



Бореальные леса и глобальные изменения¹

С. Готье, П. Бернье, Лаврентьевский лесной центр (Канада);

Т. Куулувайнен, Университет Хельсинки;

А. Швиденко, Международный институт прикладного системного анализа, Институт леса им. В. Н. Сукачева;

Д. Щепашенко, Международный институт прикладного системного анализа, МГУЛ

Бореальные леса покрывают около 30 % площади лесов планеты [1], содержат больше поверхностных пресных вод, чем любой другой биом [2], и включают большие площади неуправляемых лесов в основном низкой продуктивности в высокоширотных регионах Канады, России и Аляски [3] (рис. 1, А и В). Охватывающий немногие страны, бореальный биом характеризуется очень низкой плотностью населения и в целом низким антропогенным влиянием, хотя в некоторых регионах добыча природных ресурсов значительна (см. рис. 1, С).

Бореальные леса выполняют функции, критически важные для населения на всех уровнях — местном, региональном, глобальном. Для местных общин, включая таковые коренного населения, очень важны экосистемные функции, предоставляемые лесом (рыбная ловля, охота, досуг, духовная деятельность и экономические возможности) [2].

Такие страны, как Канада, Финляндия, Россия и Швеция [2], обеспечивают свою лесную индустрию древесиной из бореальных лесов. Более 33 % пиловочника и 25 % бумаги на экспортном рынке поступает из бореальных районов [2].

Бореальные леса — один из важнейших регуляторов климата планеты посредством обмена энергией и водой [4]. Они также хранят громадное количество биогенного углерода — по величине такое же, если не большее, чем тропические леса, — с вероятно заниженными 32 % глобального запаса углерода (С) наземных экосистем, главным образом в чувствительных к изменению климата торфе, почве и многолетней мерзлоте [5, 6]. Примерно 20 % поглощаемого всеми лесами Земли углерода обеспечивается в бореальной зоне [5]. В силу их глобального значения и многоцелевой роли судьба бореальных лесов должна быть вопросом глобальной значимости [4, 7].

Глобальные изменения, которые понимаются как интегральный результат изменения климата и других изменений, обусловленных антропогенной активностью, быстро меняют среду бореального леса [4, 8]. Уровень этих изменений и их кумулятивное воздействие определяют будущее состояние этого биома, включая его потенциал перехода в новое, нежелательное равновесное состояние [9]. В этом обзоре мы оцениваем современное состояние бореальных лесов, их жизнеспособность и обсуждаем возрастающие угрозы, которые

Бореальные леса, один из самых больших биомов планеты, являются источником древесных и недревесных ресурсов, а также разнообразных полезностей, которые необходимы обществу на всех уровнях — от локального до глобального. В настоящее время около 2/3 их площади охвачены различными формами ведения хозяйства, ориентированного главным образом на производство и заготовку древесины. Многочисленные иные функции, например регулирование климата, также осуществляются бореальными лесами. Большинство лесов сохранило свою устойчивость, что позволяет им сосуществовать с современными режимами нарушений. Однако ожидаемые изменения окружающей среды беспрецедентной скорости и масштаба создают существенную угрозу бореальным лесам. Управленческие воздействия, направленные на уменьшение этой угрозы, могут быть воплощены. Необходима разработка целесообразных экономических стимулов и большее внимание международного сообщества к бореальному биому с тем, чтобы обеспечить дальнейшую адаптацию лесов к глобальным изменениям и их использование в целях смягчения нежелательных изменений климата.

такие леса испытывают в связи с глобальными изменениями. Следуя [1], мы определяем здоровье леса как способность лесных экосистем адаптироваться к меняющимся условиям внешней среды и выполнять свою многоцелевую роль пре-доставления ресурсов и полезностей для общества. Мы оцениваем здоровье как функцию двух взаимосвязанных экосистемных свойств: биологического разнообразия в масштабе от генов до ландшафтов и устойчивости, т. е. способности лесных экосистем восстанавливаться после нарушений. Мы сосредотачиваем нашу оценку на функциях, связанных с производством древесины и регулированием климата, а также на динамике лесов и их продуктивности. В заключение мы приводим примеры потенциального влияния глобальных изменений и предлагаем возможные пути долгосрочного поддержания здорового состояния бореальных лесов.

¹ Настоящая публикация является аутентичным переводом статьи S. Gauthier, P. Bernier, T. Kuuluvainen, A. Z. Shvidenko and D. G. Schepaschenko «Boreal forest health and global change» (*Science*, August 2015, Vol. 349, issue 6259, p. 819-821). Перевод с английского — А. Швиденко, Д. Щепашенко.

