цаган-Дабан) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. Биология, география. 2019. № 3. С. 44–51.
- Шуфан Я., Плотнокова Г.П., Симонян С.Н. Перспективное развитие лесопереработки сибирского округа: взаимодействие Китая и России // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 116–124.
- Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
- Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 2. Биоразнообразие и экосистемные услуги: принципы учета в России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2020. 252 с.
- Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Kocheikova O.S., Mordvinov V.I. Summer circulation of the Northern Hemisphere atmosphere in periods of strong and weak East Asian monsoon // Atmosph. and Ocean. Optics. 2015. Vol. 28. № 3. P. 258–264.
- Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying Drivers of Global Forest Loss // Sci. 2018. Vol. 361. Iss. 6407. P. 1108–1111.
- Dabaeva D.B., Tsydyпов B.Z., Ayurzhanaev A.A., Andreev S.G., Garmaev Y.Zh. Peculiarities of Lake Baikal water level regime // IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci. 2016. Vol. 48. Iss. 012014.
- Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images // Int. J. Rem. Sens. 2008. № 29. P. 1053–1073.
- Garmaev E.Zh., Ayurzhanaev A.A., Tsydyпов B.Z., Alymbaeva Zh.B., Sodnomov B.V., Andreev S.G., Zharnikova M.A., Batomunkuev V.S., Mandakh N., Salikhov T.K., Tulokhonov A.K. Assessment of the spatial and temporal variability of arid ecosystems in the Republic of Buryatia // Arid Ecosys. 2020. Vol. 10. № 2. P. 114–122.
- Global Forest Resources Assessment. Desk Reference. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Sci. 2013. Vol. 342. Iss. 6160. P. 850–853.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Int. J. Climatol. 2014. № 34. P. 623–642.
- Kalnay et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–470.
- Kasischke E.S., Turetsky M.R., Ottmar R.D., French N.H.F., Hoy E.E., Kane E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests // Int. J. Wildland Fire. 2008. Vol. 17. P. 515–526.
- Keenan R.J., Reams G.A., Achard F., Freitas J.V., Grainger A., Lindquist E. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment // Forest Ecol. and Management. 2015. Vol. 352. P. 9–20.
- Loboda T., O'Neal K.J., Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data // Remote Sens. of the Environ. 2007. Vol. 109 (4). P. 429–442.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Synthesis Report. Washington D.C.: Island Press, 2005. 160 p.
- Pagiola S., von Ritter K., Bishop J. How Much is an Ecosystem Worth? Assessing the Economic Value of Conservation. The World Bank, Washington D.C., 2004.
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Y., Kraxner F., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products // Contemporary Problems of Ecol. 2015. Vol. 8. № 7. P. 811–817.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. Montreal, 2009. Technical Series № 41. 126 p.
- Title P.O., Bemmels J.B. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling // Ecography. 2018. Vol. 41. P. 291–307.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data // Int. J. Remote Sens. 2005. Vol. 26. P. 4485–4498.

Impact of Climate Change on Ecosystem Services of Forest Lands in the Southern Part of Eastern Siberia

B. Z. Tsydyпов^{1, *}, E. Zh. Garmaev¹, B. O. Gomboev¹, A. A. Ayurzhanaev¹, B. V. Sodnomov¹, S. D. Puntsukova¹, S. G. Andreev¹, and M. A. Motoshkina¹

¹Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

*e-mail: bz61@binm.ru

The features of the transformation of individual components of the natural environment in the south of Eastern Siberia (Republic of Buryatia was analyzed in detail) under the conditions of climate change, which have a critical impact on the ecosystem services of forest lands, have been determined. A system of sequential and

complementary methods has been applied, which allows an objective analysis of this impact and its assessment: remote sensing methods, correlation analysis, cartographic method, methods of the concept of total economic value, and “ecosystem-based adaptation.” The air temperature, precipitation, and NDVI trends were calculated for the wet (1982–1999) and dry (2000–2018) periods. Temperature rise, as the most critical parameter of the state of forest lands, is observed for the entire study area; at the same time, zones with low growth rates of surface temperature are interspersed with zones with high growth rates, both in latitudinal and longitudinal directions. The wet period is characterized by positive trends in the amount of precipitation for almost the entire study area. During the dry period, negative dynamics of the amount of precipitation is observed for the predominant part of this territory. The wet season is marked by an almost universal rise in NDVI. During the dry season, forest vegetation is characterized by multidirectional trends in NDVI and precipitation; here the NDVI dynamics is influenced by temperature. These patterns also predetermine changes in the development of ecosystem services of forest lands in the area under consideration. It has been determined that climate change has a negative impact on the predominant part of the ecosystem services of forest lands. The greatest negative impact on these services over a long period of observation (1936–2015) was caused by forest fires, which by the end of this period had significantly increased both in number and in area. A set of measures is considered to facilitate adaptation of forest land management to climate change.

