



Бореальные леса и изменение климата¹

Р. Олссон, журналист и популяризатор науки

Охват и методология

В данной работе представлен прогноз о том, какое воздействие на бореальные леса окажет изменение климата и как изменения, которые произойдут с бореальными лесами, в свою очередь отразятся на климате планеты (рис. 1, с. 28). Самыми главными вопросами, на которые автор пытается ответить, являются:

- что произойдет с бореальными лесами, если до конца этого столетия среднегодовая температура воздуха на Земле повысится на 2 °С;
- чем грозит повышение температуры более чем на 2 °С.

Причины, почему прогнозы составлены именно для изменения температуры на 2 °С, представлены ниже. В данной статье прогнозы касаются главным образом малонарушенных лесов северной части бореальной зоны. По мнению автора, еще сохранившиеся крупнейшие на Земле малонарушенные лесные экосистемы заслуживают особого внимания. Кроме того, трансформация бореальных лесов, вызванная изменением климата, в ответ может оказать существенное негативное воздействие на климат планеты. Прогнозы подготовлены по результатам научных исследований. Основой для сделанных выводов послужили данные Оценки потенциального воздействия изменения климата в Арктике, опубликованные Арктическим советом в 2005 году. Для подготовки этой работы использована информация из рецензируемых научных журналов, вышедших с начала 2004 года по июнь 2009 года, сведения о России взяты из ряда источников, опубликованных на русском языке, главным образом из Оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории РФ, подготовленного в конце 2008 года Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Был принят во внимание официальный статус этого доклада и то, что в его подготовке участвовали ведущие российские ученые.

Бореальные леса: география, особенности и планетарная роль

Бореальные леса — это крупнейшая непрерывная наземная экосистема, покрывающая около 14 % территории суши, пригодной для произрастания растений. Они формируют своего рода «зеленый пояс», охватывающий Северное полушарие полосой разной ширины и проходящий через Россию, Аляску, Канаду и Скандинавию, приблизительно между 45 и 70° северной широты. Эти леса занимают около 1,4 млрд га, или 38 % общей покрытой лесом площади мира. Большая часть (46 %) площади бореальных лесов плане-



ты находится в России (рис. 2). К северу от зоны бореальных лесов расположена безлесная зона тундры. К югу граница перехода не так выражена: там формируется переходная зона, примыкающая к зоне умеренных широколиственных лесов.

Одним из самых важных экологических факторов, определяющих бореальный характер этих лесов, является продолжительное наличие снежного покрова в зимние месяцы, который предохраняет почву от низких температур, тем самым создавая микроклимат, играющий важную роль для выживания многих растений и животных. Тем не менее во многих районах произрастания бореальных лесов почва промерзает, а в ряде районов, преимущественно в Сибири, такие леса растут на вечной мерзлоте. Приблизительно половина площади бореальных лесов по-прежнему относится



Рис. 2. Пояс бореальных лесов. Данные по малонарушенным лесам (упрощенно) [7]

¹ Перевод с англ. Источник: http://www.airclim.org/reports/documents/APC23_borealforest.pdf