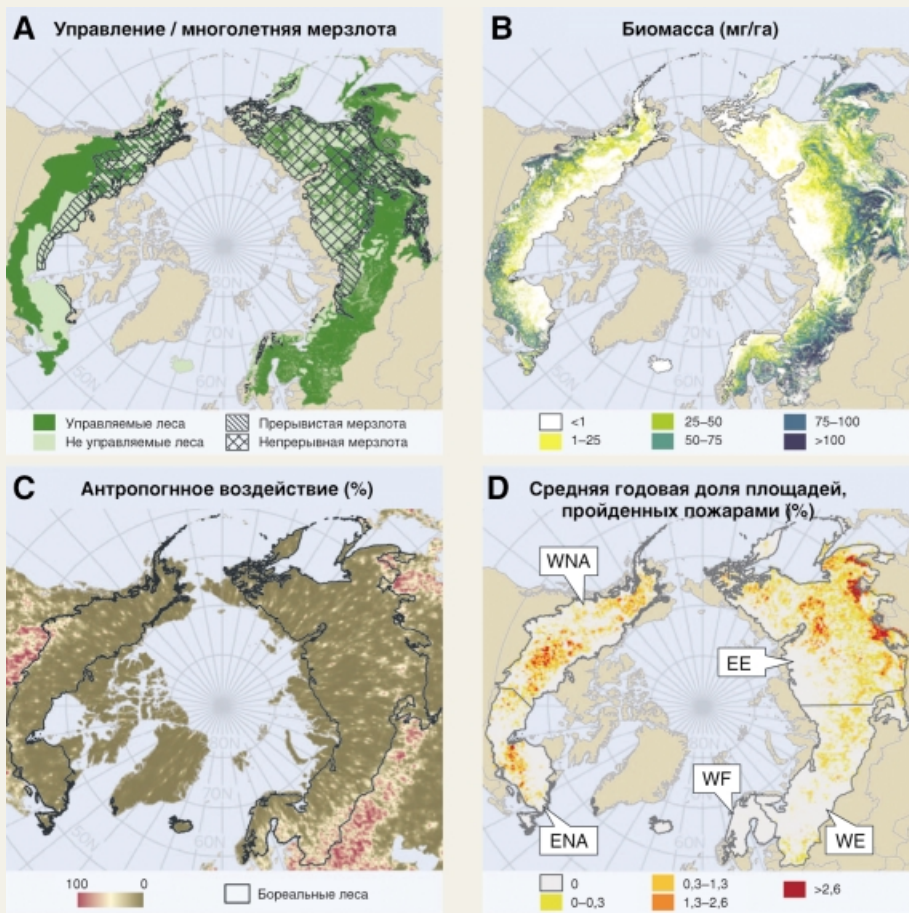


Рис. 1. Характеристики циркулярных бореальных лесов: А — распространение управляемых и неуправляемых бореальных лесов. Леса, растущие на многолетней мерзлоте, покрывают обширные территории; В — пространственное распределение биомассы (показывает значительное уменьшение продуктивности лесов с юга на север и изменение широтного распространения продуктивных лесов по континентам); С — индекс антропогенного воздействия (отражает в целом низкое, но локально важное влияние лесозаготовок, сельского хозяйства, населенных пунктов, разведки и добычи природных ресурсов, горных работ и дорог, а также значимость их кумулятивного воздействия); D — средняя годовая доля земель, пройденных пожарами в бореальной зоне в 1997-2014 годах (меняется от очень малых величин до более чем 5 % в аридных районах Евразии). Регионы бореальной зоны, обозначенные на карте, соответствуют таковым, показанным на рис. 2, В: WNA — западная часть Северной Америки; ENA — восточная часть Северной Америки; WF — Западная Скандинавия; WE — Западная Евразия; EE — Восточная Евразия (источники данных указаны в [70])

Особенности бореальных лесов

Бореальными называют леса, растущие в среде высоких широт, где отрицательные температуры сохраняются от 6 до 8 месяцев в году [2] и деревья способны достичь минимальной высоты в 5 м при сомкнутости полога 10 % и выше [10]. Исторически бореальные леса развивались в условиях ограничений, налагаемых коротким вегетационным периодом и суровыми зимами, в течение которых снежный покров наблюдается несколько месяцев [2, 11]. Около 1/3 их территории подстилается многолетней мерзлотой (см. рис. 1, А) [12, 13]. Бореальные леса отличаются невысоким разнообразием древесных пород, из которых голосеменные, такие как *Larix*, *Pinus*, *Abies* и *Picea*, обычно преобладают с различным присутствием покрытосеменных *Betula*, *Populus* и *Alnus* [2, 11, 14] в насаждениях, которые тем не менее обеспечивают жизнь тысячам живых организмов [15].

Различные типы нарушений (пожары, вредные насекомые, ветер и т. д.) были существенной частью динамики бо-

реальных лесных ландшафтов с воздействиями от нескольких квадратных метров до миллионов гектаров [14, 16]. Интенсивные верховые пожары, полностью разрушающие древостой, исторически были обычными в Северной Америке и некоторых регионах России, в то время как нелетальные низовые пожары преобладали в Евразии [11, 14, 17]. Вспышки массового размножения насекомых повторялись в Северной Америке и в таежных лесах России, но ураганы, по-видимому, были более важным фактором в Скандинавии и восточной части России [14]. Несмотря на эти региональные различия, разнообразные сочетания крупно- и мелкомасштабных нарушений в течение тысячелетий формировали биоразнообразие всех бореальных лесов посредством поддержания значительной неоднородности насаждений на ландшафтном уровне, варьирующихся в размерах, возрасте, структуре и по составу; такое многообразие создает большой набор мест произрастания для коренных пород [15, 18].

Вследствие повторяющейся природы нарушений растения бореальной зоны в целом менее страдают от фрагментации, чем растения тропиков [19], хотя приспособившиеся к определенным условиям породы из других групп могут быть чувствительны к фрагментации или к изменениям условий местообитания [15, 18]. В частности, древесные породы бореальных лесов выработали механизмы выживания или восстановления после нарушений, хотя сам процесс восстановления может быть медленным [20]. В целом они также имеют высокие адаптационные свойства, отражающиеся в обширной экологической амплитуде, больших размерах популяций и значительном генетическом разнообразии на популяционном уровне [21, 22]. Устойчивость этих экосистем может быть хорошо проиллюстрирована на примере бореальных лесов Северной Америки, где региональная представленность древесных пород оставалась в основном неизменной на протяжении последних 8000 лет, несмотря на значительные флуктуации в климате и региональных режимах нарушений [23].

