

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*634.0

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ
В РОССИИ

© 2013 г. А. З. Швиденко^{1,2}, Д. Г. Щепаченко^{1,3}

¹ Международной институт прикладного системного анализа
А-2361 Австрия Лаксенбург, Шлосплац, 1
E-mail: shvidenk@iiasa.ac.at

² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск Академгородок 50 стр. 28

³ Московский государственный университет леса
141005 Мытищи Московской обл. Институтская 1

Поступила в редакцию 31.03.2013г.

Рассматривается влияние климатических изменений на распространение, интенсивность и трансформирующую роль лесных пожаров. Дана обобщенная характеристика современных пожарных режимов (ПР) и их влияния на лесные экосистемы и окружающую среду. Усиливающаяся частота катастрофических пожаров является типичной чертой ПР. Применение различных спутниковых инструментов свидетельствует, что средняя площадь природных пожаров на территории страны в 1998–2010 гг. составила $(8.2 \pm 0.8) \cdot 10^6$ га, из которых примерно две трети находится на лесных и половина – на покрытых лесом землях. Средняя величина углеродного пожарного баланса за указанный период в год пожара составила 121 ± 28 Тг С год⁻¹, включая 92 ± 18 Тг С год⁻¹ на лесных землях. Прогнозы, базирующиеся на моделях общей циркуляции атмосферы, предполагают существенную акселерацию ПР к концу XXI в., что на фоне возрастания сухости климата и таяния многолетней мерзлоты может привести к драматическим потерям лесных площадей и ухудшению качества лесов на большей части лесной зоны. Переход к адаптивному лесному хозяйству позволяет существенно снизить ожидаемые потери. В работе кратко обозначены основные направления адаптации системы охраны и защиты лесов к изменениям климата как составной части процесса перехода к устойчивому управлению лесами России.

Климатические изменения, лесные пожары, современные и ожидаемые пожарные режимы, адаптация лесов России к климатическим изменениям.

Природные (растительные) пожары оказывают разнообразное влияние на внешнюю среду и климатическую систему Земли. Оно включает эмиссии парниковых газов и аэрозолей, изменение эвапотранспирации и теплового режима поверхности, протекание основных экологических процессов (продуктивность, почвенное дыхание), послепожарные изменения альбедо на пожарищах и вследствие осаждения сажи (“black carbon”) на снег и морской лед и многое другое. Интегральная оценка влияния пожаров зависит от продолжительности периода оценивания. Комплексное воздействие перечисленных выше и других агентов в год пожара и начальный период восстановления экосистем приводит к заметному парниковому эффекту, в то время как многолетнее послепожарное увеличение альбедо существенно снижает суммарное воздействие [39].

Лесные пожары являются неотъемлемой составляющей эволюции лесных экосистем и современного состояния лесного покрова России. Двойная роль лесных пожаров отчетливо проявляется на территории страны. В неуправляемых лесах высоких широт, особенно на многолетней мерзлоте, низовые пожары в рамках исторически сложившихся пожарных циклов (от 50–80 до 150–300 лет) являются частью природного механизма, предотвращающего снижение продуктивности лесов, развитие процесса заболачивания и распространение зеленого опустынивания [10, 11]. На большей части лесной зоны пожары являются наиболее вредоносным природным нарушением, определяющим сукцессионную динамику лесов, мозаичность и структуру лесного фонда, количественные и качественные характеристики древостоев и приводящим к значительным эко-

логическим, экономическим и социальным потерям. Пожары являются основным фактором, определяющим динамику запаса углерода в экосистемах бореальных лесов [29]. Пожарные режимы (регионально обусловленные устойчивые сочетания типов, распространенности, частоты и интенсивности лесных пожаров, определяющие степень разрушения лесных биогеоценозов и послепожарную динамику их восстановления) зависят от четырех основных факторов – сезонной погоды (климата), количества и состояния растительных горючих материалов (РГМ), наличия источников огня и деятельности человека. Поэтому климатические изменения на фоне современных социально-экономических процессов являются важным фактором, влияющим на лесопожарную ситуацию и стратегию борьбы с лесными пожарами. В настоящей работе сделана попытка проанализировать влияние наблюдающихся и ожидаемых изменений климата на леса и пожарные режимы (ПР) на территории страны и обсудить основные направления адаптации лесов к климатическим изменениям, ожидаемым в XXI в.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

При выполнении работы использованы как оригинальные, так и прочие доступные источники информации. Для уточнения общей площади природных (растительных) пожаров в 1998–2010 гг. проведен попиксельный временной контроль и реанализ данных, полученных Институтом леса им. В.Н. Сукачева [17]. Исходный массив данных представлял собой результаты обработки сигналов 1–5 каналов NOAA AVHRR с разрешением 1 км² по алгоритму, основные черты которого описаны в [42, 44]. Обычное завышение площадей пожаров изображениями грубого пространственного разрешения было скорректировано на основе регрессий, разработанных сибирскими учеными с использованием наземных измерений и изображений Landsat 30-метрового разрешения [1]. Далее проводился сравнительный анализ оценок площадей, пройденных природными пожарами, с результатами наиболее длительных из существующих серий наблюдений, которые получены иными спутниковыми приборами – MODIS на борту спутников Terra и Aqua и содержатся в глобальной базе пожарных эмиссий GFED3 [46] и SPOT-Vegetation [2].

Распределение площадей природных пожаров по классам растительности и оценка пожарных эмиссий базировались на данных Интегральной земельной информационной системы (ИЗИС), разработанной в Международном институте прикладного системного анализа [40]. Она содержит

гибридный земельный покров в виде многослойной геоинформационной системы и многочисленных атрибутивных баз данных. Для представления земельного покрова и его параметризации использовано 12 спутниковых инструментов, а также доступные наземные измерения *in situ*, данные инвентаризаций и обследований (учет земельного и лесного фондов и т.д.). Иерархическая классификация растительности включала от нескольких десятков классов для сельскохозяйственных земель до ~80 тысяч для лесов. ИЗИС содержит исчерпывающую характеристику ландшафтов и экосистем (включая фитомассу, чистую первичную продукцию, гетеротрофное дыхание и т.д.) и совмещена с климатическими данными за последние 4 десятилетия. Базовое пространственное разрешение ИЗИС составляет 1 км². ИЗИС представляет, видимо, наиболее информативное из существующих геореференсированных численных описаний земельного покрова и растительности России.