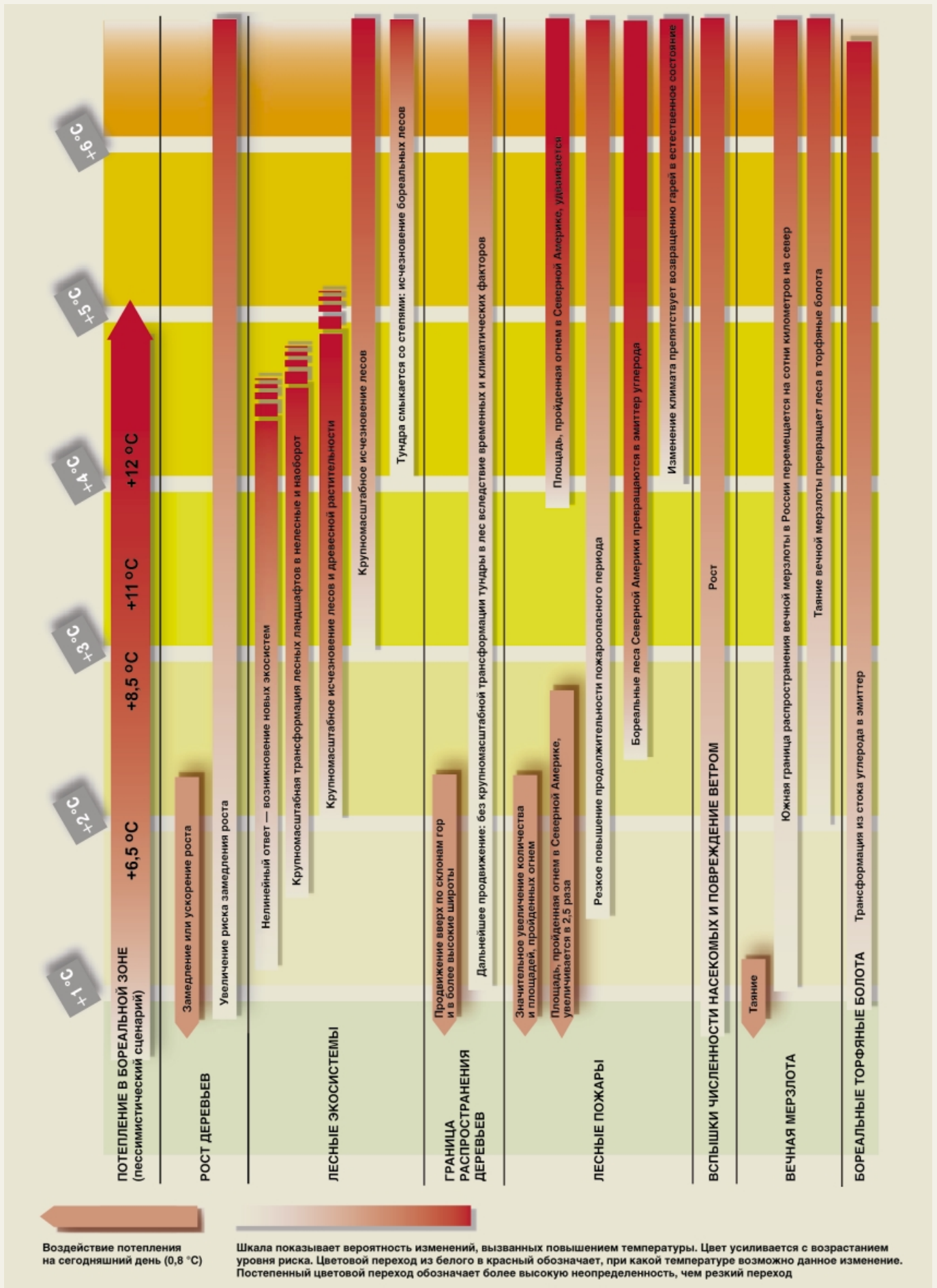


Рис. 1. Схематическое изображение климатических изменений, вызванных потеплением климата в зоне бореальных лесов в текущем столетии



к малонарушенным лесным территориям, которые пока подвергаются незначительному воздействию лесохозяйственных мероприятий и другой антропогенной деятельности. В целом, крупнейшие массивы малонарушенных лесов находятся в отдаленных и очень малонаселенных районах Севера, причем чем южнее расположен лесной массив, тем большему антропогенному воздействию он подвергается [7]. Более половины малонарушенных лесов планеты — это бореальные леса России и Канады [1]. К самым интенсивно используемым бореальным лесам относятся леса Скандинавии и западной части России, где старовозрастные леса сохранились лишь на особо охраняемых природных территориях. Бореальные леса — источник не только древесины, но и ряда важных экосистемных услуг, таких как чистая вода. Более того, они оказывают регулирующее действие на климат планеты, главным образом обеспечивая баланс теплового излучения и играя важную роль в глобальном углеродном цикле.

Глобальное потепление и порог в 2 °С

Сценарии глобального потепления

Подтвержденное на сегодняшний день потепление составляет 0,8 °С (по сравнению с доиндустриальным уровнем на конец XIX века) [12]. Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата ООН (МГЭИК), потепление будет продолжаться и достигнет 1,1–2,9 °С (средняя оценка — 1,8 °С) к 2100 году в том случае, если концентрацию парниковых газов в атмосфере удастся стабилизировать на уровне, в 2 раза превышающем доиндустриальный. Данный сценарий предполагает резкое снижение эмиссий парниковых газов. В том случае если рост использования ископаемого топлива продолжится и концентрация парниковых газов в атмосфере превысит доиндустриальный уровень в 3 раза, то потепление произойдет на 2,4–6,4 °С (средняя оценка — 4,0 °С) [17].