Направлено ли ведение лесного хозяйства на поддержание здоровья бореальных лесов?

Считается, что примерно 2/3 бореальных лесов является управляемыми [24] преимущественно с целью промышленной заготовки древесины (35 до 40 % в Канаде [2, 25], 58 % в России [26] и 90 % в Скандинавии [2]). Интенсивность лесного хозяйства меняется от низкой в Канаде и России до высокой в скандинавских лесах, которые составляют примерно 5 % площади лесов мира [2]. Более 60 % древостоев в управляемых лесах подвергались рубке по крайней мере один раз



[25, 27], хотя эта величина существенно варьирует на региональном уровне.

Управляемые леса в Швеции и Финляндии весьма однородны как результат долговременной эксплуатации и возрастающей интенсивности ведения лесного хозяйства, направленного на производство лесоматериалов [15, 27], и эффективной охраны лесов от пожаров (см. рис. 1, D). Продуктивность лесов и запас древостоев в этих странах увеличивается, и целью лесопользования является дальнейшее возрастание объема изымаемой древесины [28]. Относительно низкопродуктивные управляемые леса в Канаде сохранили значительное разнообразие на уровнях насаждения и ландшафта вследствие естественного возобновления на вырубках и природных нарушений в ландшафтах [25] (см. рис. 1, C). В бореальной части России уровень лесозаготовок существенным образом снизился после распада СССР [8, 29] вместе с финансированием охраны и защиты лесов, а также расходами на ведение лесного хозяйства. К тому же, несмотря на действующие законодательство, инструкции и положения лесопользования, до 20 % объема древесины заготавливается нелегально [8] с продолжающейся практикой преимущественной вырубке деревьев ценных пород и высокого качества, как правило, в наиболее продуктивных или более доступных древостоях [30].

Лесозаготовки уменьшили площади лесов высоких возрастов во всех районах интенсивного лесного хозяйства [14, 16]. Это привело к значительному уменьшению структурных атрибутов насаждений, ассоциирующихся со старыми лесам, таких как большие деревья с дуплами для укрытия, что отрицательно сказалось на биоразнообразии [31]. Заготовки также увеличили долю возобновляющихся, находящихся на ранней стадии сукцессионной динамики лесов, которые сохраняют более низкое биологическое и структурное разнообразие, чем леса, естественно образующиеся после природных нарушений, где быстроменяющиеся условия местообитания и смена пород усиливают их адаптационный потенциал к изменению условий окружающей среды [25]. Кроме того, восстанавливающиеся леса на вырубках часто становятся еще более однообразными вследствие создания лесных культур с различной степенью генетического отбора, а также как результат контроля структуры лесов и конкурирующей растительности, что обуславливает дальнейшее уменьшение их адаптационного потенциала к меняющейся окружающей среде [25]. В последнее время существенно увеличился спрос на возобновляемые источники энергии, особенно в Скандинавских странах, что повышает риск удаления питательных веществ, необходимых для роста деревьев [28]. Однако отрицательное влияние удаления послерубочных остатков на плодородие условий местообитания было подтверждено только для некоторых специфических типов лесорастительных условий [32, 33].

Хотя практика предыдущего лесопользования показала уменьшение разнообразия на породном и ландшафтном уровнях, большая часть бореальных лесных ландшафтов, по крайней мере частично, сохранила свою устойчивость к нарушениям [25]. Тем не менее современные исследования свидетельствуют о том, что интенсификация лесного хозяйства, направленная на увеличение продукции древесины, уменьшила биоразнообразие и устойчивость лесов [15]. При интенсификации лесного хозяйства поддержание продуктивных лесов означает еще больший сдвиг от природных процессов к таковым, чья стоимость и риски в конечном счете неблагоприятно сказываются на лесном секторе [34]. Например, в шведской провинции Гётланд ураган 2005 года повалил 75 млн м³ древесины в интенсивно управляемых хвойных лесах, неустойчивых к ветру. Это увеличило стоимость 1 м³ древесины на 21 % при заготовке и уборке ветро-

вальной древесины и последующей посадки леса на поврежденных площадях [35].

Наконец, в дополнение к влиянию лесохозяйственных мероприятий и природных нарушений разведка и добыча других ресурсов (горные разработки, нефть и газ, затопление земель при реализации гидротехнических проектов и т. д.) обычны во многих регионах управляемых и неуправляемых бореальных лесов [1, 2, 36] (см. рис. 1, C). В целом эта деятельность на северных территориях в течение последних десятилетий отрицательно повлияла на состояние лесных экосистем путем загрязнения воздуха, почвы и воды, на гидрологический режим, физическое разрушение и фрагментацию лесных ландшафтов [1, 37], особенно в лесных экосистемах Сибири на многолетней мерзлоте [36, 37].

Какие риски глобальные изменения ставят перед бореальными лесами?