Углеродный пожарный баланс рассчитывался как часть полного верифицированного учета углеродного бюджета экосистем [41]. При расчете эмиссий рассматривались 5 типов пожаров (верховые, беглые и устойчивые низовые, торфяные, подземные), месячное распределение по которым устанавливалось на основе усредненных многолетних региональных данных. РГМ классифицировались по 12 типам. Средняя многолетняя интенсивность пожаров (доля сгораемых РГМ) корректировалась в зависимости от региональных погодных условий индивидуальных пожарных сезонов [17, 41].

СОВРЕМЕННЫЕ ПОЖАРНЫЕ РЕЖИМЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Климатические изменения последних десятилетий в России очевидны. Тренд увеличения годовых температур в 1976–2012 гг. на территории страны был почти в три раза выше, чем глобальный, составив 0.43 и 0.17°C за 10 лет, соответственно. В высоких широтах тренд составил 0.61°C за 10 лет. Эти тренды остаются устойчивыми: из трех наиболее теплых лет за всю документированную историю измерений климатических показателей на территории страны два (2007 и 2008 гг.) приходятся на последнюю декаду [5]. Среднее количество годовых осадков увеличивается, но незначительно (+7.2 мм за 10 лет в 1976–2008 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.). Пространственно тренд изменения количества осадков очень неоднороден. На значительной части страны он близок к нулю, а в восточной Рос-

сии на протяжении года и в европейской части летом – отрицательный. Индексы сухости климата возрастали почти во всей бореальной зоне, продолжая тенденции последних 50 лет. Заметно усилилась неустойчивость погоды. Частота сильных и продолжительных (до 100–120 дней) засух на обширных площадях увеличивается, нередко с аномально высокими температурами.

Такая специфика климата обусловила увеличивающуюся частоту катастрофических пожаров, которые, охватывая площади в десятки и сотни тысяч гектаров в пределах больших географических районов, приводят к деградации лесных экосистем, снижению их биоразнообразия, повреждению и уничтожению сырьевой базы лесной промышленности, образованию особых погодных ситуаций на больших территориях, крайне негативно влияющих на экономику и инфраструктуру, ухудшают жизненные условия и здоровье населения в районах их распространения и ведут к необратимой трансформации лесной среды на длительный период, превышающий жизненный цикл основных лесообразователей [1, 17, 19, 47 и др.]. В зоне катастрофических пожаров комплексный показатель влажности достигает величин порядка 12000–14000; средняя площадь отдельных пожаров возрастает в 5–10 раз, задымление охватывает десятки миллионов гектаров. Меняется распределение пожаров по типам. Г.Н. Коровин [33], обобщая доступную информацию о пожарных режимах второй половины XX в., 77% пожаров отнес к низовым, 22% к верховым и 1% к подземным. При катастрофических пожарах последнего десятилетия доля верховых и подземных пожаров увеличилась в 1.5–2 раза. Меняются типы пожароопасных сезонов с преобладанием длительных летних – раннеосенних. Пожары распространяются в обычно негорючие болота, меняется состав пожарных эмиссий с увеличением содержания CO, CH₄ и NO_x за счет глубокого почвенного горения. Послепожарный отпад в зоне катастрофических пожаров при устойчивых низовых пожарах превышает 50% и может достигать 90% запаса древостоев. В пределах гарей происходят длительные, в основном неблагоприятные, трансформации гидротермического режима территории, примерно на треть снижается потенциал биопродуктивности лесов, последующее возобновление идет, как правило, со сменой пород. Фрагментация лесов, их трансформация в захламленные гари и возрастание количества РГМ увеличивает угрозу возникновения последующих катастрофических пожаров [3, 14, 15, 18, 19, 47].

Новой чертой ПР является влияние катастрофических пожаров на сезонную погоду на терри-

ториях, сопоставимых с площадью образования барических систем (порядка 30 и более миллионов гектаров). При этом создаются устойчивые тропосферные гребни, подпитываемые горячим дымом и аэрозолями многочисленных интенсивных пожаров. Фронтальные осадки, надвигающиеся с юго-востока на дальневосточные районы и с северо-запада на Восточную Сибирь, огибают площади с массовым распространением лесных пожаров или разрушаются в результате взаимодействия с конвекционными колонками, не достигая зоны пожаров [1, 12, 13, 47]. Такие пожары продолжаются на протяжении нескольких месяцев и прекращаются только при наступлении холодной осенней погоды. Подобная метеорологическая и пожарная обстановка наблюдалась, например, в Восточной Сибири в 1979, 1985, 1996, 2006, 2012 гг., центре Европейской России в 2010 гг., Республике Саха в 1985–1986, 1996, 2001, 2002, 2012 гг., Хабаровском и Приморском краях в 1954, 1968, 1976, 1979, 1981, 1986, 1998, 2001, 2003, 2005 и другие годы [1, 17, 19, 28, 31 и др.]. Катастрофические пожарные ситуации неоднократно отмечались раньше, охватывая на малонаселенных территориях гигантские площади. Однако встречались они редко, особенно до начала освоения обширных таежных регионов, обычно несколько раз за столетие, хотя значительно чаще в теплые и сухие климатические периоды [19, 28].

В последние два десятилетия катастрофические пожары встречались в различных районах России с увеличивающейся частотой [1, 17]. На значительной части площадей, пройденных такими пожарами, особенно на севере таежной зоны, наблюдается процесс “зеленого опустынивания”, вследствие которого покрытые лесом земли превращаются на длительный срок в лесонепригодные площади (болота, кустарники, каменистые россыпи и т.д.). По экспертным оценкам, катастрофические пожары последних двух десятилетий увеличили площадь лесонепригодных земель в Дальневосточном федеральном округе на $8 \cdot 10^6$ га [47]. В целом пожары, подобные имевшим место в разных районах страны в 1998, 2003, 2010, 2012 гг., являются природными катастрофами планетарного масштаба.

