

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

УДК 630*61(470)

ПЕРЕХОД К УСТОЙЧИВОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЛЕСАМИ РОССИИ: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

А. З. Швиденко^{1,2}, Д. Г. Щепаченко^{1,3}, Ф. Кракснер¹, А. А. Онучин²

¹ *Международный институт прикладного системного анализа (IIASA)
Австрия, 2361, Лаксенбург, Шлосплатц, 1*

² *Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

³ *Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н. Э. Баумана
141005, Московская обл., Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1*

E-mail: shvidenk@iiasa.ac.at, schepd@iiasa.ac.at, kraxner@iiasa.ac.at, onuchin@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 22.03.2017 г.

Дан краткий анализ теоретико-методических основ перехода лесного хозяйства России к устойчивому управлению (УУЛ). Рассматриваются современное состояние лесопользования в России, которое оценивается как критическое, ожидаемые воздействия изменений климата (ИК) на леса страны, а также теоретико-методические предпосылки, специфика и риски перехода к УУЛ, включая: 1) концепцию и общие методические основы УУЛ; 2) специфику требуемой информации; 3) проблему охраны и защиты лесов в условиях возрастающих рисков; 4) стратегические предпосылки адаптации лесов к изменениям климата и их использование в качестве средства смягчения ИК; 5) необходимость гармонизованной оценки множества ресурсных и прочих экосистемных услуг в рамках лесного хозяйства, устойчивого к рискам. Рассматривается определяющая роль моделей различной природы как основное методическое средство долгосрочного планирования лесохозяйственных мероприятий. Показано, что не существует единой стратегии, позволяющей достичь всех целей УУЛ, что масштаб объектов УУЛ играет главную роль в поиске оптимальных решений. Россия существенно опаздывает с разработкой и принятием действенной программы перехода к УУЛ. Работа ограничена теоретическими и методическими вопросами и не затрагивает управленческих и организационно-политических проблем современного лесного сектора России.

Ключевые слова: *леса России, изменения климата, управление лесами, устойчивое к рискам лесное хозяйство.*

DOI: 10.15372/SJFS20170601

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий мировое сообщество рассматривает парадигму устойчивого управления лесами (УУЛ) как философскую и методологическую основу коэволюции человека и леса, а также как исходный постулат стратегии национальных лесных политик и международных инициатив. Реализация и прогресс УУЛ оцениваются при помощи си-

стем критериев и индикаторов (КиИ), которые с теми или иными особенностями группируются вокруг семи основных тем: 1) поддержание и улучшение лесных ресурсов и их вклада в углеродный цикл; 2) здоровье и жизнеспособность леса; 3) ресурсные (древесные и недревесные) функции; 4) биоразнообразие; 5) защитные функции лесов, особенно охрана и защита вод и почв; 6) усиление социально-экономических функций леса и 7) развитие соответствующих по-

литик, институций и инструментов УУЛ (Forest Europe..., 2011). Россия принимает участие в развитии двух систем КиИ – Европейской и Монреальской (КиИ для бореальных лесов). По существу, переход к УУЛ в быстро меняющемся мире должен быть ориентирован на адаптивное лесоуправление, т. е. лесное хозяйство принципиально нового типа, когда решения принимаются в условиях значительной неопределенности прогнозов будущего, а лесохозяйственные мероприятия базируются на непрерывно обновляющихся знаниях о меняющейся внешней среде, возникающих реакциях и обратных связях лесных экосистем.

Опыт развитых стран показал, что воплощение принципов УУЛ в практику лесного хозяйства требует значительных политических, научно-методических и институциональных усилий. Этот опыт может быть полезным для России. Европейский союз принял новую Лесную стратегию (сентябрь 2013), базирующуюся на трех руководящих принципах: 1) УУЛ и многофункциональная роль лесов, сбалансированное получение всего многообразия товаров и услуг, обеспечивая при этом сохранение лесов; 2) эффективность использования ресурсов, оптимизация вклада лесов и лесного сектора в развитие сельских территорий и создание рабочих мест; 3) глобальная ответственность за леса, стимулирование устойчивого производства и потребления лесных продуктов (EU, 2013). Эти принципы детализированы в восьми взаимосвязанных приоритетах, которые демонстрируют многообразное значение лесов в современном мире, утверждают необходимость системного подхода к европейским лесам и лесному сектору и подчеркивают глобальную ответственность за леса. Стратегия содержит положения, которые представляются актуальными для лесного сектора страны. Исходным положением является высокая политическая и общественная оценка значения лесов, осознание их «полезности для каждого» во многих аспектах: для индустрии, базирующейся на лесе; в области охраны внешней среды и обеспечения социальной устойчивости; для сохранения биоразнообразия, смягчения климатических изменений и развития сельских территорий. В определенном смысле стратегия также рассматривает лес «за его пределами», подчеркивая межсекторальное значение лесных проблем и необходимость последовательной оценки создания добавленной стоимости лесных продуктов и услуг. Особо подчеркиваются необходимость развития лесной науки и опреде-

ляющее значение исчерпывающей, оперативной и прозрачной информации о лесах Европы, что концентрируется в разрабатываемой Лесной информационной системе.

Комплексным планом воплощения новой Лесной стратегии на период 2015–2017 гг. установлены следующие главнейшие задачи и показатели: 1) усиление согласованности и содержательности лесных политик стран ЕС; 2) оценка роли устойчиво управляемых лесов в сельском развитии; 3) совершенствование Лесной информационной системы; 4) исследование потенциального наличия биомассы из всех источников, включая лесную биомассу для производства энергии; 5) модификация системы европейских КиИ с тем, чтобы она была способна представлять полную и оперативную информацию о реальном воплощении принципов и методов УУЛ в ЕС в меняющихся условиях.

Несколько важных мегатрендов определяют современное развитие земной цивилизации, среди которых изменение климата (ИК) рассматривается как один из важнейших. Смягчение нежелательных последствий ИК есть одна из главнейших целей устойчивого развития (как это предусмотрено в целях устойчивого развития ООН, в частности в SDG13) и предпосылка достижения многих других целей, например SDG2 (обеспечение продуктами питания), SDG6 (чистая вода), SDG15 (устойчивые наземные экосистемы). Парижское соглашение (Paris Agreement..., 2015) объявило стратегической задачей человечества удержание глобального потепления на уровне ниже 2 °С в сравнении с доиндустриальным значением к концу столетия, и к началу 2017 г. 117 стран ратифицировали это соглашение. Достижение поставленной цели потребует «нуль-углеродной» экономики к 2060–2075 гг., что является исключительно сложной задачей. Однако мир опаздывает – даже если все действия по смягчению изменений климата, которые 189 стран планируют на 2020–2030 гг., будут выполнены (их реализация потребует ежегодных затрат в 100 млрд долларов), целевой рубеж в 2 °С уже недостижим, в любом случае он будет превзойден к 2050 г. (Watson et al., 2016) за счет инерции климатической системы Земли.

Переход к устойчивому управлению лесами в России представляет далеко не тривиальную проблему. Длительность жизни дерева и его пространственная неподвижность предопределяют возникновение особых проблем для леса в меняющемся климате (Charney et al., 2016). Ожидаемый уровень климатических изменений,

разнообразие лесов и региональной специфики лесного хозяйства, наличие огромных неуправляемых лесных территорий на фоне многочисленных институциональных, управленческих и организационно-политических проблем сегодняшнего лесного хозяйства страны (см., например, Шутов, 2003, 2006; Моисеев, 2013, 2014; Петров, 2013) определяют сложность поиска и воплощения оптимальных научно-методических и организационно-институциональных решений.

В печати, особенно отечественной, можно встретить мнение, что современные представления о причинах и характере глобального потепления, высказываемые Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) и разделяемые авторами настоящей статьи, не имеют достаточных научных обоснований, а МГЭИК является политизированной организацией, что ставит под сомнение объективность ее заключений. Принципиальная недостаточность такой точки зрения следует из следующих соображений:

1. МГЭИК утверждает, что антропогенная теория глобального потепления и существующие прогнозы высоковероятны, но не имеют 100%-й вероятности реализации. Научные предпосылки и результаты МГЭИК прозрачны и проверяемы, что нельзя сказать об утверждениях оппонентов.

2. Адаптивное лесопользование (лесное хозяйство, устойчивое к рискам, вызываемым ИК) есть необходимая составляющая УУЛ и стержневой путь развития мирового лесного хозяйства, независимо от причин уже наблюдающихся изменений внешней среды; наличие ИК только подчеркивает большое значение проблемы и необходимость ее срочного осознания и рассмотрения.

3. УУЛ есть постоянно обучающаяся динамическая система, предполагающая использование новейших научных результатов и непрерывное корректирование принимаемых управленческих решений, что полностью соответствует научному пониманию целесообразных путей коэволюции человека и природы в меняющемся мире.

ЛЕСА И ЛЕСНОЙ СЕКТОР РОССИИ – СОСТОЯНИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Огромный масштаб лесов России делает их явлением глобальной значимости: покрытые лесом земли страны составляют около 20 % площади лесов планеты (Forest Europe..., 2011).

Российские леса играют существенную роль в функционировании климатической системы планеты посредством сложных взаимодействий с процессами циркуляции атмосферы, режимами температуры и осадков, поведением вечной мерзлоты, влиянием на флуктуации речного стока и глобальные биогеохимические циклы. В 1990–2010 гг. леса России обеспечивали около 20 % глобального стока углерода (Pan et al., 2011; Швиденко, Щепашенко, 2014).

Значительное увеличение площади лесов страны наблюдалось в течение 40-летнего периода после первого полного учета лесов России по состоянию на 01.01.1961 г. (МЛХ РСФСР..., 1962): при практически неизменных основных требованиях лесоустроительных инструкций площадь лесов была оценена в 696.0×10^6 га в 1961 г. и 771.2×10^6 га в 1988 г. (здесь и ниже используется национальное определение леса). Две основные причины обусловили столь впечатляющую динамику: 1) улучшение охраны лесов от пожаров в 1960–1990 гг. и 2) уточнение лесочетных данных для отдаленных территорий, большая часть которых пройдена аэротаксацией в 1948–1956 гг. Недавние спутниковые оценки площади покрытых лесом земель России свидетельствуют, что эта тенденция изменилась в последние два десятилетия. Hansen et al. (2013) оценили потери площади лесов в России приблизительно в 25 млн га в 2001–2010 гг.; согласно Schepaschenko et al. (2015), общая потеря лесного покрова на территориях, управляемых органами лесного хозяйства, составила около 45 млн га за тот же период, в основном на таежных территориях высоких широт. Вместе с тем согласно этой же оценке 18 млн га заброшенных сельскохозяйственных земель возобновились лесной и кустарниковой растительностью. Однако эта территория остается пока вне всякого лесохозяйственного управления.

Официальная расчетная лесосека составляет около $670 \times 10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$. Этот показатель имеет весьма условное значение, поскольку, принимая во внимание наличие инфраструктуры, а также функциональное назначение лесов и их продуктивность, не учитывается экономическая доступность лесосечного фонда. Площадь лесов, фактически доступных для промышленной лесозаготовки, составляет около 25 % лесного фонда. Согласно официальной статистике, фактические лесозаготовки в целом по стране в течение последних двух десятилетий не достигали и трети величины действующей расчетной лесосеки.

В течение последних 25 лет коренные политические, социальные и экономические изменения в стране существенно ухудшили ситуацию в лесном хозяйстве России. Анализ официальных документов (FAO, 2012; Государственная программа..., 2013; Государственный совет..., 2013; Основы..., 2013) свидетельствует, что лесной сектор и лесоправление в России находятся в глубоком кризисе. Доля лесного сектора в валовом национальном продукте составляет 1.3 %, в индустриальной продукции – около 1 %, в мировой торговле лесными древесными продуктами – несколько ниже 4 % общей стоимости импорта–экспорта, доход составляет 2.4 %. Экспорт необработанной древесины и пиловочника составляет 54 % от официальных данных по количеству заготовленной древесины. Использование древесной биомассы для производства энергии практически ограничено резидентным сектором (32 млн м³ · год⁻¹) (FAO, 2012).