Предполагается, что на протяжении 21-го столетия бореальные леса испытают самое большое увеличение температуры среди всех лесных биомов [38, 39]. Вместе с тем промышленное освоение территорий и добыча природных ресурсов, вероятно, окажут дополнительное отрицательное воздействие на состояние бореальных лесов [37]. Ожидаемый беспрецедентный уровень изменений, прежде всего изменений климата и режима нарушений, может превысить пределы устойчивости древесных пород и экосистем, приводя к существенным изменениям на уровне биома [9].

Увеличение средней годовой температуры на 1,5 °C или более было недавно отмечено для большей части территории бореальных лесов [38]. При глобальном потеплении на 4 °C повышение температуры в циркулярной бореальной зоне ожидается от 4 до 11 °C со значительно более скромным увеличением количества осадков [40] (рис. 2). В случае реализации такого экстремального сценария большие регионы бореальных лесов будут находиться в более сухом климате, который в настоящее время характерен для биома редкостойных лесов и кустарников [41].

При таких изменениях климата в целом следует ожидать, что на том же временном промежутке биотические и абиотические нарушения увеличатся по площади, частоте и интенсивности, хотя неопределенности таких прогнозов остаются [22, 39, 42–44]. Предполагается, что частота, площадь и интенсивность пожаров значительно возрастут, больше всего в тех частях России, где ожидается существенное увеличение деструктивных пожаров, полностью разрушающих древостой [43–45]. Более теплые условия будут также препятствовать росту популяций или расширять ареалы местных и инвазивных вредителей, приводя к массовым вспышкам, сходным с недавно наблюдавшимся массовым размножением горного соснового лубоеда в Канаде [46] или сибирского шелкопряда в Сибири [36]. Кроме того, интенсификация глобальной торговли способствует распространению инвазивных вредителей и патогенов в бореальные леса [47].

Ряд исследований предполагает медленную скорость миграции лиственных древесных пород в бореальную зону востока Северной Америки [48] и продвижение вечнозеленых хвойных пород в современный ареал листопадной лиственницы в Сибири [49]. Однако скорость предполагаемого сдвига климатических зон к северу на порядок выше, чем миграционная способность древесных пород [36, 50]. Следовательно, изменения местных климатических условий будут оказывать непосредственное влияние на леса и опосредованное через изменение режима нарушений. Повышенный отпад вследствие засухи уже отмечен в нескольких бореальных регионах [42] и предсказывается на региональном уровне [8, 39]. Возрастание продуктивности лесов зафиксировано



в Скандинавии, в северной части бореальных лесов Северной Америки [51, 52] и на значительной территории России [53] частично как реакция на потепление и увеличение вегетационного периода. Согласно прогнозам продуктивность большей части бореальных лесов России в среднем будет увеличиваться до 2030-х годов [8]. Наоборот, уменьшение продуктивности показано и продолжение этой тенденции предсказывается для части бореальных лесов Северной Америки как реакция на региональное увеличение сухости климата [54, 55].

Сдвиг в более сухой климат и учащение нарушений могут привести к повсеместному разреживанию лесного покрова или потерям лесов, как это следует из прогнозируемого климатического пространства больших районов бореальной зоны (см. рис. 2) [43, 56]. Такое изменение может быть усилено уже отмеченной способностью последовательных нарушений быстро трансформировать сомкнутые леса в малопродуктивные редколесья [41, 56, 57]. Прогнозируемая трансформация низовых пожаров в верховые в лесных экосистемах России с преобладанием древесных пород, которые не адаптированы к быстрому восстановлению после деструктивных пожаров, могут также затруднять лесовозобновление и образование сомкнутого полога [43]. Таяние вечной мерзлоты в аридных континентальных районах Сибири, по-видимому, будет вести к широко распространенному, обусловленному водным стрессом отпаду как в темнохвойных, так и в лиственных лесах, которые составляют 20 % бореальных лесов планеты [13].

Прогнозы динамики лесов в рамках различных климатических сценариев показывают более высокую вероятность того, что запас углерода в бореальных лесах скорее уменьшится, чем увеличится, или останется на том же уровне [8, 58]. Глобально бореальные леса, видимо, начали переход от поглощения углерода к его эмиссии [6], и некоторые регионы (Западная Канада [46] и отдельные территории Сибири на вечной мерзлоте [59]) уже выделяют больше углерода, чем поглощают. Запасы углерода в лесных экосистемах и точность его количественной оценки существенно варьируют в различных регионах бореальной зоны [58, 60]. Можно предположить, что значительные площади торфяных залежей и запасы органического вещества в толще многолетней мерзлоты станут очень неустойчивыми при потеплении [58]. Только на территории одной России освобождение углерода при таянии вечной мерзлоты к концу века может обладать потенциалом потепления, который в несколь-