Официальной статистики о всей площади природных пожаров в стране не существует. Агентство лесного хозяйства приводит сведения о “лесной площади, пройденной пожарами на охраняемой части лесного фонда”, оценивая ее в среднем в $2 \cdot 10^6$ га, что в несколько раз меньше спутниковых оценок для территории лесного фонда. Эта информация, с некоторыми модификациями,

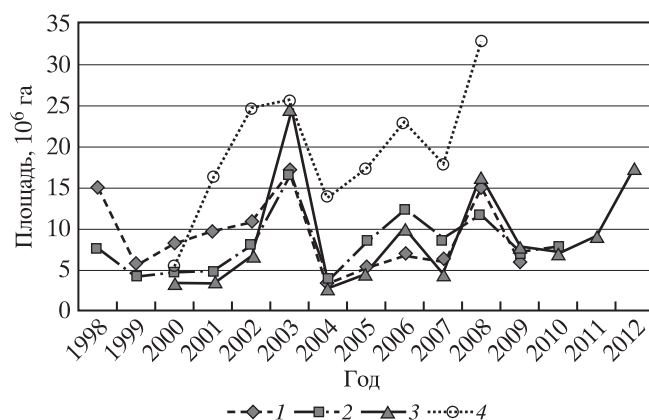


Рис. 1. Динамика общей площади природных пожаров по разным источникам: 1 – GFED3 [44], 2 – фильтрованные данные Института Леса РАН [1], 3 – Институт Космических Исследований РАН (среднее из [2, 8]), 4 – [4].

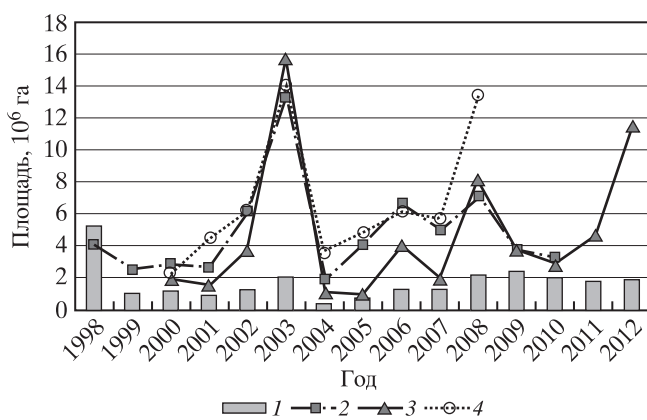


Рис. 2. Динамика пожаров на лесных землях по разным источникам: 1 – Рослесхоз, площади на охраняемой от пожаров части лесного фонда; 2 – Институт Леса РАН [1], лесные земли; 3 – Институт Космических Исследований РАН (среднее из [2, 8]), покрытые лесом земли; 4 – [4], покрытые лесом земли.

дублируется статистикой Госкомстата. Спутниковые оценки площадей пожаров разнообразны и часто противоречивы (рис. 1 и 2) – они зависят от технических особенностей различных средств дистанционного зондирования; надежности использованной информации о земельном покрове; обоснованности алгоритмов оценивания; использования различных определений лесов и других классов земельного покрова; несовпадения границ оцениваемых регионов; неоднократных уточнений предыдущих оценок их авторами и т.д. Типичной чертой и главным недостатком большинства спутниковых оценок является практически полное отсутствие их надежной верификации по наземным данным.

Средние данные основных спутниковых серий оценок площадей пожаров в России за продолжительные периоды, порядка 10 лет, достаточно сходны, хотя различия по отдельным годам могут достигать двукратной величины. Оценка, полученная на основе пространственного и временного реанализа данных Института леса им. В.Н. Сукачева, дала среднюю площадь природных пожаров в стране за 1998–2010 гг. $8.2 \cdot 10^6$ га год⁻¹, с вариацией от 4.0 (2004 г.) до $17.3 \cdot 10^6$ га год⁻¹ (2003 г.) [17]. Пожары на лесных землях составили $5.9 \cdot 10^6$ га год⁻¹, а на землях, покрытых лесом, – $4.9 \cdot 10^6$ га год⁻¹. Расчетная точность оценки годовой площади пожаров составила $\pm 9\%$ (доверительная вероятность 0.9). Глобальная база пожарных эмиссий GFED3 приводит за этот же период оценку $9.2 \cdot 10^6$ га год⁻¹ [46]. Среднее из нескольких оценок, опубликованных Институтом космических исследований РАН, составило $8.5 \cdot 10^6$ га год⁻¹ за 2000–2010 гг. [2]. Для сопос-

тавимости мы не включили в это число оценки площадей за 2011 ($11.5 \cdot 10^6$ га) и 2012 ($18.0 \cdot 10^6$ га) годы, выполненные этим институтом. Существуют и другие, часто заметно отличающиеся оценки, обычно приводимые за более короткие периоды или отдельные годы. Так, в [4] средняя площадь пожаров составляет $18.1 \cdot 10^6$ га год⁻¹ в 2000–2008 гг. Среднее из 10 доступных из литературы оценок площадей пожаров 2003 г. составило $20.1 \pm 6.1 \cdot 10^6$ га (± 1 среднеквадратическое отклонение) с разбросом от 13.1 до $33.3 \cdot 10^6$ га [2, 4, 17, 24, 40, 44, 46]. Большинство явно “выпадающих” оценок содержит заметные методические погрешности.

В целом средний уровень распространения растительных пожаров на территории России оценен достаточно точно и составляет $(8-9) \cdot 10^6$ га год⁻¹, из которых примерно две трети приходится на лесные земли и половина – на покрытые лесом земли. Вероятно, эта оценка несколько занижена за счет как тундровых и северотаежных экосистем, так и выжиганий на сельскохозяйственных землях юга, где недооценка возможна вследствие низкотемпературного горения, частой облачности и значительного задымления. Россия имеет самый высокий уровень горимости лесов в бореальной зоне, превышая площадь лесных пожаров в Канаде, второй стране мира по площади бореальных лесов, в 3–4 раза [43].

Интенсивность пожара (“fire severity”) является важнейшим показателем, определяющим количество сгоревших растительных горючих материалов (РГМ), пожарные эмиссии, степень разрушения биогеоценоза и характер послепожарного восстановления. Многочисленные исследования

показали, что попытки оценить интенсивность пожара спутниковыми методами, применяя показатели, чувствительные к пожарам, такие как изменения в цвете (оптический и средний инфракрасный диапазоны), структуру почв (средний инфракрасный), влажность почвы и хлорофилл (ближний инфракрасный), удовлетворительными не оказались. Использование дополнительных измерений *in situ* и спектральных данных Landsat TM/ETM+ позволяют существенно улучшить результаты [23, 34]. Перспективным представляются спутниковые измерения радиационной мощности пожаров (например, [30]), однако надежное применение этого метода на территории России потребует значительных наземных исследований.