Управляемость лесов значительно ухудшилась вследствие неудовлетворительного законодательства, особенно Лесного кодекса (2006), и существенных ошибок, допущенных в последовавших реформах лесоправления (Шутов, 2006; Моисеев, 2014). Была фактически ликвидирована лесная охрана, что разрушило контроль за состоянием и использованием лесом. Принятая стратегия арендных отношений неэффективна как с точки зрения качества ведения лесного хозяйства на арендованных участках, так и в части влияния на экономические показатели лесного хозяйства, которое, управляя крупнейшим природным ресурсом, остается убыточным. Передача управления лесами на региональный уровень не была подкреплена соответствующими административными и финансовыми решениями. В то время как официальная оценка нелегальных рубок (включая такие разновидности, как воровство, неправильный учет, ведущий к заготовке большего количества древесины, чем это разрешено, рубку за пределами лесосек, или неразрешенных пород, или рубку запрещенными методами) составила 1.3 % в 2010 г., неправительственные организации оценивают объем нелегальных рубок ~20–30 % от официальных данных лесозаготовок (Vandergert, Newell, 2003; FAO, 2012). Основные виды лесохозяйственной деятельности, направленные на расширенное воспроизводство и сохранение лесов, на протяжении двух последних десятилетий уменьшились в разы. Так, площади лесовосстановления уменьшились в 2 раза, его самая активная часть – создание лесных культур

тур – в 2.5 раза (годовые посадки составили 186×10^3 га в среднем за 2003–2012 гг.). Использование генетически улучшенных лесных семян измеряется несколькими процентами от общего объема. Гибель культур высока вследствие трехкратного сокращения объемов ухода в молодняках. Лесоразведение на сельскохозяйственных землях не проводится, хотя существует срочная необходимость создания 4 млн га полезащитных лесных полос в южной части страны. Защита лесов от вредителей и болезней неудовлетворительная: если в 1990-х гг. в защите леса использовалось 12 биологических препаратов, то сейчас в ограниченном применении имеется только два. Разрушена отраслевая лесная наука – число квалифицированных ученых в учреждениях федерального подчинения сократилось в 5 раз в течение 1992–2010 гг. (FAO, 2012).

Надежная оперативная информация о состоянии лесов России отсутствует. Свыше 70 % лесов страны учтены последний раз более 10 лет назад и половина – свыше 25 лет назад. При сохранении современного положения дел к 2020-м гг. 80 % лесов будут иметь недопустимый уровень давности лесостроительства.

Дополнительные проблемы в оценке современного состояния лесов России создают не соответствующие реальности данные лесной статистики, в частности о природных нарушениях. Так, официально сообщаемые площади пожаров на землях лесного фонда за последние 15 лет в 3–10 раз меньше, чем данные трех независимых спутниковых оценок. Официальные данные о площади погибших лесов в 2003–2012 гг. были в пределах $(264–961) \times 10^3$ га (среднее 443×10^3 га), в том числе площади пожаров, уничтожающих древостой, – $(90–240) \times 10^3$ га, в то время как спутниковая оценка площади лесов, погибших только вследствие пожаров в течение первых трех послепожарных лет, составляет ~2–3 млн га · год⁻¹ (Krylov et al., 2014; Барталев и др., 2015). Агрегированные данные лесопатологического мониторинга и лесопатологических обследований неполны и противоречивы, и по ним сложно судить о санитарном состоянии лесов страны.

Не ясно, какая часть лесов России принадлежит к категории реально управляемых. Официальные данные утверждают, что все 100 % лесов страны управляемые, в то время как их доля в остальных бореальных лесах планеты только 63 % (MacDicken et al., 2015). Принятой предпосылкой «управляемости» является наличие плана ведения лесного хозяйства, хотя очевид-

но, что это условие недостаточно: определяюще важно, как выполняются плановые предназначения, насколько удовлетворителен мониторинг лесов и проводимых лесохозяйственных мероприятий. В целом управление лесами России не может быть оценено как соответствующее принципам и критериям УУЛ. Обзор лесного сектора России (FAO, 2012) призывает к срочной необходимости принципиальной реконструкции существующего и созданию, по существу, нового лесного сектора России, соответствующего вызовам XXI в.

СОВРЕМЕННОЕ И ОЖИДАЕМОЕ ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ЛЕСА РОССИИ

Изменение климата – продолжающийся процесс на территории России. В течение последних 40 лет темпы увеличения средней годовой температуры здесь составили 0.43 °C/10 лет, что в 2 раза и более выше глобального тренда. Отмечено отчетливое потепление во все сезоны, кроме зимы (аномалия зимнего сезонного минимума составила от 0.35 до 0.18 °C/10 лет). По нашим данным (Onuchin et al., 2014), потепление в континентальных районах Сибири наиболее выражено зимой и превышает в ряде районов 1.0 °C/10 лет, а наименее – летом (0.2–0.3 °C/10 лет). В то время как осадки несколько возросли (в среднем для страны от +0.3 до +0.8 мм в месяц за 10 лет в соответствии с двумя различными подходами к оценке), их распределение по территории неравномерно: увеличение наблюдается в европейской части России и Центральной Сибири и уменьшение – на обширных площадях Западной Сибири и Дальнего Востока. Отчетливо увеличились доля интенсивных осадков в общем их количестве и, как следствие, длительность и жесткость теплых и сухих периодов. В среднем сухость климата отчетливо увеличилась на большей части России, что определило водный стресс как одну из главных угроз лесам и интенсифицировало ужесточение режима природных нарушений, в первую очередь пожаров. Во многих районах негативное влияние климатических изменений усиливается антиэкологическим и практически нерегулируемым антропогенным воздействием, особенно при первичном индустриальном освоении ранее не затронутых ландшафтов (Shvidenko et al., 2013). Ряд моделей свидетельствует, что особенности ИК последних двух десятилетий уменьшили сток углерода в тундровые экосистемы и бореальные леса (Hayes et al., 2011), а спутниковые данные фиксируют, что повышенная температура влияет отрицательно на поглощение углекислоты северными лесами (Piao et al., 2014).

Будущее лесов России определяется тем, какой из сценариев дальнейшего развития будет реализовываться в действительности. В сценарии 5-го Оценочного доклада МГЭИК предполагается, что глобальная температура – если никакие меры по смягчению климатических изменений не будут производиться – возрастет к концу XXI в. на 3.7–4.8 °C (IPCC..., 2014). Парижское соглашение (Paris Agreement..., 2015) призывает добиться предела глобального потепления в 2 °C. Насколько и когда реализуется эта стратегическая задача – покажет время. Сегодня мир находится на траектории, соответствующей потеплению ~4 °C к 2100 г. (Le Quere et al., 2015). Такой уровень создаст неуправляемые проблемы в окружающей среде, особенно в высоких широтах, включая достижение лесными экосистемами элемента переключения (tipping element), т. е. состояния, при котором небольшие изменения критических климатических факторов внешней среды приводят к значительным и, как правило, необратимым изменениям и гибели лесов на больших территориях (Lenton et al., 2008; Gauthier et al., 2015).

Как говорили классики еще до эпохи климатических изменений, «завтра» в лесном деле важнее, чем «сегодня», и сегодняшнее правильное лесное хозяйство (М. М. Орлов) невозможно без понимания особенностей ожидаемого климата и его влияния на продуктивность, жизнеспособность, а в некоторых вариантах – на само существование российского леса.

Прогноз климатических изменений в среднем для России предсказывает существенное усиление современных тенденций. При глобальном потеплении на 4 °C региональное потепление на территории России составит порядка 6–11 °C. Количество осадков несколько увеличится, но их будет недостаточно для компенсации повышения температуры, особенно при жестких сценариях (RCP 8.5 и 6.5). Особенно неблагоприятны прогнозы для экотона лес–степь.

Влияние уже наблюдающихся и особенно ожидаемых изменений климата на леса России будет существенно зависеть от их географического положения, специфики ландшафтов, лесных формаций, типов леса и древесных пород. Это влияние может быть как положительным, так и отрицательным. Отрицательное влияние

ождается для большей части территории России. Перечислим кратко наиболее существенные и высоковероятные на территории России экологические и ландшафтно-экосистемные особенности и последствия ИК.

Ожидаемые увеличение температуры и изменение количества и режима осадков будут вести к увеличению сухости климата и повышенному отпаду в лесах большей части лесной зоны России. Этот процесс уже наблюдается во многих районах Северного полушария (Allen et al., 2010, 2015; Anderegg et al., 2016), включая территорию России. Особенно уязвимыми оказываются темнохвойные леса. Исследования показывают, что, хотя падение жизненности насаждений, снижение биоразнообразия и продуктивности – процесс многофакторный, усиление отпада и прочие проявления ухудшения состояния лесов таежной зоны начинаются в местообитаниях и на элементах рельефа с повышенным водным стрессом и недостаточным запасом почвенной влаги (Манько, Гладкова, 2001; Чупров, 2008; Kharuk et al., 2013, 2017; Харук и др., 2016а, б).

Особо вредоносными являются тепловые волны – длительные жаркие и сухие периоды, подобные лету 2010 г. в Европейской России, когда сухая погода с температурной аномалией +2.5...+3.0 °С сохранялась на площади свыше 100 млн га в течение 2.5 мес. Это привело к резкому ухудшению газового состава атмосферы и десяткам тысяч преждевременных смертей, гибели лесов на значительных территориях, двукратному падению чистой первичной продукции в лесах (Bastos et al., 2014) и потенциальным экономическим потерям около 10 млрд долларов США.

Вследствие климатических (и в определенной мере социальных) изменений на территории страны уже сейчас наблюдается существенная перестройка режимов природных нарушений, ведущая к увеличению их частоты, площади распространения, длительности и интенсивности. Нарушения (пожары, вспышки массового размножения вредителей, повреждения ветром, болезни) влияют на леса России фундаментальным образом, включая снижение биоразнообразия, динамику запаса углерода, представленность пород, почвенное плодородие, распределение древостоев по классам возраста и возрастное строение древостоев, изменение продуктивности лесов и стабильности обеспечения древесиной. В последние десятилетия отчетливой чертой пожарных режимов лесной

зоны стало наличие катастрофических (мега) пожаров (Швиденко и др., 2011). Такие многоочаговые пожары охватывают территорию на многих десятках и сотнях тысяч гектаров, характеризуются высокой интенсивностью, включая горение почвы и распространение пожаров в обычно негорючие болота, разрушают сырьевые базы предприятий на больших территориях, крайне отрицательно влияют на здоровье местного населения и биоразнообразии, а также являются одним из главных источников зеленого опустынивания (т. е. долгопериодного послепожарного замещения лесов травяно-кустарниковой растительностью, практически необратимого без человеческого вмешательства) (Ефремов, Швиденко, 2004). Такие пожары отмечаются почти ежегодно в различных районах. Средняя площадь растительных пожаров в России в XXI в. независимыми системами дистанционного мониторинга оценивается в 10–12 млн га в год (Швиденко и др., 2011; Giglio et al., 2013; Барталев и др., 2015; Ponomarev et al., 2015), из которых ~2/3 находятся на лесных, а половина – на покрытых лесом землях. Прогнозы изменения пожарных режимов (Malevsky-Malevich et al., 2008; Швиденко, Щепаченко, 2013) предполагают двух-трехкратное увеличение территории с повышенным риском лесных пожаров к концу XXI в.

Ослабленные в результате воздействия ИК леса становятся объектом нападения дефолиаторов и вторичных вредителей, а также в большей степени подвержены воздействию корневых патогенов и болезней (Pavlov, 2015; Харук и др. 2016а, б; Kharuk et al., 2017). Длительные сухие и теплые периоды способствуют вспышкам массового размножения опасных вредителей. В 2001–2002 гг. сибирский шелкопряд распространился на площади свыше 10 млн га, преимущественно в лиственных лесах Средней Сибири на территории, где вспышки массового размножения этого вредителя ранее не наблюдались. В настоящее время в темнохвойных лесах средней тайги Приенисейской Сибири на сотнях тысяч гектаров развивается новая вспышка сибирского шелкопряда (Бабой и др., 2016).