А Климатическое пространство биомов

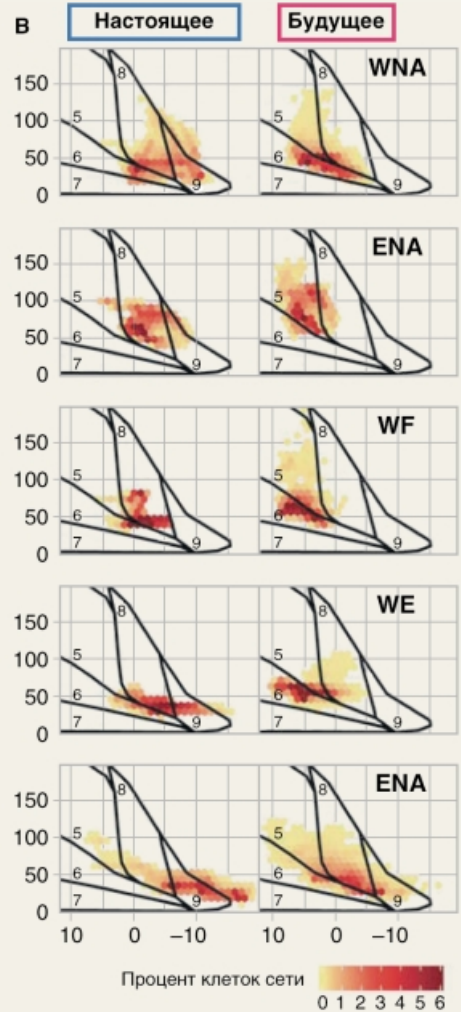
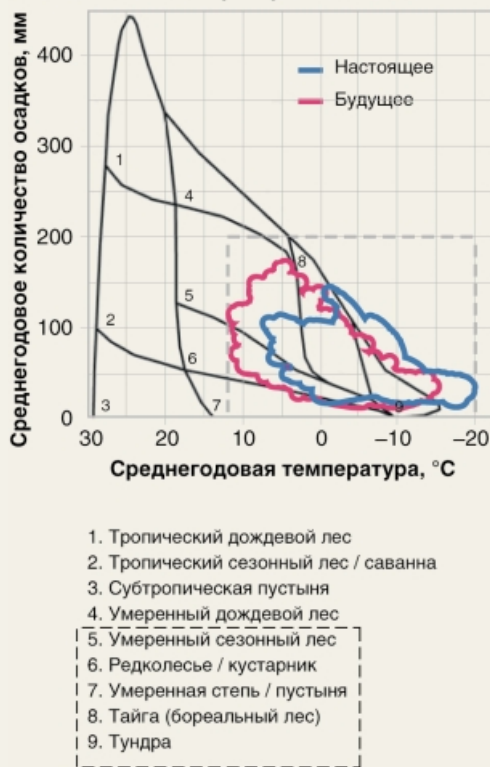


Рис. 2. Средние ежегодные температуры и осадки в циркумполярных бореальных лесах, представленные в климатическом пространстве наземных биомов: А — потенциальные воздействия изменений климата на бореальные леса (иллюстрируются наложением климатических условий циркумполярных бореальной зоны на климатическое пространство наземных биомов). Базовые (1975 года) климатические условия близко соответствуют климатическому пространству тайги и тундры. Прогноз будущих климатических условий (2090 год) при экстремальном сценарии эмиссии CO₂ (согласно сценарию А2 Четвертого оценочного доклада МГЭИК) показывает также перекрытие климатического пространства кустарников (редколесий) [6] и лесов умеренной зоны [5]; В — частота современных и будущих (соответственно левая и правая часть) климатических условий (усредненные данные по клеткам 10' сети) для каждого региона (см. размещение регионов на рис. 1, D). Восточная часть Северной Америки (ЕНА) остается единственным регионом, где ожидаются климатические условия, соответствующие лесным биомам (тайга [8] или леса умеренной зоны [5]). Во всех остальных регионах прогнозируемое количество осадков недостаточно для полной компенсации возрастающей эвапотранспирации вследствие повышенных температур. Согласно прогнозам большие площади этих регионов будут находиться в климатическом пространстве биомов кустарников и редколесий (детальное описание источников данных и метода см. в [70])

ко раз превысит современные эмиссии вследствие тропического обезлесивания [8]. В ряде регионов бореальной зоны это воздействие усугубляется влиянием индустриального освоения северных территорий [36, 37]. Суммарные последствия этих изменений, включая долгосрочные геофизические воздействия на глобальный климат [61] и на целостность экосистем [4], должны быть поняты и оценены.

Что целесообразно предпринять?

Поддержание экосистемных функций, выполняемых бореальными лесами, зависит от сохранения здорового со-



стояния лесов, которому угрожают скорость и амплитуда климатических изменений, прогнозируемых для северных широт. Принимая во внимание важность потенциальных воздействий и величину территорий, на которых они могут проявляться, необходимо срочно предпринять действия для поддержания здорового состояния и устойчивости бореальных лесов, а также увеличить их вклад в смягчение нежелательных изменений климата. Управление лесами, экономические предпосылки и возможности глобальной лесной политики должны быть задействованы в достижении этих целей.

Должны быть осуществлены лесохозяйственные мероприятия, направленные на смягчение неблагоприятных воздействий климатических изменений [58, 62]. Главнейшими из них являются лесоразведение, поддержание величины запасов углерода в лесных экосистемах и увеличение его поглощения как в лесных экосистемах, так и за их пределами [6, 62]. Лесоразведение в бореальных лесах должно проводиться везде, где позволяют условия, хотя потенциальный выигрыш от этого будет в целом достаточно мал, поскольку обезлесивание (изменение типа землепользования) в бореальной зоне невелико [58, 62], с годичным уровнем до 0,02 % [58]. Заметным исключением является возможность целенаправленного управления 45 млн га заброшенных сельскохозяйственных земель в России [63], из которых 18 млн га уже естественно возобновилось лесной и кустарниковой растительностью [64]. Лесовосстановление также представляет существенный интерес для ускорения возобновления, особенно после деструктивных нарушений, в неуправляемых бореальных лесах [8] на площадях, которые только в одной России составляют миллионы гектаров [36]. Консервация углерода в заготовленной лесной продукции, замещение древесины более энергозатратных строительных материалов и использование древесины для производства энергии могут также быть использованы в целях смягчения изменения климата. Однако экономические стимулы целевой поддержки лесоразведения или других управленческих действий, направленных на сохранность или накопление углерода в бореальных лесах, например замещение энергозатратных строительных материалов, в настоящее время практически не применяются на территории биома [7, 62].