Количество и состав пожарных эмиссий зависят от типов пожара и пожарного сезона, состава и других таксационных показателей лесов, количества, состава и состояния РГМ, метеорологических условий, соотношения фаз горения (тления и пламенной фазы) и некоторых других агентов. Наша оценка углеродного пожарного баланса (общее количество углерода в сгоревших материалах) вследствие растительных пожаров в России в течение 1998–2010 гг. составила 121 ± 28 Тг С год⁻¹, с годовой изменчивостью от 50 (2000 г.) до 231 (2003 г.) Тг С год⁻¹. Продукты горения включали С-СО₂ – 84.6%, С-СО – 8.2%, С-СН₄ – 1.1%, С-НМНС (неметановые углеводороды) – 1.2%, органический углерод – 1.2% и элементный углерод – 0.1%. Твердые частицы составили 3.5%, фракция которых менее 2.5 мкм (PM_{2.5}) – 1.2%. За этот же период углеродные эмиссии от пожаров на лесных землях составили 92 ± 18 Тг С год⁻¹ в 1998–2010 гг. (76% от общего количества). По удельным эмиссиям на единицу площади данные GFED3 практически совпали с нашими – разница оказалась менее 1%.

Поток углерода вследствие разложения древесины деревьев, погибших от повреждений пожарами, несколько выше прямых эмиссий и менее определен, поскольку надежно отделить послепожарный отпад от других его видов (патологического, естественного) невозможно. Оценок таких мало. Используя региональные модели разложения древесного отпада (сухостой, валеж, сухие ветви живых деревьев), мы оценили углеродные эмиссии вследствие послепожарного отпада порядка 90–100 Тг С год⁻¹ [41]. Оценка эта очень приближенная. В целом суммарные эмиссии углерода вследствие пожаров в лесах оцениваются за последние десятилетия на уровне 180–200 Тг С год⁻¹. Некоторые модели дают существенно больший уровень углеродных эмиссий (напри-

мер, [22]), хотя точность этих оценок неизвестна и в общий углеродный баланс лесных экосистем они не вписываются. Эмиссии азота оценены в 0.9 Тг N год⁻¹, главным образом, в виде NO_x, N₂O и NH₃ [41].

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЖАРНЫХ РЕЖИМОВ

Модели, используемые Межправительственной группой экспертов по изменениям климата (МГЭИК), предсказывают достаточно согласованное и существенное усиление современных климатических тенденций в течение XXI в столетия почти для всех районов страны, и особенно boreальной зоны, хотя разнообразие прогнозов в зависимости от использованных сценариев и моделей значительно. В рамках трех сценариев МГЭИК – А2 (экстремальный по ожидаемому потеплению), А1В (близкий к середине диапазона прогнозов по разным сценариям) и В1 (минимальное потепление) вероятное увеличение средней годовой температуры в различных регионах России к концу столетия ожидается от +4 до +12 °С [32, 37, 38]. Такой уровень потепления не наблюдался в течение многих тысячелетий. Современная наука о глобальных изменениях считает, что повышение глобальной температуры выше 2 °С создает многие риски для лесов Земли. Однако возрастающий уровень эмиссии парниковых газов за счет сжигания топлива и возможные сценарии развития мировой экономики и энергетики приводят исследователей к заключению, что глобальное потепление к концу столетия, вероятно, достигнет 3.5–4 °С. Для территории России это значит увеличение средней годовой температуры в разных регионах от 6 до 12 °С с максимумом в высоких широтах азиатской части России.

Прогнозируемое среднее годовое увеличение осадков оценивается от $11.3 \pm 3.1\%$ (В1) до $17.7 \pm 3.7\%$ (А2). Во всех сценариях осадки увеличиваются зимой. Небольшое увеличение осадков летом предполагается в северных и восточных регионах страны, а уменьшение – на юго-западе России, центральных и южных континентальных районах азиатской части. Ни в одном сценарии среднее летнее увеличение осадков не предполагается выше 8%, что находится в пределах точности прогноза. Поэтому следует ожидать увеличение сухости климата на большей части лесной зоны. Возрастающая нестабильность погоды будет усугублять водный стресс деревьев.

Воздействие изменения климата на леса зависит как от величины потепления, так и от буфер-

ного потенциала лесных экосистем. Леса России в основной своей части эволюционно адаптировались к устойчивому холодному климату, что создает дополнительные риски, связанные с потеплением. Предполагается, что прогнозируемые климатические изменения существенным образом скажутся на структурных и функциональных характеристиках лесного покрова страны [16, 20, 45, 47 и др.], что может привести к драматической эскалации ПР в лесах, хотя коротко- и долгосрочные прогнозы заметно различаются.

Климатические тренды, повышение концентрации CO_2 и интенсивности осаднения азота в ближайшие два-три десятилетия должны способствовать повышению продуктивности лесов России. Более благоприятные условия роста будут наблюдаться для лиственных пород. Однако влияние возрастающей неустойчивости и разбалансированности климата, возрастание частоты засух и тепловых волн, особенно в южной части лесной зоны, будет существенно снижать трендовый потенциал увеличения продуктивности древостоев. Ожидается возрастание концентрации озона, который усиливает водный стресс деревьев. Предполагается интенсификация биотических нарушений, в первую очередь всплеск массового размножения опасных вредителей. Все вместе приведет к увеличению как количества РГМ, так и пожарной опасности по показателям погоды.

Значительно более высокие риски ожидаются к концу столетия, если потепление превысит определенные пределы. Летнее изменение осадков не будет компенсировать увеличение температуры, что обусловит возрастание водного стресса древесных растений на большей части России. В этом случае в качестве наиболее вероятного сценария для бореальных лесов следует ожидать нелинейный отклик в функционировании лесных экосистем, который может привести к образованию ранее не существовавших экосистем и исчезновению пород с ограниченной адаптационной способностью. Как показывают модели и профессиональные экспертные заключения, при региональном потеплении порядка $6-7^\circ\text{C}$ следует ожидать достижение критического предела в функционировании бореальных лесных экосистем, превышение которого приведет к массовому отпаду деревьев. Если только пороговые значения устойчивости будут перейдены, этот процесс может быть достаточно быстрым, и значительная трансформация бореальных лесов может совершиться в течение 50-летнего периода. Эксперты рассматривают ожидаемый массовый отпад в бореальных лесах как один из девяти гло-

бальных потенциальных “элементов переключения” (“*tipping element*”), то есть возникновение внезапного и резкого отклика экосистем за порогом их устойчивости [35]. Механизм, управляющий повышенной смертностью деревьев, базируется на увеличивающемся водном стрессе и высоких пиковых температурах, которые вызывают повышенный отпад непосредственно, а также косвенно, за счет повышения уязвимости бореальных лесных экосистем от болезней и насекомых и вследствие эскалации ПР. С высокой вероятностью предполагается, что прогнозируемые к концу столетия изменения климата будут вести к эскалации биотических нарушений на территории России, что окажет синергетическое влияние на изменения в частоте, площади и интенсивности пожаров с очевидными последствиями для лесов.