Площадь таяния приповерхностной многолетней мерзлоты в рамках сценария RCP 4.5 увеличится от (20 ± 7) % к 2050-м гг. до (31 ± 12) % в конце этого столетия; для RCP 8.5 прогнозируются (25 ± 8) и (56 ± 18) % соответственно (Доклад..., 2016). Деградация многолетней мерзлоты ведет к необратимому изменению гидрологического режима больших территорий,

снижению уровня грунтовых вод, критическому уменьшению запасов доступной воды, увеличению водного стресса и, как следствие, – к критическому увеличению пожарной опасности (Schaphoff et al., 2016). Таяние мерзлоты приведет к взрывоподобному увеличению углеродных эмиссий, поскольку мерзлотный 20-метровый слой только в Восточной Сибири содержит от 500 до 900 Пг С, в основном в форме метана и гидратов (Zimov et al., 2006). Большая часть этой территории расположена в зоне с небольшим количеством осадков, но климатические модели предсказывают их некоторое увеличение, которого будет недостаточно для компенсации увеличения температуры. В результате ожидается усиление процессов зеленого опустынивания, уже наблюдающегося сегодня на миллионах гектаров (Ефремов, Швиденко, 2004).

Учитывая особенности функционирования лиственных древостоев на многолетней мерзлоте в районах с малым количеством осадков (Osawa et al., 2010), преимущественно летних, следует предположить наличие особых рисков для этих лесов. Увеличение сухости климата увеличит риск возникновения больших пожаров и интенсификации процессов физического разрушения ландшафтов (термокарста, солифлюкции). Преобразование гидрологического цикла изменит сток сибирских рек, а также состояние и динамику обширных болот Западной Сибири и северных территорий.

Сдвиг биоклиматических условий и зональных типов растительности на север и в более высокие местообитания на юге определяется, главным образом, сомкнутостью полога, распространением семян и возобновлением (Kharuk et al., 2009a, b). На юге сдвиг проявляется преимущественно в усилении отпада деревьев вследствие климатически обусловленного стресса (Dulamsuren et al., 2009), который может привести к быстрому и массовому коллапсу существующих лесов. Некоторые модели прогнозируют значительное, примерно в 2 раза, уменьшение площади лесов Сибири (Tchebakova et al., 2009) и соответствующее увеличение площади сухих степей и полупустынь за счет южных территорий лесной зоны, что существенно повлияет на биоразнообразие, уровень жизни местного населения и условия существования дикой фауны. Прогнозы по другим моделям менее катастрофичны (Gustafson et al., 2010, 2011).

Особые опасности грозят территориям с повышенным водным стрессом, особенно в экотоне лес–степь. Потери лесов на юге не будут

компенсированы продвижением лесов на север, и в целом следует ожидать значительных сокращений биомассы лесных экосистем на пансибирском пространстве. Величина абсолютных потерь будет усиливаться нарушениями. Экстремальные климатические явления (засухи, тепловые волны) будут больше влиять на устойчивость лесов, чем изменения в средних климатических показателях.

Влияя на альбедо, ИК усилят обратную связь изменений земельного покрова с климатической системой Земли, особенно в долгосрочной перспективе. Темнохвойные леса (с преобладанием *Picea* spp., *Abies* spp. и *Pinus sibirica*) могут иметь конкурентное преимущество над светлохвойными (с господством *Larix* spp. и *Pinus silvestris*), но при умеренных сценариях изменения эмиссий и достаточном количестве доступной влаги. Они обычно имеют низкое альбедо в силу, как правило, более высокого возраста, больших значений листового индекса и сомкнутости полога. Однако они более других формаций подвержены интенсивным пожарам, в том числе уничтожающим древостой, и повреждениям вредителями, что обуславливает их замещение более устойчивыми к ИК древесными породами и фрагментацию лесного покрова. Светлохвойные и лиственные леса обычно имеют более высокое альбедо, особенно зимой, и менее подвержены катастрофичным нарушениям. Таяние вечной мерзлоты расширяет потенциальные местообитания для темнохвойных пород, но значительное потепление увеличит влияние пожаров и нарушений вредителями. В итоге ожидается уменьшение площади темнохвойных лесов, количества углерода в них и биоразнообразия.

Влияние повышенной концентрации CO_2 (elevated [eCO_2]) на продуктивность лесов остается недостаточно понятным, особенно для boreальных лесов. Несмотря на многочисленные опыты и модельные расчеты (например, Ciais et al., 2005), подтверждающие удобряющее влияние [eCO_2], вопрос этот не нашел пока своего окончательного решения. Причина этого как в многофакторности формирования продуктивности естественных лесов, так и в сложных физиологических процессах в лесах в условиях ИК. Важен факт, что [eCO_2] способствует уменьшению расхода воды. Тем не менее исследование лесов США показало, что потребуется 72%-е увеличение эффективности использования воды, чтобы компенсировать ухудшение роста лесов при реализации сценария RCP 8.5 (Charney et al., 2016).

В целом исследования накапливают все больше свидетельств того, что поглощение углерода глобальными лесами будет уменьшаться вследствие эффекта насыщения (Nabuurs et al., 2013), увеличения отпада, обусловленного увеличением сухости климата, интенсификации нарушений и сдвига биомов (Allen et al., 2010; Millar, Stephenson, 2015), и в результате положительный эффект возрастания температуры в бореальных лесах может быть нейтрализован (Piao et al., 2014).

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕХОДА К УУЛ

Концепция УУЛ основывается на наборе принципов, главнейшими из которых являются знание и оценка множественных ценностей леса, поддержание состояния этих ценностей в определенном диапазоне, необходимость адаптивного подхода в меняющемся мире и всесторонняя поддержка процессов получения новых знаний и обучения с непосредственным их использованием в практике лесопользования (Sverdrup, Stjernquist, 2002; Burton et al., 2003; Climate Change..., 2014; Chen et al., 2016; Iwama et al., 2016).

Оценка экосистемных функций и услуг.

Непрерывное обеспечение многофункциональной роли лесов – центральная черта УУЛ. В этом смысле УУЛ есть прямое развитие основополагающей идеи российского классического лесного хозяйства – принципа многоцелевого непрерывного и неистощительного пользования лесом, хотя климатические изменения и уже состоявшийся переход развитых стран от традиционного монофункционального сырьевого понимания лесного хозяйства к осознанию его экологических и социальных функций вносят изменения в философию и практику взаимоотношений человека и леса. Поскольку ИК создают многочисленные риски для устойчивого функционирования и поддержания жизнеспособности леса, определяющей чертой практического лесного хозяйства становится лесопользование, устойчивое к рискам (risk resilient forest management), при этом под устойчивостью понимается «способность системы переносить нарушения и реорганизовываться, сохраняя существенно те же самые функции, структуру, идентичность и обратные связи» (Walker et al., 2004).

Экосистемные функции включают все природные процессы, которые контролируют потоки

энергии, питательных веществ и органического вещества в лесных экосистемах (Cardinale et al., 2012). Они обеспечивают многочисленные экосистемные услуги (полезности), которые обычно классифицируют в 4 обобщенные категории: 1) продукционные функции и соответствующие услуги экосистем по предоставлению ресурсов (заготовка древесины, лекарственные и пищевые растения, биоэнергия); 2) функции местобитаний и поддерживающие услуги (поддержка биоразнообразия, обеспечение питательными веществами, первичная продукция); 3) регулирующие функции и услуги (регулирование климата, поглощение углерода, охрана вод и почв); 4) информационные функции и культурные услуги (рекреация, памятники природы и прочее) (MEA..., 2005). Отметим, что А. С. Шейнгауз и А. П. Сапожников (1983) ранее предложили сходную по принципам классификацию, выделив 4 класса и 29 обобщенных групп экосистемных функций леса.

Лес представляет собой сложную динамическую стохастическую открытую систему с многочисленными влияниями, откликами и обратными связями, которые существенно модифицируются климатическими изменениями. Множественные экосистемные функции леса представляют сложную картину взаимодействий, которые в простейшей классификации могут быть разделены на синергетические, нейтральные, конкурентные и альтернативные (взаимоисключающие) (Шейнгауз, Сапожников, 1989). Важной особенностью понимания проблемы является принцип «равнозначности, но не равноценности функций» (Шейнгауз, Сапожников, 1983), ибо реальная ценность функций (особенно тех, которые еще не востребованы или не осознаны человеком сегодня) неизвестна. Поиск оптимальных решений и компромисса между различными функциями в рамках парадигмы многоцелевого лесопользования представляет собой исключительно трудную задачу вследствие сложности системы, разнообразия интересов различных институций и лиц, вовлеченных в лесные отношения, динамического характера, нелинейных тенденций и взаимосвязей экосистемных функций и управленческих решений, неопределенности в оценке проблем будущего, которые требуют принятия решений сегодня. Основную сложность перехода к УУЛ в России представляет преодоление противоречия между «равноправным» рассмотрением всех экосистемных функций леса в практике лесопользования и традиционным монофунк-

циональным восприятием леса как источника древесины, тем более что в новой парадигме возникают сложные вопросы социально-управленческого плана относительно функций общего пользования: 1) где формируются не рыночные функции (т. е. экологические и социальные); 2) кто должен и кто согласен платить за предоставляемые услуги такого типа; 3) как разработать механизм оплаты услуг их потребителем. Очевидно, что законодательно установленное деление лесов по функциональному назначению должно быть увязано с районированными системами УУЛ.

Если вопросы биофизической оценки функций и услуг лесных экосистем (например, водоохранная и водорегулирующая роль леса, углеродный бюджет) изучались российской лесной наукой достаточно подробно, то экономическая оценка их на более или менее современной основе не проводилась. Это один из срочных специальных исследовательских вопросов, без решения которого научно обоснованный переход к УУЛ невозможен: общество и лица, принимающие решения, должны знать истинную цену леса. В литературе описаны многочисленные предложения по экономической оценке экосистемных функций лесов. Применение их дает различные результаты. Так, Costanza et al. (2014) оценили годовую стоимость экосистемных функций лесов планеты в 2011 г. в 124.8 триллиона долларов США (цена доллара 2007 г.), т. е. порядка 3000 долларов за 1 га. Однако вопрос нахождения компромисса между ними (trade-off) в системах многоцелевого лесопользования остается сферой дискуссий. В большей своей части предложения сводятся к тем или иным процедурам многокритериальной оптимизации (Mazziotto et al., 2017), базирующимся, как правило, на взвешивании ландшафтных единиц по их экономической ценности, хотя этот процесс сопровождается существенными методическими сложностями (Roy, Mousseau, 1996). Решение этой проблемы для России представляется целесообразным, будучи основанным на государственной собственности на леса и их законодательно установленное распределение по спектру основных экосистемных функций (Shvidenko et al., 2015).

Районирование. Структура районирования в целях УУЛ определяется целесообразным масштабом разработки и воплощения региональных программ УУЛ. Рабочий метод районирования – наложение будущих климатических условий на синтез существующих природных

и лесных районирований страны. Первоначальный шаг к такому синтезу был сделан при разработке экологического районирования лесного фонда (Швиденко и др., 2001). Две основные классификационные единицы этого районирования включают экологический регион (экорегion) и субэкорегion. Экорегions классифицировались по следующим основным критериям: 1) однородность природной среды (климата, почв и рельефа) и естественного растительного покрова на уровне лесорастительных подзон и больших ландшафтных образований (горных и равнинных территорий); 2) сходные характер и интенсивность антропогенного воздействия на природные ландшафты (региональные системы лесного хозяйства и лесозексплуатации, уровни загрязнений), однородность режимов природных нарушений и степени трансформации естественного растительного покрова; 3) сопоставимость вклада экорегions в основные биогеохимические циклы (углеродный, азотный, гидрологический), трактуемая на уровне таких показателей, как фитомасса и чистая первичная продукция; 4) учитывая практическую направленность такого районирования, целесообразно сохранить условие, что границы экорегions не могут пересекать границы субъектов РФ. К перечисленным критериям должны быть добавлены уровни уязвимости лесов при будущих климатических условиях (например, критический, высокий и умеренный в пределах основных сценариев RCP и SSP).