Целями лесохозяйственных стратегий, таких как лесоводство, поддержание непрерывного лесного покрова, повышение разнообразия древесных пород и неоднородности ландшафтов, могут быть устойчивость лесного покрова, сохранение запаса углерода и биоразнообразия [8, 65]. Внедрение новых управленческих подходов, базирующихся на имитации природных процессов или принципах адаптивных систем [18], могут также облегчить решение некоторых экологических проблем, которые хоть и ассоциируются с прежней практикой лесного хозяйства, но являются экономически состоятельной альтернативой [31, 66]. Большие, хорошо распределенные по территории площади охраняемых лесов, где протекают естественные природные процессы, остаются важными для поддержания биоразнообразия и устойчивости бореальных лесных ландшафтов, но основания для их созда-

ния в современных условиях должны принимать во внимание изменения климата [67].

Улучшение контроля за природными нарушениями часто предлагается как средство сохранения запасов углерода в бореальных лесах. Достижение же этой цели, главным образом на значительно удаленных территориях, как правило, экономически невозможно, особенно учитывая будущие климатические условия. Скорее включение оценки рисков в планирование поставок древесины может быть использовано для устойчивого управления лесами в условиях климатических изменений [68]. Ведение многоцелевого хозяйства способно быть затруднительным, но интегральные подходы могут поддержать развитие стратегий, которые максимизируют положительные результаты и находят альтернативу между противоречивыми целями, такими как ведение хозяйства на производство древесины, смягчение климатических изменений и сохранение биоразнообразия [6, 62].

Мониторинг является важным средством для непрерывной оценки состояния бореальных лесов и улучшения понимания взаимодействий и обратных связей между процессами. Фаза восстановления после нарушений заслуживает особого внимания [34], поскольку может благоприятно предупредить о проявлениях деградации лесов, в частности о появлении нежелательных пород, и обеспечить быстрое воплощение исправляющих мероприятий, например при потерях лесного покрова [36]. Леса на многолетней мерзлоте в отдаленных местах также критически связаны с климатом и должны подвергаться непрерывному мониторингу с тем, чтобы обнаружить или предсказать уже отмеченные в некоторых районах сигналы устойчивого переключения лесных экосистем от поглощения к эмиссиям углерода [60] либо переход сомкнутых лесов в редколесья [8]. Вместе с моделированием такое отслеживание изменений можно использовать для предсказания будущих траекторий лесов этого важного биома. Однако современные модели требуют усовершенствования, так как часто не учитывают региональную специфику, к примеру наличие многолетней мерзлоты [36], и показывают несогласующиеся результаты ([56, 59] для Центральной Сибири).

Здоровье и устойчивое состояние огромных и кажущихся вечными бореальных лесов вместе с жизнеспособностью многих местных сообществ и хозяйств, зависящих от леса, в настоящее время находятся под угрозой. В большом масштабе существуют значительные риски для долгосрочного выполнения бореальными лесами жизненно-важных экосистемных функций, например регулирования глобального климата. Наши обширные знания о бореальных лесах могут служить основой для принятия решений, но действующие международные соглашения и механизмы региональных рынков не содержат стимулов или предпосылок для реализации возможностей [7, 8]. Чтобы поддержать своевременные действия, которые критически важны для бореального леса, глобальные обсуждения стратегий устойчивого управления лесами, сохранения биоразнообразия и смягчения климатических изменений должны быть в значительно большей степени сфокусированы на проблемах этого обширного биома.



ССЫЛКИ И ЗАМЕТКИ

1. Brandt J. P., Flannigan M. D., Maynard D. G. et al. An introduction to Canada's boreal zone: Ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues // *Environmental Reviews* 21, 207–226 (2013).
2. Burton P. J., Bergeron Y., Bogdanski B. E. C. et al. Sustainability of Boreal Forests and Forestry in a Changing Environment / *Forests and Society — Responding to Global Drivers of Change*, G. Mery et al., Eds. Vienna, Austria, 2010. Pp. 249–282.
3. Potapov P., Yaroshenko A., Turubanova S. et al. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing // *Ecology and Society* 13 (2), 51 (2008).

4. Steffen W., Richardson K., Rockström J. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet // *Science* 347 (6223), 1259855 (2015).
5. Pan Y., Birdsey R.A., Fang, J. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science* 333 (6045), 988–993 (2011).
6. Bradshaw C. J. A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // *Global and Planetary Change* 128, 24–30 (2015).
7. Moen J., Rist L., Bishop K. et al. Eye on the Taiga: Removing Global Policy Impediments to Safeguard the Boreal Forest // *Conservation Letters* 7 (4), 408–418 (2014).