Keywords: climate change, NDVI, trends, ecosystem services, forest fires, adaptation, forest lands in the south of Eastern Siberia

REFERENCES

- Andreev S.G., Garmaev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Batotsyrenov E.A., Gurzhapov B.O. Reconstruction of the water content of rivers and the historical chronicles of extreme natural phenomena of Baikal Asia. *Nauchn. Obozrenie*, 2016, no. 5, pp. 35–38. (In Russ.).
- Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Kochetkova O.S., Mordvinov V.I. Summer circulation of the Northern Hemisphere atmosphere in periods of strong and weak East Asian monsoon. *Atmos. Ocean. Opt.*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 258–264. <https://doi.org/10.1134/S1024856015030021>
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Estimation of the area of fires based on the integration of satellite data of different spatial resolution MODIS and Landsat-TM / ETM+. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 9–26. (In Russ.).
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. Investigation of the possibilities of assessing the state of forest damaged by fires according to multispectral satellite measurements. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 215–225. (In Russ.).
- Bartalev S.A., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. Express mapping of forest fire damage in Russia using Landsat satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 9–20. (In Russ.).
- Bobylev S.N., Minakov V.S., Solov'eva S.V., Tretyakov V.V. *Ekologo-ekonomicheskii indeks regionov RF. Metodika i pokazateli dlya rascheta* [Ecological and Economic Index of the Regions of the Russian Federation. Methodology and Indicators for the Calculation]. WWF Rossii, RIA Novosti, 2012. 150 p.
- Borisova T.A. Forest fires in the Republic of Buryatia: causes and consequences. *Vestn. VGU. Ser. Geogr., Geoekol.*, 2017, no. 2, pp. 78–84. (In Russ.).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Description of the data array of monthly precipitation amounts at Russian stations. Patent of the Russian Federation for the Database no. 2015620394. Patent holder: All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. 2015. (In Russ.).
- Chernykh V.N., Bondarenko D.V., Ayusheeva D.M., Radnaeva B.B. Pine nut harvesting as a factor of degradation of cedar forests in mountain-taiga landscapes of Transbaikalia (on example of the taiga ridge Tsagan-Daban). *Vestn. Buryatskogo Gos. Univ. Biol., Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 44–51. (In Russ.).
- Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change*. CBD Technical Series no. 41. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009. 126 p.
- Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 2018, vol. 361, no. 6407, pp. 1108–1111. <https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- Dabaeva D.B., Tsydygov B.Z., Ayurzhanayev A.A., Andreev S.G., Garmaev E.Zh. Peculiarities of Lake Baikal water level regime. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2016, vol. 48, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/48/1/012014>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god* [A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2018]. Moscow: Rosgidromet, 2019. 79 p.
- Dorzhiiev Ts.Z., Bao Y., Badmaeva E.N., Batsaihan V., Urbazaev Ch.B., Yushan Y. Forest fires in Republic of Buryatia for 2002–2016. *Priroda Vnutrennei Azii*, 2017, no. 3(4), pp. 22–37. (In Russ.).
- Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada* [Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report]. Vol. 1: *Uslugi nazemnykh ekosistem* [Services of Terrestrial Ecosystems]. Moscow: Tsentr Okhrany Dikoi Prirody, 2016. 148 p.
- Ekosistemnye uslugi Rossii: Prototip natsional'nogo doklada* [Ecosystem Services of Russia: Prototype of the National Report]. Vol. 2: *Bioraznoobrazie i ekosistemnye uslugi: printsipy ucheta v Rossii* [Biodiversity and Ecosystem Services: Accounting Principles in Russia]. Moscow: Tsentr Okhrany Dikoi Prirody, 2020. 252 p.
- Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images. *Int. J. Remote Sens.*, 2008, vol. 29, no. 4, pp. 1053–1073.