Территория страны была разделена на 143 экорегions. Анализ климатических карт будущего показывает, что в некоторых случаях целесообразно объединение соседних экорегions, а в других, например в высоких широтах, экорегion может оказаться слишком общей единицей для оценки экосистемных функций и специфики планирования систем УУЛ. В таких случаях возможно использование более детальной единицы классификации – субэкорегions, ограниченного природными рубежами и по однородности природной среды в основных чертах совпадающего с классическим определением ландшафта (Солнцев, 1962). В целом пространственный масштаб «экорегion–субэкорегion» представляется адекватным для разработки региональных программ перехода к УУЛ.

Районирование УУЛ имеет нетрадиционные черты, являясь, по существу, динамическим как в смысле фактических изменений границ основных классификационных единиц во времени, обусловливаемых ИК, так и изменений целесо-

образных хозяйственных воздействий. Вторая важная черта – его многовариантность, следующая из необходимости рассмотрения различных сценариев.

Информационное обеспечение. Одними из определяющих условий перехода к УУЛ являются наличие постоянно обновляющейся с учетом реалий меняющегося мира информации и ее использование для принятия решений. Сегодняшнее состояние лесосчетных работ не может удовлетворить требования УУЛ как по объему, так и по сути поставляемой информации. Стратегическое решение этой проблемы видится в создании единой системы учета лесов России, которая объединила бы на системной основе современные лесоустройство, лесной мониторинг и национальную (государственную) инвентаризацию лесов (ГИЛ), адаптированные к специфике непрерывных изменений. Основные несоответствия действующей системы лесоустройства принципам УУЛ сводятся к следующему:

1. Лесохозяйственные регламенты и лесные планы лишены единой информационно-методической основы, которая позволяла бы реализовать главнейшую предпосылку *правильного лесного хозяйства* – принцип неистощительного и постоянного многоцелевого пользования на ландшафтно-экосистемной основе. Устранение этого недостатка требует проведения регламентированных лесосчетных работ для всего объекта хозяйствования с последующим составлением плана организации лесного хозяйства, включая все арендные участки. Заметим, что реализованный в настоящее время принцип аренды и взаимоотношений с арендаторами не обеспечивает соблюдения критериев и индикаторов УУЛ и может служить одним из существенных препятствий перехода к УУЛ в России.

2. Современная пространственная реализация лесоуправления и лесопользования недостаточно увязана с экосистемными и ландшафтными особенностями регулируемого объекта, что исключает возможность последовательного соблюдения лесохозяйственных правил. Несмотря на понимание профессионалами на протяжении десятилетий целесообразности перехода к ведению хозяйства на ландшафтно-типологической (ландшафтно-экосистемной) основе (Шутов, 1994), регулирование лесопользования (как и иных лесохозяйственных мероприятий) последние 100 лет проводилось на административной основе; чтобы обеспечить минимальные лесохозяйственно-экологические требования, принимались многочисленные ведомственные

инструкции и правила. Нередко (особенно в сложных экологических условиях, например в горных лесах) эти требования не могли быть выполнены (например, размещение лесосек и способов рубок при установленной расчетной лесосеке). Внедрение геоинформационных систем в практику лесоуправления позволяет перейти к принципиально новым подходам в пространственной реализации лесохозяйственных мероприятий, элиминируя в том числе влияние искусственных рубежей административного деления и аренды.

3. Современное лесоустройство не оценивает значительное количество показателей, необходимых для оценки экосистемных функций леса: экологических (биоразнообразия, фитомассы, текущего прироста, устойчивости и жизненности экосистем, устойчивости ландшафтов и др.), экономических (доступности, качества) и социальных.

Два других лесосчетных компонента – лесной мониторинг и государственная инвентаризация лесов (ГИЛ) – системно с лесоустройством не увязаны. Официально основополагающие документы ГИЛ не публиковались. Если судить по материалам, появлявшимся периодически в интернете, в теоретическом обосновании ГИЛ и при разработке ее дизайна допущены принципиальные методологические ошибки (такие как отсутствие унифицированного характера размещения наземных выборочных единиц, предварительная стратификация лесов по таксационным показателям древостоев, отсутствие системного применения средств ДЗЗ, включение в ГИЛ не свойственных ей задач и др.), которые ставят под сомнение возможность достижения основополагающих целей ГИЛ.

Одной из важнейших информационных задач УУЛ является оценка устойчивости лесных экосистем и ландшафтов в целом в целях раннего обнаружения нежелательных реакций лесных экосистем на ИК, а также для оценки результатов адаптивных (повышающих устойчивость к нарушениям) лесохозяйственных мероприятий. Это требует наличия количественных показателей, которые отражали бы управленческие цели как в нарушенных, так и в ненарушенных экосистемах/ландшафтах на четко определенных временных отрезках. Основу таких индикаторов составляют структурные и параметрические показатели древостоев и ландшафта (De Rose, Long, 2014), хотя в каждом конкретном случае они специфические для индивидуального ландшафта и целей лесоуправления. В обосновании

индикаторов устойчивости могут использоваться пределы исторически сложившейся изменчивости экосистемных свойств (Seidl et al., 2016); темпы восстановления экосистем после нарушений (например, состава пород и величины наземной биомассы после пожаров) (Duveneck, Scheller, 2015); «климатические портреты» древесных пород, описывающие пределы их оптимального, толерантного и критического отношения к ИК (Didukh, 2011) и др.

Многие исследования рассматривают связь устойчивости с биоразнообразием. В целом положительная связь «биоразнообразие–продуктивность» подтверждена неоднократно в разных масштабах (Zhang, Wang, 2012; Liang et al., 2016). Ландшафты, которые имеют большее разнообразие породного состава, более высокие запасы и уровни интенсивности ведения хозяйства, как правило, обладают более высокой социально-экологической устойчивостью и позволяют максимизировать экономические показатели, такие как чистый доход и чистая приведенная стоимость (Dymond et al., 2015). Увеличение биоразнообразия может быть экономически выгодным подходом к увеличению устойчивости, например, в насаждениях, поврежденных насекомыми, путем раннего прореживания и посадки дополнительных пород. Поскольку использование сырьевых функций лесов (заготовка древесины) в современном практическом применении, как правило, ведет к деградации экологических функций, следование принципам УУЛ требует классификации лесов по типам лесного хозяйства и отказа от традиционных положений, обусловленных экономикой сырьевого подхода, например, отхода от сплошнолесосечного хозяйства, и может ставить под сомнение всеобщность целесообразности стремления к интенсификации лесного хозяйства. Вместе с тем реализация модели интенсивного использования и воспроизводства лесов на ограниченных участках лесного фонда в лучших лесорастительных условиях с применением передовых технологий позволяет в разы повысить продуктивность древостоев. Тем самым обоснованное применение идеи интенсификации позволяет сократить площади вырубок в лесах, основным целевым назначением которых является получение нересурсных экосистемных услуг (Бондарев и др., 2015).

Очевидно, что особое внимание при практической реализации принципов УУЛ следует обратить на разработку системы классификации лесов по типам лесного хозяйства, т. е. на вы-

деление категорий лесных земель, дифференцированных в соответствии с их функциональным назначением.

Поддержка биоразнообразия предполагает выращивание сложных по структуре, смешанных разновозрастных древостоев; сохранение лесной среды; предотвращение обезлесивания. В зависимости от критических факторов, создающих риски, оптимальная структура ландшафтов должна определяться на зонально-типологической основе с соответствующим выделением и пространственным распределением защитных и стабилизирующих элементов.

Адаптация как стержневая идея УУЛ.

Идентификация усилий и стратегий, которые были бы в состоянии минимизировать отрицательные последствия климатических изменений, является главной задачей адаптации. Существуют три основные стратегии адаптации лесного хозяйства к ИК: 1) политика невмешательства (никаких адаптационных мероприятий); 2) реактивная адаптация (традиционная и доминантная во многих странах модель лесного хозяйства, направленная на эффективное устранение последствий нарушений); 3) проактивная адаптация, составляющая ядро лесоправления, устойчивого к рискам.

Каждой древесной породе свойствен адаптивный потенциал, который может быть определен как ее возможность реагировать на изменение внешней среды путем модификации ее собственной генетической структуры и/или ее фенотипической представленности. Ключевыми взаимосвязанными характеристиками адаптивного лесоправления являются: понимание неопределенностей во всех суждениях, относящихся к будущему; вариантный поиск системы действий, которая является «лучшей» в каждом конкретном случае; тщательный выбор и всесторонний анализ того, что предполагается реализовать; особая роль новейшего знания и последних научных результатов в процессе принятия решений; мониторинг ключевых показателей отклика; анализ результатов в терминах исходных планов; встраивание полученных результатов в принимаемые решения.

Переход к адаптивному устойчивому управлению лесами (АУУЛ) сопровождается сложными и необычными для традиционного лесного хозяйства проблемами, связанными с необходимостью принятия решений, относящихся к нечетким системам значительной неопределенности; с целесообразностью рассматривать варианты стратегии, которые интегрировали

бы меры по адаптации и смягчению; с необходимостью основывать минимальные стандарты мероприятий по смягчению предельными возможностями адаптации и включать в рассмотрение элементы трансформирующей адаптации; с наличием нелинейных откликов и обратных связей в лесных экосистемах; с неопределенностями экономического и социального развития и многим другим. По своей системной сущности АУУЛ является недостаточно определенной и квазиуправляемой задачей. Достижение определенного минимума адаптации есть главнейшая предпосылка использования лесов для смягчения климатических изменений. По сути, адаптация и смягчение являются неразрывными, хотя имеют разные цели, разные пространственные и временные масштабы. Уязвимость (или ее антитеза – устойчивость) будет больше зависеть от непрямых климатических эффектов, которые усиливают режимы нарушений, чем от непосредственных воздействий на экосистемные процессы (физиология фотосинтеза, возобновление).

Успешный процесс адаптации предполагает наличие целенаправленной лесной политики, строгой и взаимосвязанной институциональной базы, программ профессионального обучения, финансовых ресурсов, понимания приоритетов в реализации адаптационных проектов. Состав национальной политики по адаптации зависит от временных масштабов планирования, включая: 1) непосредственные адаптационные мероприятия по смягчению экстремальных проявлений ИК и 2) долгосрочную адаптационную политику, реализуемую на различных уровнях (национальном, региональном, локальном). Краткосрочные мероприятия есть часть лесопользования, направленного на уменьшение рисков и ущерба от нарушений, а долгосрочные направлены в основном на создание устойчивых лесов будущего. ИК предопределяют возрастание количества пород и занимаемой ими площади, которые перемещаются из зон экологического оптимума и толерантности в менее приемлемые климатические условия (Schelhaas et al., 2015). Для условий России это задача особой сложности, учитывая инерционность состава и размещения пород в естественных лесах и часто возникающую необходимость интенсивной замены древесных пород, например, путем сокращения ротационного периода. Генетические и селекционные мероприятия (такие как интродукция засухоустойчивых пород, сохранение генетических банков семян местных пород,

подходящих для лесовосстановления) приобретают особое значение в этом процессе.

Адаптация и опережающая стратегия смягчения должны быть непрерывным проактивным процессом, включая конкретные и целеориентированные усилия, направленные на уменьшение уязвимости лесных экосистем или усиление их адаптивной способности. В этом смысле адаптивное лесное хозяйство определяется как управляющая система, которая признает недостаток исчерпывающего и конкретного знания в части понимания путей, как лесная система функционирует, и наличие неопределенностей, которые могут доминировать в выборе целесообразного решения (Borrini-Feyerabend et al., 2000).