8. FAO. The Russian Federation forest sector. Outlook study to 2030. Rome, 2012. URL: www.fao.org/docrep/016/i3020e/i3020e00.pdf
9. Reyer C.P.O., Brouwers, N., Rammig A. et al. Forest resilience and tipping points at different spatio-temporal scales: Approaches and challenges // *Journal of Ecology* 103(1), 5–15 (2015).
10. FAO. Global forest resources assessment 2010. Terms and definitions. Working paper 144/E. Rome, 2010; URL: www.fao.org/docrep/014/am665e/am665e00.pdf
11. Kneeshaw D., Bergeron Y., Kuuluvainen T. The Ecosystem Dynamics of Tropical Savannas // *The Sage Handbook of Biogeography*, A. Millington, M. Blumler, U. Schickhoff, Eds. London, 2011. Pp. 261–278.
12. Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin F. S. III Permafrost and the global carbon budget // *Science* 312(5780), 1612–1613 (2006).
13. Osawa A., Matsuura Y., Kajimoto T. Characteristics of Permafrost Forests in Siberia and Potential Responses to Warming Climate // *Permafrost Ecosystems. Siberian Larch Forests*, A. Osawa, O. A. Zyrjanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R. W. Wein, Eds. Netherlands, 2010. Pp. 459–481.
14. Shorohova E., Kneeshaw D., Kuuluvainen T., Gauthier S. Variability and dynamics of old-growth forests in the circumboreal zone: Implications for conservation, restoration and management // *Silva Fennica* 45(5), 785–806 (2011).
15. Kuuluvainen T., Siitonen J. Fennoscandian boreal forests as complex adaptive systems: properties, management challenges and opportunities // *Managing Forests as Complex Adaptive Systems - Building Resilience to the Challenge of Global Change*, C. Messier, K. J. Puettmaan, K. D. Coates, Eds. New York, 2013. Pp. 244–268.
16. Kuuluvainen T., Aakala T. Natural forest dynamics in boreal Fennoscandia: A review and Classification // *Silva Fennica* 45(5), 823–839 (2011).
17. Rogers B. M., Soja A. J., Goulden M. L., Randerson J. T. Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks // *Nat. Geosci.* 8, 228–234 (2015).
18. Burton P. J., in *Managing Forests as Complex Adaptive Systems — Building Resilience to the Challenge of Global Change*, C. Messier, K. J. Puettmaan, K. D. Coates, Eds. New York, 2013. Pp. 79–108.
19. Harper K. A., Macdonald S. E., Mayerhofer M. S. et al. Edge influence on vegetation at natural and anthropogenic edges of boreal forests in Canada and Fennoscandia // *J. Ecol.* 103, 550–562 (2015).
20. Bolton D. K., Coops N. C., Wulder M. A. Characterizing residual structure and forest recovery following high-severity fire in the western boreal of Canada using Landsat time-series and airborne lidar data // *Remote Sensing of Environment* 163, 48–60 (2015).
21. Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A. et al. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations // *Evolutionary Applications* 1, 95–111 (2008).
22. Lindner M., Maroschek M., Netherer S. et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems // *Forest Ecology and Management* 259, 698–709 (2010).
23. Blarquez O., Carcailler C., Frejaville T., Bergeron Y. Disentangling the trajectories of alpha, beta and gamma plant diversity of North American boreal ecoregions since 15,500 years // *Front. Ecol. Evol.* 2 (6), 1–8 (2014).
24. Лес рассматривается как управляемый, если для него существует план ведения лесного хозяйства для таких целей, как охрана и защита лесов, производство древесины и т. д. Управляемые леса могут быть недоступными для проведения лесохозяйственных мероприятий или не являющимися объектами лесохозяйственных мероприятий до настоящего времени.
25. Venier L. A., Thompson I. D., Fleming R. et al. Effects of natural resource development on the terrestrial biodiversity of Canadian boreal forests // *Environmental Reviews* 22, 457–490 (2014).
26. Данные о лесном фонде Российской Федерации на сайте Федерального агентства лесного хозяйства (по состоянию на 1 января 2009 года).
27. Burton P. J., Messier C., Weetman G. F. et al. The current state of boreal forestry and the drive for change // *Towards Sustainable Management of the Boreal Forest*, P. J. Burton, C. Messier, D. W. Smith, W. L. Adamowicz, Eds. NRC Research Press, Ottawa, Canada, 2003. Pp. 1–40.
28. Helmisaari H.-S., Kaarakka L., Olsson B. A. Increased utilization of different tree parts for energy purposes in the Nordic countries // *Scandinavian Journal of Forest Research* 29, 312–322 (2014).
29. Государственная программа развития лесного хозяйства на 2013–2020; URL: www.mnr.gov.ru/upload/iblock/e82/GP_2013-2020.pdf
30. Newell J. P., Simeone J. Russia's forests in a global economy: How consumption drives environmental change // *Eurasian Geography and Economics* 55, 37–70 (2014).
31. Kuuluvainen T., Tahvonon O., Aakala T. Even-aged and uneven-aged forest management in boreal fennoscandia: A review // *Ambio* 41, 720–737 (2012).
32. Maynard D. G., Paré D., Thiffault E. et al. How do natural disturbances and human activities affect soils and tree nutrition and growth in the Canadian boreal forest? // *Environmental Reviews* 22, 161–178 (2014).
33. Thiffault E., Hannam K. D., Paré D. et al. Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests—A review // *Environmental Reviews* 19, 278–309 (2011).
34. Gauthier S., Bernier P., Burton, P. J. et al. Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest // *Environmental Reviews* 22, 256–285 (2014).
35. Skogsstyrelsen, Swedish Forest Agency; URL: www.skogsstyrelsen.se/en/AUTHORITY/Statistics/Subject-Areas/Economy/Tables-and-figures/
36. Shvidenko A. Z., Gustafson E., McGuire A. D. et al. Terrestrial Ecosystems and Their Change // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, P. Y. Groisman, G. Gutman, Eds. New York, 2013. Pp. 171–249.