Потепление на 2 °С считается пороговым для катастрофического изменения климата, после достижения которого возврат к прежнему состоянию планетарной системы невозможен. Участники Международного научного конгресса по изменению климата, состоявшегося в Копенгагене в марте 2009 года, пришли к заключению, что при повышении температуры более чем на 2 °С общество потеряет контроль над ситуацией по изменению климата. К такому заключению пришли и различные авторитетные организации, что заставило многие государства поставить перед собой политическую цель о предотвращении глобального потепления больше чем на 2 °С. По данным на середину 2009 года, 133 государства, потребляющих 75 % энергии, получаемой из источников, при использовании которых происходит эмиссия CO₂, поставили перед собой такие цели [11]. Для того чтобы глобальное потепление осталось в пределах 2 °С, эмиссии парниковых газов должны начать снижаться не позднее 2015 года, а к 2050 году должны сократиться на 50–85 %. Тем не менее при нынешних политиках борьбы с изменением климата объемы эмиссий парниковых газов в ближайшие десятилетия будут продолжать повышаться [18]. В настоящее время рост глобальной эмиссии CO₂ происходит со скоростью, превышающей наиболее пессимистические сценарии МГЭИК [41]. При сохранении такой тенденции роста концентрации парниковых газов потепление превзойдет 4 °С.

Изменение климата в бореальной зоне

Согласно многочисленным прогнозам потепление в Арктическом регионе (к северу от 60-й широты) будет значительно выше среднего уровня по планете, что подтвержда-

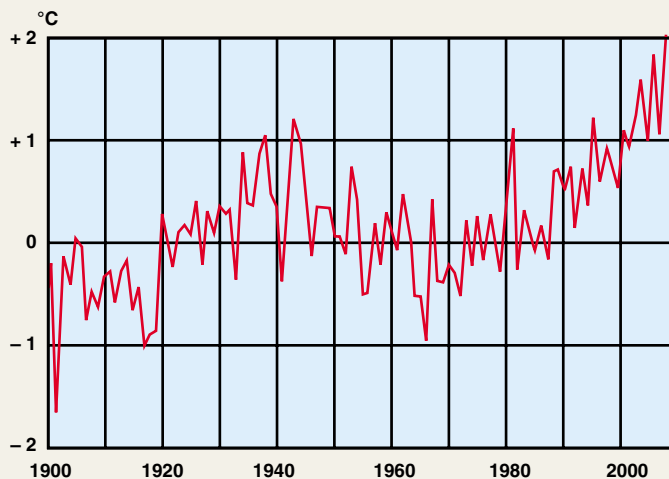
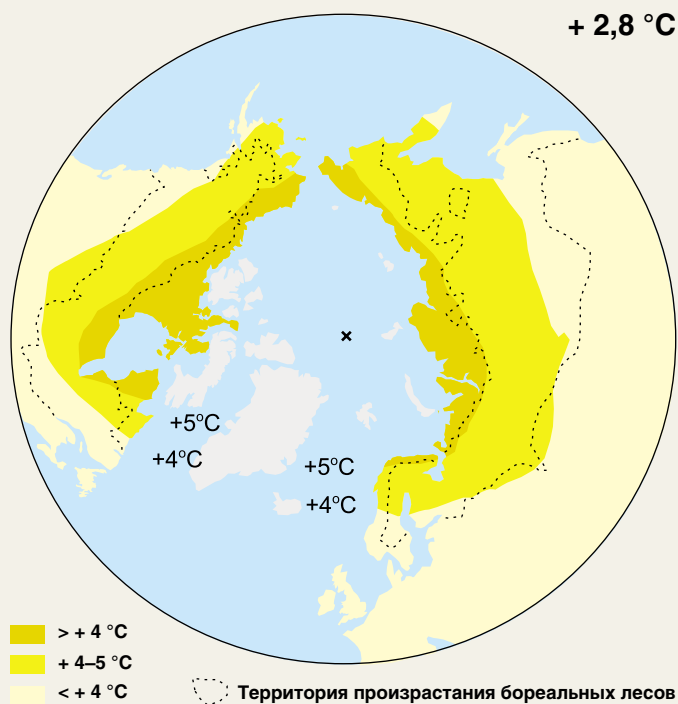


Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры поверхности Земли в Арктике с 1900 по 2005 год в сравнении со средним значением, определенным для 1961–1990 годов [42]