Центральной в разработке программ адаптации и смягчения ИК является разработка робастных (устойчивых к ошибкам) подходов. Робастные системы мероприятий позволяют: 1) обеспечивать долгосрочную устойчивость поведения систем в условиях рассматриваемых сценариев; 2) учитывать наличие экстремальных явлений, что требует специальных моделей; 3) рассматривать неопределенности в возможно исчерпывающем и явном виде; 4) быть достаточно эластичными с тем, чтобы обеспечивать разнообразие решений в зависимости от ожидаемых рисков и стоимости, предпочтений институций и лиц, принимающих решения; 5) рассматривать в явном пространственно-временном виде экологические, экономические и социальные аспекты; 6) оценивать коллективный риск; 7) включать критерии безопасности, ограничения и показатели выполнения.

Меры по адаптации и смягчению эффективны только в том случае, если являются частью более широкой стратегии, которая вовлекает все соответствующие секторы национальной экономики, в частности энергию, индустрию, сельское хозяйство, туризм, объединенные в общий политический и институциональный каркас. Лес должен быть частью общей стратегии адаптации во всех секторах, которые имеют отношение к лесным экосистемным услугам, в том числе и к тем, которые влияют на снижение социальной уязвимости.

Система мероприятий по смягчению ИК средствами лесного хозяйства включает все мероприятия, направленные на уменьшение эмиссий парниковых газов и/или на секвестр углерода из атмосферы с целью стабилизации концентрации парниковых газов. Методическая основа такой системы хорошо развита и

включает: управление углеродным бюджетом как составная часть УУЛ; создание и целенаправленное управление лесами с высоким углеродопоглощающим потенциалом; расширение таких лесов посредством лесовосстановления и лесоразведения; уменьшение обезлесивания; создание дружеской среды для инвестиций и рыночного доступа к лесным продуктам, произведенным устойчивым образом; увеличение использования лесных продуктов длительного пользования и для производства биоэнергии; замещение лесными продуктами материалов, менее эффективных с экологической точки зрения.

Многочисленные исследования, выполненные преимущественно в развитых странах, свидетельствуют, что леса являются эффективным средством смягчения ИК как по значимости влияния на климатическую систему, так и с экономической точки зрения. ИРСС оценил глобальный потенциал смягчения в пределах 0.2–13.8 ГтCO₂ эквивалента (э)/год при стоимости ≤ 100 долл. США/тCO₂ эквивалента в 2030 г. (Smith et al., 2014). FAO (2016) обобщила, что лесохозяйственные мероприятия могут обеспечить от 1.9 до 5.5 ГтCO₂э/год к 2040 г. при стоимости ≤ 20 долл. США/тCO₂э. Было показано, что одновременное воплощение нескольких стратегий смягчения на региональном уровне позволяет достичь более значительных результатов, чем использование только одной (Xu et al., 2017 и др.).

Опубликованные результаты исследований по оценке потенциала смягчения ИК средствами лесного хозяйства России единичны. Они ограничены либо постановочным рассмотрением теоретического потенциала, либо первыми попытками обозначить роль экономических факторов в решении проблемы. Это определяет большой разброс оценок – от величин порядка 20–30 Тг С · год⁻¹ (с учетом современных экономических условий) до 200 Тг С · год⁻¹ («реальный» сценарий) и до 600 Тг С · год⁻¹ в «теоретически возможном» сценарии (Исаев и др., 1995; Швиденко и др., 2003). Попытки включить экономические механизмы Протокола Киото были ограничены немногими иллюстративными проектами.

При наличии значительных площадей, не покрытых лесом, и нелесных земель, что, главным образом, свойственно высоким широтам, возможности лесоразведения в целях смягчения ИК ограничены отсутствием инфраструктуры и низкой продуктивностью лесов. Вместе с тем темпы продвижения на север климатических

условий, пригодных для жизни леса, ожидаются как минимум на порядок выше, чем биологически обусловленная скорость естественного продвижения лесного покрова. Поэтому проблема доставки семян лесных пород в обширные безлесные территории, не имеющие источников осеменения, и разработка эффективных технологий лесоразведения являются важным средством смягчения ИК. Создание лесов с высоким углеродопоглощающим потенциалом требует наличия продуктивных земель и существенного усовершенствования генетического обеспечения лесокультурных работ. Неудовлетворительное состояние с полноценным использованием лесосечного фонда и заготовленных древесных продуктов создает значительный потенциал в части замещения энергоемких продуктов и выработки биоэнергии. Решающее значение имеет также минимизация наиболее опасных природных нарушений – пожаров и вспышек лесных вредителей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО УУЛ

Во всех своих существенных проявлениях – в познании лесообразовательного процесса, оценке условий местопроизрастания, планировании и осуществлении основных лесохозяйственных мероприятий – классическое лесоводство планировало будущее, базируясь на знании и опыте прошлого, которое находилось в пределах эволюционно сложившейся природной изменчивости. Такой подход становится все менее надежным в постоянно меняющемся мире. Уже сейчас лесные профессионалы часто не в состоянии охватить все сложности выбора оптимального решения в планировании устойчивых лесов будущего. Поэтому использование новых средств управления лесами, в первую очередь моделей различной природы, становится научно-технологической основой перехода к АУУЛ, которое в меняющемся мире требует новой философии и новой методологии, следующей базовым требованиям системного анализа. В идеальном случае эта методология приводит к широкому использованию открытых итеративных модульных систем с взаимосвязанными комплексами интегральных моделей, библиотеками взаимосвязанных практических приложений и системами наблюдений.

Система моделей, необходимых для обоснования лесов будущего, включает различные типы – биогеохимические, популяционной динамики, демографические и фенологические

модели древесных пород, модели распространения пород и различной сложности – от традиционных, широко применяющихся в современном лесном хозяйстве (таких, например, как таблицы хода роста, модифицированные с учетом новых климатических условий), до интегральных, объединяющих компоненты разной природы – экологические, экономические и социальные. Разработка интегральных моделей сопровождается необходимостью осознания сложных проблем познавательного характера и поиска компромиссов в процессе их решения. Достижения информационных технологий и разработка методологии интегрированного моделирования ведут к увеличению сложности. Множество экосистемных функций, которые целесообразно включать в интегрированные модели, предопределяет повышенный уровень нелинейности связей. Однако теория и уровень знаний интегральных взаимоотношений часто препятствуют возможностям детализации модельной формализации, поэтому сегодняшние методы интегрального моделирования в значительной мере включают эвристические подходы и предопределяют необходимость вовлечения профессионалов из разных отраслей знания.

Очевидно, что точное предсказание будущих траекторий развития социально-экономических систем невозможно. Неопределенности прогнозов зависят от современного уровня знаний и возможности разработки соответствующих сценариев, базирующихся на робастных стратегиях и решениях.

Предсказания воздействий меняющегося климата на леса требует наличия моделей, которые целенаправленно формализовали бы накопленные знания с тем, чтобы оценить поведение лесных экосистем в новых условиях. Среди множества моделей, применяемых для оценки влияния климатических изменений на бореальные и умеренные леса, наиболее важны два класса. Один из них – это класс экофизиологических моделей, которые описывают рост и потоки вещества для лесного участка или древостоя (например, BGC-MAN – Running, Gower, 1991; PnET-CN – Aber et al., 1995). Другой класс составляют динамические глобальные модели растительности Dynamic Global Vegetation Models (например, SEIB-DGVM – Sato et al., 2007; LPJ-DGVM – Quegan et al., 2011 и др.), которые моделируют конкуренцию между функциональными типами растительности (plant functional types, PFTs) в региональном или глобальном масштабе (Medlyn et al., 2011). Оба класса моде-

лей описывают механизм фотосинтеза и конкуренции за свет и воду и являются относительно надежным инструментом предсказания поведения лесов в новых условиях, которые отличаются от тех, при которых леса росли в прошлом (Gustafson, 2013).

DGVMs играют ключевую роль в объяснении обратной связи растительности с климатом, как правило, в рамках моделей общей циркуляции атмосферы, предсказывая пространственное распределение PFTs в глобальном масштабе. Соответствующие параметры PFTs включают альбедо, эвапотранспирацию и характеристики пограничного слоя, определяющие основные черты растительности, представленной PFTs. Фундаментальная предпосылка DGVMs заключается в том, что конкурентные взаимодействия между PFTs могут быть предсказаны на основе рассмотрения очень детальных физиологических и демографических процессов, поскольку последние определяются общими климатическими процессами (Fisher et al., 2010). Относительное преобладание PFTs и их комбинации представляют различные альтернативные состояния экосистем. Перманентность некоторой экосистемы с точки зрения климатических изменений может быть количественно определена как ее экологическая устойчивость (Drever et al., 2006). Экологическая устойчивость есть эмерджентное свойство взаимодействий между медленными и быстрыми процессами, протекающими в различных пространственных масштабах. Вместе с тем DGVMs не моделируют пространственные процессы в явном виде, что существенно ограничивает возможность применения этого класса моделей в практике лесного хозяйства, поэтому они используются для оценки крупномасштабных стратегических вопросов взаимодействия леса и изменения внешней среды (Wullschlegel et al., 2014).

Лесные ландшафтные модели (Forest Landscape Models, FLMs) представляют собой полезное средство для предсказания динамики лесов, поскольку они явным образом учитывают большинство факторов, которые определяют структуру лесных экосистем в пространственном и временном масштабе ландшафта, и моделируют их как процессы в масштабах, промежуточных между экофизиологическими моделями и DGVMs. FLMs в отличие от DGVMs рассматривают лесные экосистемы в пространственно явном виде и на достаточно высоком разрешении (порядка 10–200 м), а некоторые из них моделируют конкуренцию и сукцессии на уровне дре-

весных пород, рассматривая распространение семян и нарушения как отдельные процессы, так что их взаимодействие выступает как эмерджентное свойство влияния климата, абиотических компонентов внешней среды и состояния растительности. Различные FLMs используют разные комбинации механистических и феноменологических компонент для моделирования роста и сукцессий (Schelhaas et al., 2004). Оба компонента содержат значительную неопределенность, но экстраполяционная неопределенность феноменологического подхода, как правило, превосходит неопределенность параметров механистического подхода (Cuddington et al., 2013; Gustafson, 2013). Моделирование пространственных процессов в явном виде (распространение семян, природные нарушения) существенно не только с научной точки зрения (поскольку влияет на точность предсказания биомассы и альбедо), но и как основа важных лесоуправленческих решений.

Некоторые недавно разработанные модели второго поколения DGVMs в явном виде воспроизводят демографические процессы нарушений формирования древостоя и конкуренцию, а также отпад деревьев, но даже они «не позволяют адекватно моделировать пространственные экологические процессы, показывая неверные реакции на климатические и атмосферные изменения» (Fisher et al., 2010). В силу своей глобальной сущности DGVMs могут неудовлетворительно описывать важные региональные черты, например влияние многолетней мерзлоты на продукционный процесс (Швиденко, Щепаченко, 2014).

В качестве перспективного примера ландшафтных моделей назовем LANDIS-II (Scheller et al., 2007). Эта модель описывает рост, гибель и сукцессии когорт деревьев с использованием клеток грида размером 10–500 м, которые взаимодействуют пространственно посредством распространения семян и контагиозных нарушений. LANDIS-II позволяет составить ландшафтную карту и матрицу экосистемных показателей на каждый период времени на основе выбора сукцессионных модулей и системы хозяйственных мероприятий и нарушений. Недавно разработан механистический модуль (PnET-Succession), базирующийся на первых принципах, относящихся к росту и фотосинтезу (De Bruijn et al., 2014). Этот модуль использует алгоритм из экофизиологической модели PnET-II (Aber et al., 1995) и является заметным достижением в лесном ландшафтном моделиро-

вании, поскольку механистически моделирует фотосинтез, как в DGVMs и экофизиологических моделях. Этот новый модельный подход в сравнении с другими FLMs, которые оперируют в сходном промежуточном масштабе, имеет ряд преимуществ. Использование параметров типа «глубины корневой зоны» и «фракции утечки» могут быть использованы для моделирования изменений в вечной мерзлоте, контролировать глубину активного слоя и наличие или отсутствие непроницаемого мерзлого слоя ниже корневой зоны. PnET-Succession также включает породные параметры водного стресса для низких (засуха) и чрезмерно высоких (заболачивание) показателей водного потенциала, представляя возможности для соответствующего моделирования. Модель включает оценку влияния концентрации CO₂ на рост, проводимость и эффективность использования доступной воды; влияние температуры на фотосинтез, дыхание и эвапотранспирацию; влияние осадков и водопотребления на водный потенциал; проникновение света в зависимости от приходящей радиации и структуры сомкнутости полога.