Значительная часть лесов России произрастает в зоне многолетней мерзлоты. При среднем уровне потепления, модели предсказывают уменьшение общей площади многолетней мерзлоты к 2080 г. примерно на треть и площади сплошной мерзлоты – на 25–50%. В основной своей части эта территория находится в зоне с небольшим современным количеством осадков (порядка $200-300\text{ мм год}^{-1}$), и прогнозируемое увеличение осадков на 10–20% не изменит ситуации. Поэтому следует ожидать необратимое изменение гидрологического режима обширных территорий, подстилаемых многолетней мерзлотой, существенное падение уровня грунтовых вод и снижение запасов доступной влаги в почве. Отрицательное влияние термокарста, солифлюкции, оврагообразования и других процессов очевидно, но, видимо, оно будет не настолько драматическим, как коренное изменение условий произрастания. Аридизация ландшафтов высоких широт и интенсификация нарушений будет вести к деградации и гибели хвойных (особенно темнохвойных) лесов, а также к широкому распространению “зеленого опустынивания”.

Крупномасштабные усыхания лесов, сопровождаемые, как правило, массовыми всплесками размножения насекомых, уже отмечались в темнохвойных лесах Дальнего Востока, на юге лесной зоны Сибири и северо-востока Европейской России [9]. В ближайшие десятилетия следует ожидать возникновение новых “волн” усыхания елово-пихтовых лесов Дальнего Востока и Европейского Севера, повышенный отпад в кедровых лесах Сибири, а также снижение жизнеспособности и увеличение отпада лесов в экотоне “лес–степь”. Есть свидетельства систематического увеличения

отпада в лесах всей циркумполярной бореальной зоны [20].

Особые риски ожидаются также для лесов экотона “лес–степь”, поскольку для этой части страны: (1) существует значительно более высокая неопределенность климатических прогнозов; (2) исключительно высока уязвимость лесов; (3) высока вероятность экологически опасных процессов (деградация лесных экосистем, окисление почвенного углерода); (4) значительная часть территории имеет неудовлетворительную структуру земельного покрова и качество сельскохозяйственных земель.

Прогнозные особенности климата и увеличение количества РГМ определяют существенное усиление пожарной опасности в лесах России, возрастающее к концу столетия. Современные модельные представления о будущих пожарных режимах на большей части территории России предполагают удвоение числа пожаров к концу нынешнего века, возрастание количества катастрофических пожаров, выходящих из-под контроля, существенное увеличение интенсивности пожаров, а также возрастание количества и изменение газового состава пожарных эмиссий вследствие усиления почвенного горения (например, [24, 25, 36]). Во многих районах возрастет число пожаров от молний.

Основные пожарные риски сосредоточены в азиатской части страны и на юге Европейской России. Прогноз будущих ПР в Европейской России к концу столетия на основе региональной модели, использующей индекс пожарной опасности погоды Нестерова и умеренный сценарий МГЭИК В2, приводит к заключению о значительной пространственной вариации индекса пожарной опасности, существенном увеличении пожарной опасности на южной границе лесной зоны и особенно в степи и уменьшении пожарной опасности на севере, что соответствует характеру изменений температурно-влажностного режима [38]. В другом исследовании для всей бореальной зоны [36], где использовалась связь гидротермического коэффициента Селянинова с различными индексами пожарной опасности, было показано, что площади с максимальной пожарной опасностью удвоятся к концу нынешнего века, однако пространственное распределение их будет очень неоднородным.

Комплексное воздействие изменений климата и гидрологического режима, акселерации ПР и вспышек размножения вредных насекомых должны привести к значительным, и в основном неблагоприятным

изменениям лесного покрова России. Однако модельные прогнозы очень разнообразны. Приведем два контрастных примера. Биогеографическая модель SibClim, используя одну из наиболее популярных (средних по уровню изменений) модель общей циркуляции атмосферы (МОЦА) HadCM3 и A2 сценарий МГЭИК, предсказывает на территории Сибири уменьшение площади климатических зон тундры, лесотундры и тайги от современных 81.5 до 30% и увеличение площади лесостепи, степи и полупустынь до 67%. Для умеренного В1 сценария соответствующее уменьшение общей площади северной части региона ожидается с 81.5 до 50%, а увеличение южного – с 18.5 до 50%. Прогноз подвижки границ биоклиматических зон к северу составляет в среднем 600 км. Прогнозируется значительное увеличение пожарной опасности погоды на большей части лесной зоны. Модель базируется на ограниченном числе климатических показателей [45]. Учитывая, что скорость миграции бореальных древесных пород в самых благоприятных условиях не превышает 300–500 м в год, такой прогноз означает гибель лесов и замещение леса степью и полупустынями на громадных территориях южной части современной лесной зоны Сибири.

Вместе с тем, детальная ландшафтная модель сукцессий и нарушений LANDIS-II (разрешение 100 м), объединенная с экофизиологической моделью PnET и позволяющая исследовать весь комплекс воздействий на леса (климатических изменений, различных режимов лесопользования, насекомых и болезней и т.д.), столь катастрофической картины не дает. Модель была применена для прогноза в переходной зоне от средней до южной тайги центральной Сибири [26, 27]. Использовались те же, что и в предыдущем случае, климатическая модель HadCM3 и сценарий A2. Наиболее интересный результат этого исследования заключается в том, что основные параметры будущего (через 100 лет и больше) лесного покрова оказались более зависимыми от режима лесопользования и спровоцированных новым климатом массовых вспышек вредных насекомых (в основном сибирского шелкопряда), чем от собственно климатических изменений. Критической эскалации ПР обнаружено не было. Вместе с тем модель предсказывает существенное изменение породного состава лесов (увеличивается доля лиственных пород), снижение способности сибирских лесов аккумулировать углерод и увеличение их фрагментации.

Практически все модели предсказывают значительное, до 3–4 раз по сравнению с современным, увеличение пожарных углеродных эмиссий и возможный переход лесных экосистем России от секвестра углерода к его эмиссиям в атмосферу на фоне климатического ингибирования продуктивности и жизненности лесов [21, 22].