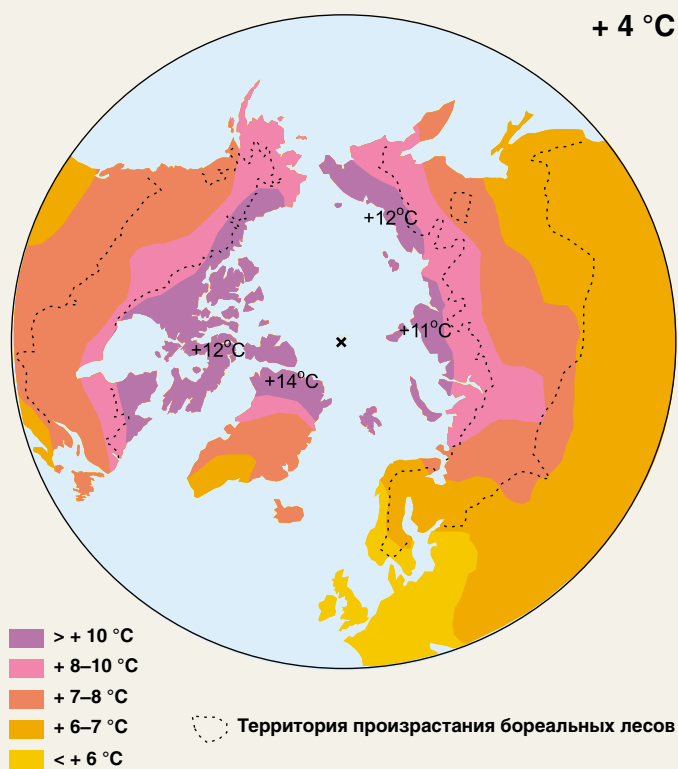
ется данными наблюдений [42]. Средняя температура в Арктике возрастает почти в 2 раза быстрее по сравнению со средней по планете за последние 100 лет [17] (рис. 3). В то время как в течение XXI века средняя температура на планете повысится на 2,8 °С, в большинстве районов произрастания бореальных лесов она поднимется на 4–5 °С, а в некоторых местах на севере Канады — даже больше (рис. 4). Сценарии, предполагающие значительные эмиссии, предусматривают большее потепление в бореальной зоне (см. таблицу). Как показано на рис. 5, зимние температуры изменятся сильнее, чем летние [18]. Необходимо отметить, что это данные достаточно «умеренного» сценария 4-й оценки МГЭИК. Как уже подчеркивалось, в настоящее время темпы эмиссий выше, чем предусматривается самым пессимистическим сценарием МГЭИК. Более того, оценки МГЭИК не учитывают дополнительного повышения температуры вследствие таких вероятных последствий глобального изменения климата, как крупномасштабное таяние вечной мерзлоты и усыхание лесов. Недавнее исследование, проведенное Управлением по метеорологии Великобритании, которое учитывало такие «побочные эффекты», показало, что при повышении средней температуры на планете на 4 °С средняя температура во многих частях бореальной зоны поднимется на 10–12 °С. Безусловно, при этом будут наблюдаться серьезные региональные различия: самое существенное повышение ожидает Восточную Канаду и Центральную Россию, самое незначительное (на 6–8 °С) — Скандинавские страны (см. рис. 4, б) [57].

Таблица. Прогноз потепления в зоне бореальных лесов (средняя годовая температура к концу нашего столетия, °С) согласно трем сценариям МГЭИК [18]

Сценарий МГЭИК	B1	A1B	A2
Средняя планетарная температура	1,8 (1,1–2,9)	2,8 (1,7–4,4)	3,4 (2,0–5,4)
Северная Азия	2–5	3,5–6	4,5–8
Запад Северной Америки	2–6,5	3,5–8,5	4–8,5
Восток Северной Америки	2–5,5	3–7,5	4–9,5
Северная Европа	1,5–4,5	3–6	3,5–6,5



а



б

Рис. 4. Два прогноза потепления в бореальной зоне к концу текущего столетия: а — при повышении среднегодовой планетарной температуры на 2,8 °С (сценарий А1В МГЭИК). По данным 4-го отчета МГЭИК [18]; б — при повышении среднегодовой планетарной температуры на 4 °С согласно более позднему прогнозу Метеорологической службы Великобритании [58]

В соответствии с климатическими моделями по всей Арктике усилится выпадение осадков. По сценариям, предполагающим высокий уровень концентрации парни-