В целом системное применение комплекса эмпирических, процессных и интегральных моделей является необходимым условием новой методологии планирования лесохозяйственных мероприятий независимо от того, будет ли такая методология реализована в рамках лесохозяйственного регламента или плана организации и ведения лесного хозяйства. Определяюще важно иметь руководящий документ такого типа на объект управления (лесничество), который был бы базовым для всех последующих лесоуправленческих решений, в том числе обязательных для ведения хозяйства на арендных участках.

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ПЕРЕХОДА К УУЛ

Переход к адаптивному устойчивому управлению лесами в российском лесном хозяйстве требует разработки последовательной системы действий, реализуемой как на общегосударственном уровне, так и в региональных программах АУУЛ, научно-методическая часть которых в главных чертах может быть обозначена следующим образом:

- Выбор совокупности систем ведения лесного хозяйства, перечень которых в первом приближении может включать заповедники; режим управления, «близкий к природе»; многоцеле-

вое хозяйство с выделением некоторых преобладающих целей; сплошнолесосечное хозяйство; короткоротационные плантации с укороченным оборотом (Hengeveld et al., 2012). Существующие классификации лесов по основному функциональному назначению (категории защитности и проч.) могут быть модифицированы в целях детализации региональных схем УУЛ, но конкретный выбор той или иной системы должен базироваться на особенностях и целевой ориентации ландшафта с учетом наиболее вероятных черт будущего климата.

- Обоснование региональных систем индикаторов устойчивости лесных экосистем, а также лесных и агролесных ландшафтов, которые должны служить основой регулирования структуры земельного и лесного покровов ландшафта и показателями мониторинга. Разработка методов оценки приемлемости существующей и обоснование оптимальной структуры агролесных и селитебных ландшафтов.

- Создание эффективной системы охраны лесов от природных нарушений. Необходимость коренного усовершенствования системы охраны от пожаров является не только важной составляющей стратегии адаптации и средством смягчения климатических изменений. В первом приближении эта проблема включает: 1) системный анализ нынешних и будущих региональных пожарных режимов и обоснование 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, состав и строение древостоев; 4) создание системы противопожарного обустройства территории; 5) внедрение эффективной системы лесного мониторинга как компонента интегральных систем наблюдений; 6) создание и техническое оснащение мобильной системы тушения пожаров, выделения необходимых людских, финансовых и технических ресурсов; 7) разработку нового и усовершенствование существующего законодательства и институциональных структур лесоправления; 8) целесообразную международную кооперацию. Эффективная реализация большинства перечисленных задач остается делом будущего, а ряд административных и институциональных решений последних лет нанес труднопоправи-

мый ущерб существовавшей ранее системе пожарной охраны лесов.

- Совершенствование защиты лесов от биогенных нарушений.

- Подбор древесных пород, устойчивых к критическим условиям произрастания и обеспечивающих максимальную продуктивность в данных условиях.

- Создание единой системы учета лесов России на базе модификации и оптимизированном сочетании лесоустройства, лесного мониторинга и ГИЛ, включая: 1) новую систему пространственного лесоустроительного проектирования; 2) оперативную систему мониторинга; 3) ГИЛ, построенную на научно-теоретической основе. Важнейшим условием функционирования такой системы является наличие систем моделей для диагностики ранних изменений и предсказания состояния, здоровья и продуктивности лесных экосистем.

- Разработка методологии и осуществление биофизической и экономической оценок экосистемных функций и услуг лесных экосистем на зонально-типологической основе.

- Разработка целенаправленных программ генетики и селекции в целях поиска и селекции древесных пород, наиболее устойчивых к ожидаемым климатическим изменениям.

- Разработка региональных программ перехода к УУЛ: научные и методические обоснования, набор решающих правил и моделей в целях вариантного обеспечения принятия решений на перспективу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение перечисленных (и ряда других) научно-методических проблем является необходимым, но не достаточным условием перехода к АУУЛ. Этот процесс неосуществим без глубокого пересмотра лесного законодательства страны. По существу, процесс перехода к АУУЛ означает создание новой парадигмы взаимодействия леса и государства. Практически требуется создание новой лесной экономики, которой предстоит решение сложных вопросов, таких как создание и внедрение систем оплаты экосистемных услуг общего пользования, страховых систем и резервных фондов для компенсации увеличивающейся стоимости лесного хозяйства, создание стимулов для поддержки институций и лиц, заинтересованных в лесных отношениях, направленных на поддержку и усиление экологических и социальных функций лесов и т. д.

Сегодняшние потери лесного сектора велики. Восстановление лесной науки на уровне, необходимом для разработки и внедрения АУУЛ, воссоздание «низового» уровня новой сети лесных исследовательских учреждений (лесных опытных станций, опорных пунктов, стационаров) взамен утраченной, решение кадровых проблем, переход к новым системам информационного обеспечения и планирования, изменение менталитета работников, имеющих отношение к лесу, и многое другое потребуют значительных усилий, политической воли и времени.

Состояние лесной отрасли отражает общие процессы, протекающие в стране. Ни обществом в целом, ни органами государственного управления и управления лесами уровень и значимость рисков для лесов России, порождаемых изменениями климата, пока не осознаны. Ни в одном документе, относящемся к лесопромышленности, каких-либо существенных решений (кроме общих слов) по этой проблеме нет. Оценок возможных потерь в результате отсутствия целесообразной опережающей политики, т. е. перехода к адаптивному устойчивому управлению лесами, тоже пока нет. Расчеты, проведенные в других странах, не оптимистичны. Так, ожидается, что вследствие ИК канадская лесная промышленность, где предполагаемые аномалии климата значительно слабее, чем в России, будет терять от 2 до 17 млрд долларов в год (Williamson, Watson, 2010). Высоковероятно, что опоздание с принятием действенных решений приведет к значительным потерям, тем большим, чем длиннее будет период «ничего неделания».

Переход к АУУЛ требует значительных изменений как в философии взаимодействия общества и леса, так и в понимании государством значения леса для нынешнего и будущих поколений. Следует признать, что действующее лесное законодательство России не может обеспечить успешного перехода к АУУЛ, а существующая институциональная структура лесного хозяйства далека от совершенства. Не соответствуют достижению этой цели и нынешний уровень профессиональной подготовки значительной части лесных специалистов, и менталитет лесных управленцев. Сложившаяся практика, когда лесной отраслью на уровне страны и субъектов РФ во многих случаях руководят непрофессионалы, не способствует опережающему решению сложных вопросов, которые глобальные изменения ставят перед лесной отраслью.

Многие вопросы, являющиеся жизненными для будущих поколений, остаются неопре-

деленными и требуют глубинного анализа. Эти вопросы включают среди многих других такие проблемы, как пороговые значения допустимых (не деструктивных) воздействий на лесные экосистемы; нелинейные и многовариантные отклики экосистем на долгосрочную аккумуляцию стресса; разработку теории и практики применения разнообразных моделей обоснования проактивных систем лесохозяйственных мероприятий; принятие решений и разработку робастных программ в условиях неопределенности; разработку интегральных систем наблюдений и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабой С. Д., Астапенко С. А., Голубев Д. В., Ягунов М. Н. Оценка распространения и воздействия на лесной покров насекомых-вредителей в лесах Красноярского края на примере шелкопряда сибирского // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций. VI Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск, 2016. С. 37–40.
- Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Бондарев А. И., Онучин А. А., Читоркин В. В., Соколов В. А. О концептуальных положениях интенсификации использования и воспроизводства лесов Сибири // ИВУЗ. Лесн. журн. 2015. № 6. С. 25–32.
- Государственная программа «Развитие лесного хозяйства» на 2013–2020 гг. Утв. пост. Правительства РФ 15 апреля 2014 г. № 318. М.: Минво природн. рес. и экол. РФ, 2013.
- Государственный совет Российской Федерации. Доклад по увеличению эффективности и развитию лесного сектора на период до 2030 г. М., 2013. 194 с.
- Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2015 год. Федеральная служба РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2016. 67 с.
- Ефремов Д. Ф., Швиденко А. З. Долговременные экологические последствия катастрофических лесных пожаров в лесах Дальнего Востока и их вклад в глобальные процессы // Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне. М.: Мировой банк, Алекс, 2004. С. 66–73.
- Исаев А. С., Коровин Г. Н., Сухих В. И., Титов С. П., Уткин А. И., Голуб А. А., Замолодчиков Д. Г., Пряжников А. А. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством ле-

- совосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр экол. полит., 1995. С. 156.
- Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/
- Манько Ю. И., Гладкова Г. А. Усыхание ели в контексте глобальной деградации темнохвойных лесов. Владивосток: Дальнаука, 2001. 231 с.
- Министерство лесного хозяйства РСФСР. Лесной фонд РСФСР. Стат. сб. Гл. упр. лесн. хоз-ва и охраны леса при Совете Министров РСФСР. М.: Гослесбумиздат, 1962. 628 с.
- Моисеев Н. А. Уроки двухвековой истории лесопользования и учет их при определении ориентиров на будущее // ИВУЗ. Лесн. журн. 2013. № 2. С. 11–26.
- Моисеев Н. А. Лесопользование и лесной сектор России: условия и пути перехода к интенсивной модели // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 7–13.
- Основы государственной политики в области защиты, использования и воспроизводства лесов Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. Правительством РФ 26.09.2013, № 1724-р. М.: Правительство РФ, 2013.
- Петров А. П. Прогноз развития лесного сектора РФ: кризис лесоресурсного менеджмента // Лесн. хоз-во. 2013. № 4. С. 15–18.
- Солнцев Н. А. История физико-географического районирования европейской части СССР // Физико-географическое районирование СССР. М.: МГУ, 1962. С. 6–54.
- Харук В. И., Демидко Д. А., Федотова Е. В., Двинская М. Л., Будник У. А. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Алтая // Сиб. экол. журн. 2016а. № 6. С. 843–854.
- Харук В. И., Им С. Т., Петров И. А., Ягунов М. Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сиб. экол. журн. 2016б. № 5. С. 750–760.
- Чупров Н. П. К проблеме усыхания еловых лесов на европейском Севере // Лесн. хоз-во. 2008. № 1. С. 24–26.
- Швиденко А. З., Ваганов Е. А., Нильссон С. Биосферная роль лесов России на старте третьего тысячелетия: углеродный бюджет и Протокол Киото // Сиб. экол. журн. 2003. № 6. С. 649–658.
- Швиденко А. З., Страхов В. В., Седых В. Н., Соколов В. А., Ефремов Д. Ф. Продуктивность лесов России. III. Пространственный масштаб оценки продуктивности лесов России // Лесохоз. инф. 2001. № 1–2. С. 7–23.
- 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 в 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // ДАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Шейнгауз А. С., Сапожников А. П. Классификация функций лесных ресурсов // Лесоведение. 1983. № 4. С. 3–9.
- Шейнгауз А. С., Сапожников А. П. Оценка сочетаний функций лесных ресурсов – основа организации многоцелевого лесопользования // Лесоведение. 1989. № 1. С. 3–8.
- Шутов И. В. (ред.). Общие принципы стратегии лесопользования и лесовыращивания на ландшафтно-типологической основе // Сб. науч. тр. СПбНИИЛХ. СПб.: СПбНИИЛХ, 1994. С. 134.
- Шутов И. В. Разрушение и воссоздание лесного хозяйства России // Тр. СПбНИИЛХ. СПб.: СПбНИИЛХ, 2003. Вып. 6 (10). 168 с.
- Шутов И. В. Деградация лесного хозяйства России. СПб.: СПбНИИЛХ, 2006. 97 с.
- Aber J. D., Ollinger S. V., Federer C. A., Reich P. B., Goulden M. L., Kicklighter D. W., Melillo J. M., Lathrop R. G. J. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States // Climate Res. 1995. V. 5. P. 207–222.
- Allen C. D., Breshears D. D., McDowell N. G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene // Ecosphere. 2015. V. 6. N. 8. Art 129. DOI: 10.1890/ES15-00203.1
- Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D. D., Hogg E. H. (T.), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S. W., Semerci A., Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risk for forests // For. Ecol. Manag. 2010. V. 259. Iss. 4. P. 660–684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
- Anderegg W. R. L., Martinez-Vilalta J., Cailleret M., Camarero J. J., Ewers B., Galbraith D., Gessler A., Grote R., Huang C. Y., Levick S., Powell T. L., Rowland L., Sánchez-Salguero R., Trotsiuk V. When a tree dies in the forest: Scaling climate-driven tree mortality to ecosystem fluxes.