Для России особо высока вероятность существенной обратной связи между потеплением и эскалацией пожарных режимов: увеличение концентрации CO_2 в атмосфере приводит к увеличению длительных и сухих периодов, которые способствуют росту площади и интенсивности пожаров и существенно увеличению эмиссий парниковых газов. В свою очередь, рост углеродных эмиссий ведет к дестабилизации климатической системы, что будет провоцировать усиление угрозы пожаров.

ПОЖАРЫ И АДАПТАЦИЯ ЛЕСОВ И ЛЕСНОГО ПОКРОВА К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

Леса особенно чувствительны к климатическим изменениям, поскольку длительный период жизни деревьев не позволяет им быстро адаптироваться к изменениям внешней среды. Леса должны адаптироваться не только к изменениям средних климатических показателей, но также к увеличивающейся изменчивости климата, наряду с возрастанием рисков, связанных с экстремальными погодными явлениями, такими как продолжительные засухи, ураганные ветры или наводнения. Адаптивный потенциал лесов включает эволюционно сложившиеся адаптационные свойства деревьев и лесных экосистем, а также социально-экономические факторы, определяющие возможности реализации мероприятий по плановой адаптации. Изученность адаптивного потенциала и чувствительности лесов России к климатическим изменениям крайне недостаточна.

Проблема адаптации лесов к климатическим изменениям относится к срочным, сегодняшним проблемам лесного хозяйства России. Уже сегодня лесоохранные службы развитых стран балансируют между удовлетворительной охраной в средние по напряженности пожарные сезоны и крупными потерями в годы высокой пожарной опасности. Ведущие лесные страны пришли к пониманию необходимости адаптивного лесного хозяйства, рассматривая его как основополагающую предпосылку возможности перехода к устойчивому управлению лесами. Адаптация лесов и мероприятия по смягчению климатических изменений

силами лесного сектора тесно связаны между собой, хотя между этими двумя видами деятельности есть и существенные различия.

Необходимость коренного усовершенствования системы охраны от пожаров является не только важной составляющей стратегии адаптации и средством смягчения климатических изменений, но и неотложной государственной задачей сегодняшнего дня, от удовлетворительного решения которой в значительной мере зависит прогноз состояния и сохранности лесов России. Эта комплексная проблема включает: (1) системный анализ нынешних и будущих региональных ПР и требований к рациональной системе охраны лесов от пожаров в условиях меняющегося климата; (2) разработку новой доктрины охраны лесов от пожаров; (3) разработку и внедрение стратегии предотвращения широкомасштабных нарушений в лесах, в том числе адаптацию лесных ландшафтов к будущему климату, включая целесообразную структуру лесного покрова, создание системы противопожарного обустройства территории, состав и строение древостоев, регулирование РГМ и т.д.; (4) внедрение эффективной системы лесного мониторинга как компонента интегральных систем наблюдений; (5) создание мобильной системы тушения пожаров, которая была бы способна ответить на вызовы меняющегося мира при условии выделения необходимых людских, финансовых и технических ресурсов; (6) разработку нового и усовершенствование существующего законодательства и институциональных структур лесоправления; (7) целесообразную международную кооперацию (см. также [1, 14, 15, 18, 47]). В настоящее время эффективная реализация всех перечисленных выше задач остается делом будущего, а ряд административных и институциональных решений последних лет нанес трудно поправимый ущерб существовавшей ранее системе пожарной охраны лесов.

Важнейшей предпосылкой эффективной системы охраны лесов от пожаров является необходимость решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических пожаров. Это требует реализации неотложных институциональных и организационно-технических мероприятий, в том числе: восстановление государственной лесной охраны, которая была практически упразднена последним Лесным кодексом (2007); концентрация всех информационных, организационных, технических и иных функций в централизованном федеральном предприятии “Авиалесоохрана”; развитие эффективной вертикальной структуры “Авиалесоохраны” (в частности, чис-

ленность, распределение и мощность региональных центров, создание специальных тренировочных центров для персонала, ориентированного на борьбу с катастрофическими пожарами); создание эффективных и мобильных региональных противопожарных центров в федеральных округах, в первую очередь на Дальнем Востоке, в Якутии и Восточной Сибири; создание интегральной системы наблюдений, которая отслеживала бы пожарную опасность и обеспечивала бы прогноз, включающий характеристики растительности, погоды и антропогенного воздействия; обеспечение полной и быстрой передачи прогнозной и оперативной информации о пожарной информации на региональный и локальный уровни; создание специальных групп дистанционного зондирования для оперативного мониторинга малых (<0.1 га) пожаров с высокой частотой и пространственным разрешением не более 200 м при высоких классах пожарной опасности; улучшение и внедрение целесообразных технологий профилактических выжиганий для снижения количества РГМ; внедрение улучшенных операционных методов прогноза погоды и развития пожаров, организационных и тактических схем тушения пожаров и т.д.; внедрение целесообразной системы удовлетворительного и своевременного финансирования мероприятий по охране лесов от пожаров [1, 14, 15, 47]. Очевидно, что подобная программа может быть эффективной только при условии налаживания последовательной и результативной профилактической работы с населением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы о характере последствий прямого и косвенного воздействия климатических изменений на леса России и пожарные режимы в них в XXI в. существенным образом зависят как от надежности современных прогнозов климатических изменений, так и от режимов ведения лесного хозяйства и, в первую очередь, от совершенствования системы охраны и защиты лесов. Прогнозы, базирующиеся на МОЦА, предполагают, что в масштабе страны отрицательные последствия воздействий изменений климата на лесные экосистемы России заметно перевесят положительные. Вероятно, начиная со второй половины нынешнего века значительная часть лесов России будет находиться в критическом состоянии, если научно-обоснованная крупномасштабная программа адаптации лесного сектора России к изменениям климата не будет разработана и реализована.

Создание эффективной системы охраны лесов от пожаров является важной составляющей

адаптивного лесного хозяйства и, следовательно, обязательным условием перехода к устойчивому управлению лесами России. Очевидно, что возможность ее создания находится в системной связи с другими отраслевыми и межотраслевыми управленческими, социальными, экономическими и экологическими проблемами перехода российского лесного сектора к устойчивому развитию, проблемами национального и, в некоторой части, глобального уровня. Глобальной является проблема лесов России на многолетней мерзлоте – если прогнозируемое потепление станет реальностью, то к концу столетия углеродные эмиссии здесь примерно в 3 раза превысят современные эмиссии от тропического обезлесения. Значительная часть этих эмиссий будет представлена метаном, что обусловит ощутимое влияние на климатическую систему Земли. Вместе с тем, управление процессом таяния многолетней мерзлоты – проблема, трудно поддающаяся радикальному решению. Введение специальных режимов ведения хозяйства в лесах на многолетней мерзлоте является одним из возможных мероприятий. Лиственничные леса, как основная лесная формация на территориях, подстилаемых многолетней мерзлотой, обладают более эффективной мерзлотовозащитной функцией, чем иные классы земельного покрова высоких широт, но это предполагает минимизацию нарушенности лесного покрова и эффективную охрану лесов от пожаров (например, [7]).