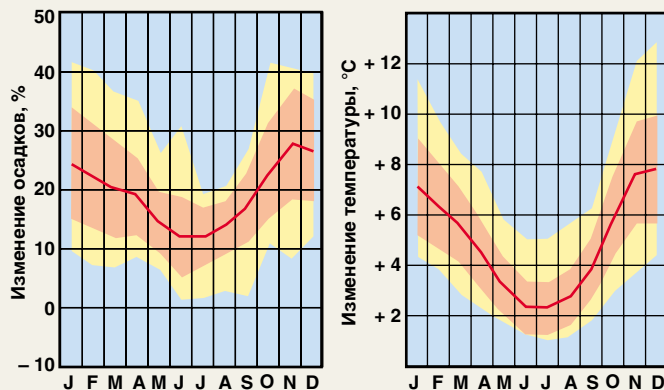


Рис. 5. Прогноз изменения осадков (слева) и среднемесячной температуры в Арктике при повышении среднегодовой температуры на планете на 4 °С в сравнении со средними значениями с 1980 по 1999 год [18]:

красная линия — средние значения, полученные при обработке 21 климатической модели; желтая зона показывает разброс значений данных моделей

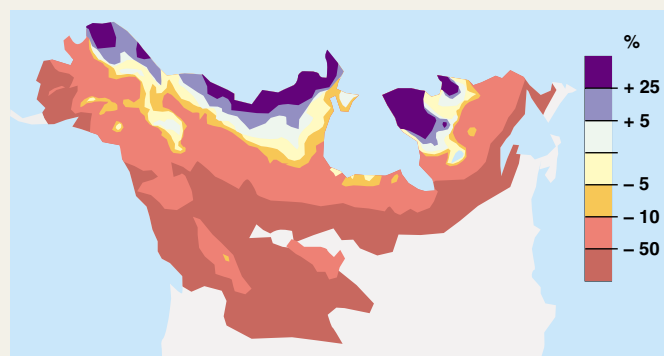


Рис. 6. Прогноз изменения глубины снежного покрова в марте в Северной Америке при потеплении на 3,4 °С (сценарий А2) по сравнению с 1961–1990 годами [18]

ковых газов, за XXI век сумма осадков увеличится на 15–20 % в большей части региона (см. рис. 5). В ряде районов Сибири и на большей части Аляски количество осадков может превысить 20 %. На юге Канады и России осадков в зимние месяцы и весной станет больше, летом — меньше [15, 18]. Продолжится сокращение зоны, в которой зимой устанавливается постоянный снежный покров, в большинстве районов с вечной мерзлотой увеличится глубина ее таяния (рис. 6). Seriously повышается вероятность катастрофических климатических явлений, таких как экстремальная жара, выпадение большого количества осадков, резкие весенние заморозки и засухи в летние месяцы, — все эти явления будут наблюдаться чаще и станут продолжительнее [17, 44].

Воздействие глобального потепления на бореальные леса

Глобальное потепление уже существенно воздействует на наземные экологические системы: это проявляется в более раннем наступлении весны и продвижении на север ареалов растений и животных [17]. В северных широтах вегетативный сезон увеличился на 2 недели [19]. Повышение планетарной температуры более чем на 1,5–2,5 °С связано с угрозой массовой трансформации лесных площадей в нелесные и, наоборот, эта угроза еще больше усугубляется при потеплении свыше 3 °С [20]. Бореальные леса наиболее подверже-



ны угрозам со стороны изменения климата, с одной стороны, из-за восприимчивости к потеплению, с другой — из-за гораздо большего потепления в арктической зоне по сравнению с увеличением средней планетарной температуры [17]. Как и в случае других экосистем, ответ бореальных лесов на воздействие внешних факторов будет нелинейным. Ответ большинства экосистем на внешние воздействия поначалу носит умеренный характер, но затем при превышении воздействием определенного порога зависимость перестает быть линейной [20].

Воздействие изменения климата на рост деревьев

Может показаться, что умеренное потепление позитивно воздействуют на рост деревьев, в особенности в условиях короткого сезона вегетации и там, где температура является ограничивающим фактором для их развития. Кроме того, повышение концентрации CO_2 в атмосфере активизирует рост растений, поскольку углекислый газ и вода необходимы для фотосинтеза — процесса, с помощью которого растения «усваивают» солнечную энергию.