- Ecosystems. 2016. DOI: 10.1007/s10021-016-9982-1
- Bastos A., Gouvenia C. V., Trigo R. M.* Analysing the spatio-temporal impacts of the 2003 and 2010 extreme heatwaves on plant productivity in Europe // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. N. 13. P. 3421–3435. DOI: 10.5194/bg-11-3421-2014
- Borrini-Feyerabend G., Farvar M. T., Nguinguiri J. C., Ndangang V. A.* Co-management of natural resources: organizing, negotiating and learning-by-doing. Heidelberg, Germany, GTZ and IUCN: Kasperek Verlag, 2000. 245 p.
- Burton P. J., Messier C., Smith D. W., Adamowicz W. L.* (Eds.). Towards sustainable management of the boreal forest. Ottawa, Canada: NRC Res. Press, 2003. 1039 p.
- Cardinale B. J., Duffy J. E., Gonzalez A., Hooper D. U., Perrings C., Venail P., Narwani A., Mace G. M., Tilman D., Wardle D. A., Kinzig A. P., Daily G. C., Loreau M., Grace J. B., Larigauderie A., Srivastava D., Naeem S.* Biodiversity loss and its impacts on humanity // *Nature*. 2012. V. 486. P. 59–67.
- Charney N. D., Babst F., Poulter B., Record S., Trouet V. M., Frank D., Enquist B. J., Evans M. E.* Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth // *Ecol. Letters*. 2016. V. 19. N. 9. P. 1119–1128. DOI: 10.1111/ele.12650
- Chen S., Shahi C., Chen H.* Economic and ecological trade-off analysis of forest ecosystems: options for boreal forests // *Environ. Rev.* 2016. V. 24. P. 1–14. DOI: 10.1139/er-2015-090
- Ciais P., Janssens I., Shvidenko A., Wirth C., Malhi Y., Grave J., Schulze E-D., Heimann M., Phillips O., Dolman A. J.* The potential for rising CO₂ to account for the observed uptake of carbon by tropical, temperate and boreal forest biomes // *H. Griffith, P. Jarvis* (Eds.). The carbon balance of forest biomes. Taylor & Francis Group, 2005. P. 109–150.
- Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. IPCC Working Group II Contribution to AR 5, Yokohama, Japan, 2014.
- Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farber S., Turner R. K.* Changes in the global value of ecosystem services // *Glob. Environ. Change*. 2014. V. 26. P. 152–158.
- Cuddington K., Fortin M.-J., Gerber L. R., Hastings A., Liebhold A., O'Connor M., Ray C.* Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world // *Ecosphere*. 2013. V. 4. Iss. 2. DOI: 10.1890/ES12-00178.1
- De Bruijn A., Gustafson E. J., Sturtevant B. R., Foster J. R., Miranda B. R., Lichti N. I., Jacobs D. F.* Toward more robust projections of forest landscape dynamics under novel environmental conditions: embedding PnET within LANDIS-II // *Ecol. Model.* 2014. V. 287. P. 44–57.
- De Rose R. J., Long J. N.* Resistance and resilience: a conceptual framework for silviculture // *For. Sci.* 2014. V. 60. N. 6. P. 1205–1212.
- Didukh Ya. P.* The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their role in synphytoindication. Kyiv: Phytosociocentre, 2011. 176 p.
- Drever C. R., Peterson G., Messier C., Bergeron Y., Flannigan M.* Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? // *Can. J. For. Res.* 2006. V. 36. P. 2285–2299.
- Dulamsuren C., Hauck M., Bader M., Osokhjargal D., Oyungerel S., Nyambayar S., Runge M., Leuschner C.* Water relations and photosynthetic performance in *Larix sibirica* growing in the forest-steppe ecotone of northern Mongolia // *Tree Physiol.* 2009. V. 29. N. 1. P. 99–110. DOI: 10.1093/treephys/tpn008
- Duveneck M. J., Scheller R. M.* Measuring and managing resistance and resilience under climate change in northern Great Lake forests (USA) // *Landscape Ecol.* 2015. V. 31. Iss. 3. P. 669–686. DOI: 10.1007/s10980-015-0273-6
- Dymond C. C., Spittelhouse D. L., Tedder S., Hopkins K., McCallion K., Sanland J.* Applying resilience concepts in forest management: a retrospective simulation approach // *Forests*. 2015. V. 6. N. 12. P. 4421–4438. DOI: 10.3390/f6124377
- EU 2013. A new EU forest strategy: for forests and the forest-based sector. Brussels, Europ. Commission, COM (2013) 659 final, 2011. 17 p.
- FAO UN. Forestry for a low-carbon future: integrating forests and wood products in climate change strategies. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. FAO Forestry Paper 17. www.fao.org/3/a-i5857e.pdf
- FAO UN. The Russian Federation forest sector. Outlook study to 2030. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. 84 p.
- Fisher R., McDowell N., Purves D., Moorcroft P., Sitch S., Cox P., Huntingford C., Meir P., Woodward F. I.* Assessing uncertainties in a second-generation dynamic vegetation model caused by ecological scale limitations // *New Phytologist*. 2010. V. 187. N. 3. P. 666–681.
- Forest Europe. State of Europe's forests 2011. Status and trends in sustainable forest management in Europe. Ministerial Conference on the Protection of Forest in Europe, UNECE and FAO 2011. 337 p.

- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change // *Science*. 2015. V. 349. Iss. 6250. P. 819–822. DOI: 10.1126/science.aaa9092
- Giglio L., Randerson J. T., van der Werf G. R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) // *J. Geophys. Res. Biogeosciences*. 2013. V. 118. Iss. 1. P. 317–328. DOI: 10.1002/jgrg.20042
- Gustafson E. J. When relationships estimated in the past cannot be used to predict the future: using mechanistic models to predict landscape ecological dynamics in a changing world // *Landscape Ecol.* 2013. V. 28. P. 1429–1437. DOI: 10.1007/s10980-013-9927-4
- Gustafson E. J., Shvidenko A. Z., Scheller R. M. Effectiveness of forest management strategies to mitigate effects of global change in south central Siberia // *Can. J. For. Res.* 2011. V. 41. N. 7. P. 1405–1421. DOI: 10.1139/x11-065
- Gustafson E. J., Shvidenko A. Z., Sturtevant B. R., Scheller R. M. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia // *Ecol. Appl.* 2010. V. 20. N. 3. P. 700–715.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Komareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693
- Hayes D. J., McGuire A. D., Kicklighter D. W., Gurney K. R., Burnside T. J., Melillo J. M. Is the northern high latitude land-based CO₂ sink weakening? // *Global Biogeochemical Cycle*. 2011. V. 25. GB3018. DOI: 10.1029/2010GB00318
- Hengeveld G. M., Nabuurs G.-J., Didion M., Van den Wyngaert I., Clerkx A. P. P. M., Schelhaas M.-J. A forest management map of European forests // *Ecol. Soc.* 2012. V. 17. N. 4. P. 53. DOI: 10.5751/ES-05149-170453
- IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Rep. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
- Iwama A. Yu., Batstella M., Ferreira Lucia da C., Alves D. S., Ferreira Leila Da C. Risk, vulnerability and adaptation to climate change: an interdisciplinary approach // *Ambiente and Sociedade*. 2016. V. 19. N. 2. P. 93–116. DOI: 10.1590/1809-4422ASOC137409V1922016
- Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Golyukov A. S., Ranson K. J., Yagunov M. N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal watershed, Siberia // *For. Ecol. Manag.* 2017. V. 384. P. 191–199. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.10.050
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. Siberian silkmouth outbreak pattern analysis based on SPOT VEGETATION data // *Int. J. Rem. Sens.* 2009a. V. 30. Iss. 9. P. 2377–2388. DOI: 10.1080/01431160802549419
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Dvinskaya M. L. *Pinus sibirica* and *Larix sibirica* response to climate change in southern Siberian alpine forest-tundra ecotone // *Scand. J. For. Res.* 2009b. V. 24. N. 2. P. 130–139.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Oskorbin P. A., Im S. T., Dvinskaya M. L. Climate induced birch mortality in Trans-Baikal lake region, Siberia // *For. Ecol. Manag.* 2013. V. 289. P. 385–392. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.024
- Krylov A., McCarty J. L., Potapov P., Loboda T., Tyukavina A., Turubanova S., Hansen M. C. Remote sensing estimates of stand-replacing fires in Russia, 2002–2011 // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9. N. 10. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105007
- Le Quere C., Moriarty R., Andrew R. M., Peters G. P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S. D., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Boden T. A., Bopp L., Bozec Y., Canadell J. G., Chevallier F., Cosca C. E., Harris I., Hoppema M., Houghton R. A., House J. I., Jain A. K., Johannessen T., Kato E., Keeling R. F., Kitidis V., Goldewijk K. K., Koven C., Landa C. S., Landschützer P., Lenton A., Lima I. D., Marland G., Mathis J. T., Metzl N., Nojiri Y., Olsen A., Ono T., Peters W., Pfeil B., Poulter B., Raupach M. R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Salisbury J. E., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Segschneider J., Steinhoff T., Stocker B. D., Sutton A. J., Takahashi Y.-P., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zeng N. Global carbon budget 2014 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2015. V. 7. Iss. 1. P. 47–85. DOI: 10.5194/essd-7-47-2015
- Lenton T. M., Held H., Krieger E., Hall J. W., Lucht W., Rahmstorf S., Schellnhuber H. J. Tipping elements in the Earth's climate system // *PNAS*. 2008. V. 105. N. 6. P. 1786–1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105
- Liang J., Crowther T. W., Picard N., Wiser S., Mo Z., Alberti G., Schulze E.-D., McGuire A. D., Bozzato F., Pretzsch H., de-Miguel S., Paquette A., Hérault B., Scherer-Lorenzen M., Barrett C. B., Glick H. B., Hengeveld G. M., Nabuurs G.-J.,