37. Baklanov A. A., Penenko V. V., Mahura A. G. et al. Aspects of atmospheric pollution in Siberia // *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, P. Y. Groisman, G. Gutman, Eds. New York, 2013. Pp. 303–346.
38. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker et al., Eds. Cambridge, 2013.
39. Price D. T., Alfaro R. I., Brown K. J. et al. Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems // *Environmental Reviews* 21, 322–365 (2013).
40. World Bank, *Turn down the heat: Confronting the new climate normal*. Washington, 2014; URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20595>
41. Scheffer M., Hirota M., Holmgren M. et al. III Thresholds for boreal biome transitions // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, 21384–21389 (2012).
42. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests // *Forest Ecology and Management* 259, 660–684 (2010).
43. Шабенко А. З., Шенащенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение*. 2013. № 5. С. 50–61.
44. Boulanger Y., Gauthier S., Burton P. J. A refinement of models projecting future boreal fire regimes using homogeneous fire regime zones // *Canadian Journal of Forest Research* 44 (4), 365–376 (2014).
45. de Groot W. J., Flannigan M. D., Cantin A. S. Climate change impacts on future boreal fire regimes // *Forest Ecology and Management* 294, 35–44 (2013).
46. Kurz W. A., Dymond C. C., Stinson G. et al. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change // *Nature* 452, 987–990 (2008).
47. Langor D. W., Cameron, E. K., MacQuarrie, C. J. K. et al. Non-native species in Canada's boreal zone: Diversity, impacts, and risk // *Environmental Reviews* 22, 372–420 (2014).
48. Boisvert-Marsh L., Périé C., de Blois S. Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes // *Ecosphere* 5, 83 (2014).
49. Kharuk V., Ranson K. J., Dvinskaya M. L. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in Central Siberia // *Eurasian Journal of Forest Research* 10–2, 163–171 (2007).
50. McKenney D.W., Pedlar J.H., Lawrence K. et al. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees // *Bioscience* 57, 939–948 (2007).
51. Kauppi P.E., Posch M., Pirinen P. Large impacts of climatic warming on growth of boreal forests since 1960 // *PLoS ONE* 9 (11), e111340 (2014).
52. Zhang K., Kimball J. S., Hogg E. H. et al. Satellite-based model detection of recent climate-driven changes in northern high-latitude vegetation productivity // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113 (3), G03033 (2008).
53. Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D. et al. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Global Change Biology* 11 (12), 2090–2102 (2005).
54. Beck P. S. A., Juday G. P., Alix C. et al. Changes in forest productivity across Alaska consistent with biome shift // *Ecology Letters* 14, 373–379 (2011).
55. Girardin M. P., Raulier F., Bernier P. Y., Tardif J. C. Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: A comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches // *Ecological Modelling* 213 (2), 209–228 (2008).
56. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J. Climate change and climate-induced hot spots in forest shifts in central Siberia from observed data // *Regional Environmental Change* 11, 817–827 (2011).
57. Jasinski J.P.P., Payette S. The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Québec, Canada // *Ecological Monographs* 75, 561–583 (2005).
58. Kurz W. A., Shaw C. H., Boisvenue C. et al. Carbon in Canada's boreal forest—A synthesis // *Environmental Reviews* 21 (4), 260–292 (2013).
59. Dolman A. J., Shvidenko A., Shepaschenko D. et al. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // *Biogeosciences* 9, 5323–5340 (2012).
60. Neigh C. S. R., Nelson R. F., Ranson K. J. et al. Taking stock of circumboreal forest carbon with ground measurements, airborne and spaceborne LiDAR // *Remote Sensing of Environment* 137, 274–287 (2013).
61. Bonan G. B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // *Science* 320 (5882), 1444–1449 (2008).
62. Lemprière T. C., Kurz W. A., Hogg E. H. Canadian boreal forests and climate change mitigation et al. Canadian boreal forests and climate change mitigation // *Environmental Reviews* 21, 293–321 (2013).
63. Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Global Change Biology* 20, 938–947 (2014).
64. Шабенко А. З., Шенащенко Д. Г. Углеродный бюджет лесов России // *Сибирский лесной журнал*. 2014. № 1. С. 69–92.
65. Pukkala T., Lähde E., Laiho O. Optimizing any-aged management of mixed boreal under residual basal area constraints // *Journal of Forestry Research* 25 (3), 627–636 (2014).
66. Rämö J., Tahvonon O. Economics of harvesting uneven-aged forest stands in Fennoscandia // *Scandinavian Journal of Forest Research* 29 (8), 777–792 (2014).
67. Andrew M. E., Wulder M. A., Cardille J. A. Protected areas in boreal Canada: A baseline and considerations for the continued development of a representative and effective reserve network // *Environmental Reviews* 22, 135–160 (2014).
68. Gauthier S., Bernier P. Y., Boulanger Y. et al. Vulnerability of timber supply to projected changes in fire regime in Canada's managed forests // *Canadian Journal of Forest Research* 45 (11), 1439–1447 (2015).
69. 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 // *Ecological Applications* 20 (3), 700–715 (2010).
70. Вспомогательная информация об источниках данных и методах построения рисунков доступна на Science Online (<http://science.sciencemag.org/content/sci/suppl/2015/08/19/349.6250.819.DC1/Gauthier.SM.pdf>)