Значительные территории в высоких широтах являются объектом интенсивного индустриального освоения. Этот процесс сопровождается крупномасштабным негативным воздействием на экосистемы и окружающую среду за пределами собственно промышленных объектов, физическим разрушением ландшафтов, изменением гидрологического режима территорий вследствие воздействия инфраструктуры, загрязнением атмосферы, воды и почвы. Все это существенно усиливает негативное влияние климатических изменений на леса. Поэтому требует внедрения новая парадигма взаимоотношения человека с природными экосистемами севера и особенно лесами.

В настоящей работе были использованы прогнозы, принятые МГЭИК. Существуют иные прогнозы, не разделяющие в полной мере антропогенную теорию современного потепления (например, [6]). Хотя за альтернативной точкой зрения нет столь мощных научных доказательств, как современные климатические модели, существует отличная от нуля вероятность, что могут сбыться иные климатические сценарии, чем прогнозируются МГЭИК. В принципе это не меняет

основных положений, рассмотренных выше, но ставит дополнительные требования к стратегии и научным основам адаптивного лесного хозяйства в целом и охране лесов от пожаров, в частности. Требуется системный подход, который минимизировал бы общие потери, если реализуются климатические сценарии, альтернативные ожидаемым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэрокосмический мониторинг катастрофических пожаров в лесах Восточной Сибири / Под ред. Сухинина А.И. Отчет по НИР. Красноярск: Институт леса СО РАН, 2009. 91 с.
2. Барталев С.А. Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе спутниковых наблюдений // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 01.04.01. М.: ИКИ РАН, 2007. 48 с.
3. Валендик Э.Н. Экологические аспекты лесных пожаров в Сибири // Сибирский экологический журнал. 1996. № 1. С. 1–8.
4. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в Северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 307–320.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. М.: Росгидромет РФ, 2013. 86 с.
6. Замолодчиков Д.Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата // Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 3. С. 227–235.
7. Исаев А.П. Естественная и антропогенная динамика лиственных лесов криолитозоны (на примере Якутии). Автореф. дис. ... д-ра биол. наук: спец. 03.02.08. Якутск: Ин-тут биологических проблем криолитозоны СО РАН, 2011. 51 с.
8. Лаверов Н.П., Луян Е.А. Разработка методов и технологий оценки площадей, пройденных лесными природными пожарами // Доклад на конференции, посвященной юбилею академика Р.З. Сагдеева. 2013. <http://www.forestforum.ru/viewtopic.php?f=9&t=14001>
9. Манько Ю.И., Гладкова Г.А. Усыхание ели в свете глобального ухудшения состояния темнохвойных лесов. Владивосток: Дальнаука, 2001. 228 с.
10. Острошенко В.В. Лесные пожары в условиях севера Дальнего Востока // Северо-Восточная Азия: вклад в глобальный лесопожарный цикл / Под ред. Голдаммера Й.Г., Кондрашова Л.Г. Хабаровск: Тихоокеанский лесной форум, 2006. С. 224–245.
11. Седых В.Н. Лесообразовательный процес. Новосибирск: Наука, 1990. 163 с.
12. Соколова Г.В. Особенности региона, способствующие возникновению чрезвычайной пожарной опасности // Северо-Восточная Азия: вклад в глобальный лесопожарный цикл / Под ред. Голдаммера Й.Г., Кондрашова Л.Г. Хабаровск: Тихоокеанский лесной форум, 2006. С. 136–163.
13. Соколова Г.В., Тетерятникова Е.П. Исследования эволюции и роли крупных лесных пожаров региона Восточная Сибирь–Дальний Восток в развитии атмосферных процессов // Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне. М.: Алекс, 2003. С. 151–155.
14. Телицын Г.П. Проблемы борьбы с крупными лесными пожарами на Дальнем Востоке // Тр. ДальНИИЛХ. 1984. Вып. 26. С. 113–119.
15. Телицын Г.П. Профилактика лесных пожаров: опыт Дальнего Востока // Северо-Восточная Азия: вклад в глобальный лесопожарный цикл / Под ред. Голдаммера Й.Г., Кондрашова Л.Г. Хабаровск: Тихоокеанский лесной форум, 2006. С. 363–386.
16. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С. Материалы к познанию современной продуктивности лесных экосистем России // Базовые проблемы перехода к устойчивому управлению лесами России – учет лесов и организация лесного хозяйства. Красноярск: Институт леса СО РАН, 2007. С. 5–35.
17. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Доклады РАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
18. Шешуков М.А., Бруслова Е.В. История лесных пожаров, пожарные режимы на Дальнем Востоке // Северо-Восточная Азия: вклад в глобальный лесопожарный цикл / Под ред. Голдаммера Й.Г., Кондрашова Л.Г. Хабаровск: Тихоокеанский лесной форум, 2006. С. 105–135.
19. Шешуков М.А., Бруслова Е.В. Катастрофические лесные пожары в Хабаровском крае и на Сахалине в 1998 г. // Северо-Восточная Азия: вклад в глобальный лесопожарный цикл / Под ред. Голдаммера Й.Г., Кондрашова Л.Г. Хабаровск: Тихоокеанский лесной форум, 2006. С. 201–223.
20. Allen C.D., Makalady A.K., Chenchouni H., Bachellet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D., Hogg E.H. (Ted), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risk for forests // Forest Ecology & Management. 2010. V. 259. P. 660–684.
21. Amiro B.D., Cantin A., Flannigan M.D., de Groot W.J. Future emissions from Canadian boreal forest fires // Canadian Journal of Forest Research. 2009. V. 39. P. 383–395.