- Pfautsch S., Viana H., Vibrans A. C., Ammer C., Schall P., Verbyla D., Tchebakova N. M., Fischer M., Watson J. V., Han Y. H. C., Xiandong L., Schelhaas M.-J., Huicui L., Gianelle D., Parfenova E. I., Salas C., Lee E., Lee B., Hyun S. K., Bruelheide H., Coomes D. A., Piotta D., Sunderland T. C. H., Schmid B., Gourlet-Fleury S., Sonké B., Tavani R., Jun Z., Brandl S., Vayreda J., Kitahara F., Searle E. B., Neldner V. J., Ngugi M. R., Baraloto C., Frizzera L., Balazy R., Oleksyn J., Zawila-Niedzwiecki T., Bouriaud O., Bussotti F., Finér L., Jaroszewicz B., Jucker T., Valladares F., Jagodzinski A. M., Peri P. L., Gonmadje C., Marthy W., O'Brien T., Martin E. H., Marshall A. R., Rovero F., Bitariho R., Niklaus P. A., Alvarez-Loayza P., Chamuya N., Valencia R., Mortier F., Wortel V., Engone-Obiang N. L., Ferreira L. V., Odeke D. E., Vasquez R. M., Lewis S. L., Reich P. B.* Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests // *Science*. 2016. V. 354. Iss. 6309. P. 196. DOI: 10.1126/science.aaf8957
- MacDicken K. G., Sola P., Hall J. E., Sabogal C., Tadoum M., de Wassegi K.* Global progress toward sustainable forest management // *For. Ecol. Manag.* 2015. V. 352. P. 47–56. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.02.005
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E., 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 // *Climate Change*. 2008. V. 86. Iss. 3. P. 463–474. DOI: 10.1007/s10584-007-9295-7
- Mazziotta A., Podkopaev D., Triviño M., Miettinen K., Pohjanmies T., Mönkkönen M.* Quantifying and resolving conservation conflicts in forest landscapes via multiobjective optimization // *Silva Fenn.* 2017. V. 51. Iss. 1. 1778. DOI: 10.14214/sf.1778
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment Board. Ecosystems and human well-being: Current state and trends. V. 1. R. Hasan, R. Scholes, and N. Ash (Eds.). Washington, Covelov, London: Island Press, 2005. 917 p.
- Medlyn B. E., Duursma R. A., Zeppel M. J. B.* Forest productivity under climate change: a checklist for evaluating model studies // *WIREs Clim. Change*. 2011. V. 2. P. 332–355. DOI: 10.1002/wcc.108
- Millar C. I., Stephenson N. L.* Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // *Science*. 2015. V. 349. Iss. 6250. P. 823–826. DOI: 10.1126/science.aaa9933
- Nabuurs G.-J., Lindner M., Verkerk P. J., Gunia K., Deda P., Michalak R., Grassi G.* First signs of carbon sink saturation in European forest biomass // *Nat. Clim. Change*. 2013. V. 3. P. 792–796. DOI: 10.1038/nclimate1853
- Onuchin A., Korets M., Shvidenko A., Burenina T., Musokhranova A.* Modeling air temperature changes in Northern Asia // *Glob. Planet. Change*. 2014. V. 122. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.07.011
- Osawa A., Zyryanova O. A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R. W.* (Eds.). Permafrost ecosystems. Siberian larch forests. *Ecol. Stud.* V. 209. Springer, 2010. 502 p.
- Pan Y., Birdsey R. A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W. A., Phillips O. L., Shvidenko A., Lewis S. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S. W., McGuire A. D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D.* A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. V. 333. Iss. 6045. P. 988–993. DOI: 10.1126/science.1201609
- Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11 Dec., 2015. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
- Pavlov I. N.* Biotic and abiotic factors as causes of coniferous forests dieback in Siberia and Far East // *Contemp. Probl. Ecol.* 2015. V. 8. N. 4. P. 499–515.
- Piao S., Nan H., Huntingford C., Ciais P., Friedlingstein P., Sitch S., Peng S., Ahlström A., Canadell J. G., Cong N., Levis S., Levy P. E., Liu L., Lomas M. R., Mao J., Myneni R. B., Peylin P., Poulter B., Shi X., Yin G., Viovy N., Wang T., Wang X., Zaehle S., Zeng N., Zeng Z., Chen A.* Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. Iss. 5018. DOI: 10.1038/ncomms6018
- Ponomarev E. I., Ivanov V. A., Korshunov N. A.* System of wildfire monitoring in Russia // D. Paton and J. F. Shroder (Eds.) *Wildfire hazard, risks and disasters*. Elsevier, 2015. P. 187–205.
- Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I. C., Peylin P., Rödenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schmullius C.* Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models // *Glob. Change Biol.* 2011. V. 17. Iss. 1. P. 351–365. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02275.x
- Roy B., Mousseau V.* A theoretical framework for analysis the notion of relative importance of criteria // *J. Multi-Criteria Decision Anal.* 1996. V. 5. P. 145–159.
- Running S. W., Gower S. T.* FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and

- nitrogen budgets // *Tree Physiol.* 1991. V. 9. P. 147–160.
- Sato H., Itoh A., Kohyama T. SEIB-DGVM: A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach // *Ecol. Model.* 2007. V. 200. Iss. 3–4. P. 279–307. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.09.006
- Schaphoff S., Reyer C. P. O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A. Tamm Review: observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // *For. Ecol. Manag.* 2016. V. 361. P. 432–444. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.11.043
- Schelhaas M. J., van Esch P. W., Groen T. A., de Jong B. H. J., Kanninen M., Liski J., Maser O., Mohren G. M. J., Nabuurs G. J., Palosuo T., Pedroni L., Vallejo A., Vilen T. CO2FIX V 3.1 – a modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. ALTERRA Rep. N. 1068. ALTERRA, Wageningen, Netherlands, 2004. 122 p.
- Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Hengeveld G., Reyer C., Hanewinkel M., Zimmermann N. E., Cullmann D. Alternative forest management strategies to account for climate change-induced productivity and species suitability changes in Europe // *Reg. Environ. Change.* 2015. V. 15. Iss. 8. P. 1581–1594. DOI: 10.1007/s10113-015-0788-z
- Scheller R. M., Domingo J. B., Sturtevant B. R., Williams J. S., Rudy A., Gustafson E. J., Mladenoff D. J. Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution // *Ecol. Modell.* 2007. V. 201. P. 409–419. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009
- Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Lesiv M. Yu., Ontikov P. V., Shchepashchenko M. V., Kraxner F. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products // *Contemp. Probl. Ecol.* 2015. V. 8. Iss. 7. P. 811–817. DOI: 10.1134/S199542551507013
- Seidl R., Spies T. A., Peterson D. L., Stephens S. L., Hicke J. A. Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services // *J. Appl. Ecol.* 2016. V. 53. Iss. 1. P. 120–129. DOI: 10.1111/1365-2664.12511
- Shvidenko A. Z., Gustafson E., McGuire A. D., Kharuk V. I., Schepaschenko D. G., Shugart H. H., Tchebakova N. M., Vygodskaya N. N., Onuchin A. A., Hayes D. J., McCallum I., Maksyutov S., Mukhortova L. V., Soja A. J., Beletti-Marchesini L., Kurbatova J. A., Oltchev A. V., Parfenova E. I., Shuman J. K. Chapter 6. Terrestrial ecosystems and their change // P. Ya. Groisman, G. Gutman (Eds.). *Regional environmental changes in Siberia and their global consequences.* Springer Environ. Sci. & Engineer., 2013. P. 171–249.
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Fuss S., Kraxner F., Obersteiner M. Evaluation of carbon sequestration service of forests – a Russian case-study. XIV World For. Congr., Durban, South Africa, 7–11 Sept., 2015. 8 p. <http://foris.fao.org/wfc2015/api/file/5547887fed8e6e56ffdc9d/contents/f567bf8e-087b-43c4-acf0-e188679e2c01.pdf>
- Smith P., Bustamante M., Ahammad H., Clark H., Dong H., Elsiddig E. A., Haberl H., Harper R., House J., Jafari M., Maser O., Mbow C., Ravindranath N. H., Rice C. W., Abad C. R., Romanovskaya A., Sperling F., Tubiello F. N. Agriculture, forestry and other land-use (AFOLU) // *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the fifth assessment rep. of the Intergovernmental Panel on Climate Change /* Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., and Minx J. C. (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. P. 811–922.
- Sverdrup H., Stjernquist I. (Eds.). *Developing principles and models for sustainable forestry in Sweden. Managing Forest Ecosystems.* Springer Science + Business Media, Dordrecht, 2002. 450 p. DOI: 10.1007/978-94-015-9888-0
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // *Environ. Res. Lett.* 2009. V. 4. Iss. 4. 045013. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045013
- Vandergert P., Newell J. Illegal logging in the Russian Far East and Siberia // *Int. For. Rev.* 2003. V. 5 N. 3. P. 303–306. DOI: <https://doi.org/10.1505/IFOR.5.3.303.19150>
- Walker B., Holing C. S., Carpenter S. R., Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems // *Ecol. Soc.* 2004. V. 9. Iss. 2. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>
- Watson R., Carraro C., Canziani P., Nakicenovich N., McCarthy J. J., Goldemberg J., Hisas L. The truth about climate change. *The Universal Ecol. Fund (FEU-US)*, 2016. 8 p. DOI: 978-0-9831909-1-2
- Williamson T. B., Watson D. O. T. Assessment of community preference rankings of potential environmental effects of climate change using the method of paired comparisons // *Climat. Change.* 2010. V. 99. Iss. 3. P. 589–612. DOI: 10.1007/s10584-009-9656-5

- Wullschleger S. D., Epstein H. E., Box E. O., Euskirchen E. S., Goswami S., Iversen C. M., Kattge J., Norby R. J., van Bodegom P. M., Xu X. Plant functional types in Earth system models: past experiences and future directions for application of dynamic vegetation models in high-latitude ecosystems // *Ann. Bot.* 2014. V. 114. Iss. 1. P. 1–16. DOI: 10.1093/aob/mcu077
- Xu Z., Smyth C. E., Lemprière T. C., Rampley G. J., Kurz W. A. Climate change mitigation strategies in the forest sector: biophysical impacts and economic implications in British Columbia, Canada // *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change.* 2017. P. 1–34. DOI: 10.1007/s11027-016-9735-7
- Zhang J.-T., Wang C. Biodiversity and ecosystem functioning: exploring large-scale patterns in mainland China // *iForest. Biogeosciences and Forestry.* 2012. V. 5. P. 230–234. DOI: 10.3832/ifer0627-005
- Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin III F. S. Permafrost and the global carbon budget // *Science.* 2006. V. 312. Iss. 5780. P. 1612–1613. DOI: 10.1126/science.1128908

TRANSITION TO SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT IN RUSSIA: THEORETICAL AND METHODOLOGICAL BACKGROUNDS

A. Z. Shvidenko^{1,2}, D. G. Schepaschenko^{1,3}, F. Kraxner¹, A. A. Onuchin²

¹ *International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
Schlossplatz, 1, Laxenburg, 2361 Austria*

² *Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

³ *Mytischinski Branch of N. E. Bauman Moscow State Technical University
Pervaya Institutskaya str., 1, Mytishi, Moscow Oblast, 141005 Russian Federation*

E-mail: shvidenk@iiasa.ac.at, schepd@iiasa.ac.at, kraxner@iiasa.ac.at, onuchin@ksc.krasn.ru

The paper contains a short analysis of theoretical and methodological backgrounds of transition to sustainable forest management in Russia (SFM). It is concisely considered the current state of forest management in Russia which is estimated as critical; expected impacts of climate change on the country's forests; and theoretical and methodological prerequisites, specifics and risks of transition to SFM including 1) concept and general methodological basis of transition to SFM; 2) specifics of the required information; 3) problem of forest protection in conditions of growing risks; 4) strategic prerequisites of adaptation of forests to climate change and their use as a tool of climate change mitigation; and 5) necessity of a harmonized estimation of diversity of resources and other forest ecosystem services within the paradigm of risk resilient forest management. A crucial role of models of different complexity and destination is considered as a basic methodological tool of long-term planning of forest management actions. It is shown that there is no single strategy, which would allow reaching all goals of SFM. The scale of objects within which SFM is implemented might play a crucial role in finding the optimal decisions. Similar to many other countries, Russia is late with consideration and implementation of SFM. The paper is limited by theoretical and methodological questions and does not touch upon managerial, institutional and political problems of the up-to-date forest sector of Russia.

Keywords: *Russian forests, climate change, forest management, risk resilient forestry.*

How to cite: *Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G., Kraxner F., Onuchin A. A. Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological backgrounds // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2017. N. 6: 3–25 (in Russian with English abstract).*