- Evdokimenko M.D., Ivanov V.V. Specifics of fire preventing arrangements in the forests of Baikal region. *Sib. Lesnoi Zh.*, 2017, no. 5, pp. 63–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170506>
- Garmaev E.Z., Tsydyrov B.Z., Dabaeva D.B., Andreev S.G., Ayurzhanayev A.A., Kulikov A.I. The Lake Baikal level regime: retrospection and current status. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*, 2017, no. 2, pp. 4–18. (In Russ.).
- Garmaev E.Zh., Ayurzhanayev A.A., Tsydyrov B.Z. et al. Assessment of the spatial and temporal variability of arid ecosystems in the Republic of Buryatia. *Arid Ecosyst.*, 2020, vol. 10, pp. 114–122. <https://doi.org/10.1134/S2079096120020055>
- Global Forest Resources Assessment 2015. Desk Reference*. Rome: FAO, 2015. 244 p.
- Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei srede Rossiiskoi Federatsii v 2017 godu"* [State Report "On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2017"]. Moscow: Minprirody Rossii, NPP "Kadastr", 2018. 888 p.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013, vol. 342, no. 6160, pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, no. 3, pp. 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1996, vol. 77, no. 3, pp. 437–470.
- Kasischke E.S., Turetsky M.R., Ottmar R.D., French N.H.F., Hoy E.E., Kane E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests. *Int. J. Wildland Fire*, 2008, vol. 17, pp. 515–526.
- Keenan R.J., Reams G.A., Achard F., Freitas J.V., Grainger A., Lindquist E. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment. *For. Ecol. Manag.*, 2015, vol. 352, pp. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- Kokorin A.O. *Izmenenie klimata: obzor Pyatogo otsenochnogo doklada MGEIK* [Climate Change: Review of the Fifth Assessment Report of the IPCC]. Moscow: WWF, 2014. 80 p.
- Loboda T., O'Neal K.J., Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 2007, vol. 109, no. 4, pp. 429–442.
- Medvedeva M.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Lupyan E.A. Using NOAA-AVHRR data to identify long-term dynamics of vegetation of the Northern Eurasia. *Issled. Zemli Kosm.*, 2011, no. 4, pp. 55–62. (In Russ.).
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Synthesis Report*. Washington D.C.: Island Press, 2005. 160 p.
- Obyazov V.A. Regional response of surface air temperature to global changes (case study of Transbaikalia). *Dokl. Akad. Nauk*, 2015, vol. 461, no. 4, pp. 459–462. (In Russ.).
- Obyazov V.A., Smakhtin V.K. The Transbaikalia rivers' many-year runoff regime: analysis and background forecast. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*, 2012, no. 1, pp. 63–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565215100217>
- Pagiola S., von Ritter K., Bishop J. *How Much is an Ecosystem Worth? Assessing the Economic Value of Conservation*. Washington D.C.: World Bank, 2004. <https://doi.org/10.1596/0-8213-6378-6>
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Y., Kraxner F., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2015, vol. 8, no. 7, pp. 811–817. <https://doi.org/10.1134/S1995425515070136>
- Shufang Y., Plotnikova G.P., Simonyan S.H. Perspective development of wood processing of the Siberian Federal District: interaction of China and Russia. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2018, vol. 39, no. 3, pp. 116–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-3-116-124>
- Sidorov A.A., Sanzhieva S.E. The chronology of forest fires in the Republic of Buryatia. *Vestn. KrasGAU*, 2018, vol. 139, no. 4, pp. 204–208. (In Russ.).
- Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Chernykh V.V., Zharnikova M.A. Forest cover loss in the Republic of Buryatia in the 21st century. *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2020, no. 10, pp. 44–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37489>
- Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Tsydyrov B.Z., Garmaev E.Zh. Algorithm of assessment of the MODIS NDVI long-term variations. *Zh. SFU. Tekhnika i Tekhnologii*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 61–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0009>
- Stavnikov D. Analysis of sanitary and forest pest status of forests in Buryatia. *Vestn. Buryatskoi Gos. S-Kh. Akad.*, 2013, no. 2, pp. 67–73. (In Russ.).
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. Method for assessing the degree of forest damage by fires based on MODIS satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 254–266. (In Russ.).
- Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. Method for assessing the degree of forest damage by fires based on MODIS satellite data. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 254–266. (In Russ.).
- Tishkov A.A. Biosphere functions and ecosystem services of landscapes within the steppe zone of Russia. *Arid Ecosyst.*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 5–15. (In Russ.).
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int. J. Remote Sens.*, 2005, vol. 26, no. 20, pp. 4485–4498.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
- Zolotokrylin A.N. Indicator of climate aridity. *Arid. Ekosist.*, 2002, vol. 8, no. 16, pp. 47–69. (In Russ.).