22. *Balshi M.S., McGuire A.D., Zhuang Q., Melillo J., Kicklighter D.W., Kasischke E., Wirth C., Flannigan M., Harden J., Clein J.S., Burnside T.J., McAllister J., Kurz W.A., Apps M., Shvidenko A.* The role of historical fire disturbance in the carbon dynamics of the pan-boreal region: A process-based analysis // *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. doi:10.1029/2006JG000380.
23. *Barret K., Kasischke E.S., McGuire A.D., Turetsky M.R., Kane E.S.* Modeling fire severity in black spruce stands in the Alaskan boreal forest using spectral and non-spectral geospatial data // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 1494–1503.
24. *Flannigan M.D., Stocks B.J., Turetsky M.R., Wotton B.M.* Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // *Global Change Biology*. 2009. V. 15. P. 549–560.
25. *Girardin M.P., Mudelsee M.* Past and future changes in Canadian boreal wildfire activity // *Ecological Applications*. 2008. V. 18. P. 391–406.
26. *Gustafson E.J., Shvidenko A.Z., Sheller R.M.* Effectiveness of forest management strategy to mitigate effects of global change in south-central Siberia // *Canadian Journal of Forest Research*. 2011. V. 41. P. 1405–1421.
27. *Gustafson E.J., Shvidenko A.Z., Sturtevant B.S., Sheller R.M.* Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia // *Ecological Applications*. 2010. V. 20 (3). P. 700–715.
28. *Ivanova G.A.* The history of forest fire in Russia // *Dendrochronologia*. 1998-1999. V. 16–17. P. 147–161.
29. *Jonsson M., Wardle D.A.* Structural equation modelling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems // *Biology Letters*. 2010. V. 6. P. 116–119.
30. *Kaiser J.W., Heil A., Andrea M.O., Benedetti A., Chubarova N., Jones L.* Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. P. 527–554.
31. *Kajii Y., Kato S., Streets D.G., Tsai N.Y., Shvidenko A., Nilsson S., McCallum I., Minko N.P., Abushenko N., Altyntsev D., Khodzer T.V.* Boreal forest fire in Siberia in 1998: estimation of area burned and emissions of pollutants by AVHRR satellite data // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 107. doi:10.1029/2001JD001078.
32. *Kattsov V., Govorkova V., Meleshko V., Pavlova T., Shkolnik I.* Climate change projections for Russia and Central Asia States. <http://neacc.meteoinfo.ru/research/20-research/91-change-climat21-eng>. 2010.
33. *Korovin G.N.* Analysis of distribution of forest fires in Russia // *Fires in Ecosystems of Boreal Eurasia*. Eds. J.G. Goldammer, V.V. Furyaev. The Hague, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 112–128.
34. *Lentile L.B., Holden Z.A., Smith A.M.S., Falkowski M.J., Hudak A.T., Morgan P., Lewis S.A., Gessler P.E., Benson N.C.* Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post fire effects // *International Journal of Wild Fire*. 2006. V. 15. P. 331–336.
35. *Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H.J.* Tipping elements in the Earth Climate System // *PNAS*. 2008. 105 (6). P. 1786–1793.
36. *Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadyozhina E.D., Shklyarevich O.B.* An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the twenty-first century // *Climatic Change*. 2008. V. 86. P. 463–474.
37. *Meleshko V.P., Katsov V.M., Govorkova V.A.* Climate of Russia in the XXI century. 3. Future climate changes obtained from an ensemble of the coupled atmosphere-ocean GCM CMIP3 // *Meteorology & Hydrology*. 2008. V. 9. P. 5–22.
38. *Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Shkolnik I.M.* Regional model assessments of fire risks under global climate changes // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 411A (9). P. 1485–1488.
39. *Randerson J.T., Liu H., Flanner M.G., Chambers S.D., Jin Y., Hess P.G., Pfister G., Mack M.C., Treseder K.K., Welp L.R., Chapin F.S., Harden J.W., Goulden M.L., Lyons E., Neff J.C., Schuur E.A., Zender C.S.* The impact of boreal forest fire on climate warming // *Science*. 2006. V. 314. P. 1130–1132.
40. *Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M.* A new hybrid land-cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *Journal of Land Use Science*. 2011. V. 6 (4). P. 245–259. doi: 10.1080/1747423X.2010.511681.
41. *Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I.* Bottom-up inventory of the carbon fluxes in Northern Eurasia for comparisons with COSAT Level 4 products. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 2010. Research Report. 210 p.
42. *Soja A.J., Cofer W.A., Shugart H.H., Sukhinin A.I., Stackhouse P.W., McRae D.J., Conard S.G.* Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998–2002) // *Journal of Geophysical Research*. 2004. V. 109. doi:10.1029/2004JD004570.
43. *Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B., Bosh E.M., Watton B.M., Amiro B.D. et al.* Large forest fire in Canada, 1959–1997 // *Journal of Geophysical Research*. 2002. V. 108. doi: 10.1029/2001JD000484.
44. *Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A.* AVHRR-based mapping of fires in Russia:

- New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 93. P. 546–564.
45. *Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Soja A.J.* Effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // *Environmental Research Letter*. 2009. V. 4. doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045013.
46. *Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural and peat fires (1997–2009) // *Atmospheric Chemistry & Physics*. 2010. V. 10. P. 11707–11735.
47. *Yefremov D.F., Shvidenko A.Z.* Long-term environmental impact of catastrophic forest fires in Russia's Far East and their contribution to global processes // *International Forest Fire News*. 2004. V. 32. P. 43–49.

Climate Changes and Wildfires in Russia

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G.

The climate change effect on patterns, intensity, and transforming role of wildfires is considered. The general overview of the recent wildfire regimes (WR) and impacts on forest ecosystems and environment is provided. A distinctive feature of WR is the increasing frequency of disastrous wildfires. Application of various remote sensing instruments evidences the average natural wildfire area in Russia in 1998–2010 is $8.2 \pm 0.8 \cdot 10^6$ ha. About two thirds of this total area occur on the forest lands, and the half is on the forested lands. The average annual fire carbon balance during the above period was 121 ± 28 Tg C year⁻¹, including 92 ± 18 Tg C year⁻¹ emitted from the forested land. The forecasts that based on Global Circulation Models suppose the dramatic acceleration of the fire regimes by end of the 21st century. Taking into account the predicted increase of dryness of future climates and thawing of permafrost, this will likely lead to the dramatic loss of forested area and impoverishment of the forest cover over major part of the forest zone. Transition to adaptive forestry and adaptive forest management would allow a substantial decrease of the expected losses. Adaptation of the current system of forest fire protection to climate change is considered as an important component of transition to sustainable forest management in Russia.

Climate change, forest fires, current and expected fire regimes, adaptation of Russia's forests to climate change.