Тем не менее фактическая реакция бореальных лесов на глобальное потепление не является однозначной. Более теплая погода на протяжении последних десятилетий отразилась на росте деревьев либо позитивно, либо негативно, в зависимости от региона, типа условий местопроизрастания и породы. Во многих частях бореальной зоны наблюдается массовое угнетающее воздействие теплой погоды на леса. В некоторых случаях это связано с засухами, вызванными повышением температуры [1]. Изучение годовых колец из разных районов бореальной зоны показывает широкораспространенное отрицательное воздействие повышения температуры на рост деревьев на протяжении XX века: это явление отмечено для всех исследованных хвойных пород почти во всех изученных географических районах. Ослабление роста происходит интенсивнее в более теплых областях, указывая на то, что причиной этого является воздействие более высоких температур. В большинстве районов после 1950 года (приблизительно) усиление роста в ответ на повышение температуры прекратилось и сменилось угнетением. Учеными предложено несколько объяснений, включая температурный стресс и засухи [15, 33].

Для бореальных лесов Канады установлена связь между климатом и ростом деревьев в зависимости от того, каким образом его изменение сказалось на количестве осадков в том или ином районе [22]. При глобальном потеплении ожидается усиление его негативного воздействия на рост деревьев, поскольку экосистемы и виды не смогут быстро приспособиться к все более экстремальным условиям окружающей среды [20]. Необходимо принимать во внимание то, что концентрация углекислого газа в атмосфере на протяжении по меньшей мере последних 600 тыс. лет была относительно стабильной и не превышала 300 ppm (частей на 1 млн), т. е. содержание углекислого газа в атмосфере не являлось эволюционным фактором и реакцию деревьев на более высокую его концентрацию трудно предсказать [16].

Модели воздействия изменения климата при глобальном потеплении на 2°C прогнозируют существенное угнетение роста сосны Банкса, тополя осинолистного и ели черной в управляемых лесах Манитобы (Канада). Позитивное влияние более продолжительного вегетативного сезона сводится к минимуму повышением температуры в летние месяцы, что приводит к засухе [13]. В этой части бореального региона глобальное потепление скажется на снижении уровня осадков летом. Важным фактором роста бореальных лесов является содержание в почве азота в доступной форме, вероятно поэтому более высокие температуры и увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере не приводят к усилению

роста лесов. Одно из подтверждений — зафиксированное усиление роста лесов в районах, где влага и содержание питательных элементов не являются ограничивающими факторами (пример — Европа и восточная часть Северной Америки) [1]. Эти части бореального пояса, расположенные в населенных и промышленно освоенных регионах, подвергаются воздействию антропогенного азота. В некоторых местах его концентрация в почве превышает естественный уровень в 10 раз. Однако воздействие антропогенного азота наблюдается не более чем на 30 % общей территории пояса бореальных лесов, на остальной же части содержание доступного азота в почве по-прежнему остается одним из факторов, ограничивающим рост деревьев [16].

Воздействие изменения климата на лесные экосистемы

Непосредственным и наиболее очевидным для понимания ответом бореальных лесов на глобальное потепление является смещение ареалов растений и, в конечном итоге, лесорастительных зон к северу. Согласно ряду моделей на протяжении XXI века произойдет смещение ареалов на север (в среднем на 500 км и более) [26], при этом крупные территории тундры превратятся в бореальные леса. Тем не менее данные прогнозы основаны на том, что деревья займут все подходящие для их роста места, в действительности же это вряд ли произойдет. Одна из причин состоит в том, что грядущие изменения лесорастительных зон и продвижение ареалов видов в таких масштабах не происходили в истории со времен последнего оледенения [2]. Глобальное потепление даже на 2°C приведет к смещению бореальной зоны на 500 км на север к концу текущего столетия — это подтверждается несколькими климатическими моделями [25] и означает, что климатическая зона будет смещаться на север со скоростью 5 км в год, в то время как скорость миграции деревьев не превышает в среднем 200–300 м в год [20].

Следует также отметить, что ранее, в более теплые периоды истории Земли, ничего похожего на современные бореальные биомы¹ не существовало.

Во время глобального «парникового» периода истории нашей планеты в конце Мезозоя и в период Палеогена (245–23 млн лет назад) вечнозеленые растения не были конкурентоспособными на арктических равнинах. Напротив, растительность состояла из уникальных циркумполярных лесов с доминированием листопадных хвойных и лиственных видов. Вероятнее всего, виды, формирующие современные бореальные леса, распространились из вечнозеленых горных лесов запада Северной Америки. В том случае, если вечнозеленые растения не выживают на низменностях в полярных широтах, то глобальное потепление ведет к тому, что распространение этих видов вновь ограничится горными рефугиумами, в то время как на равнинах высоких арктических широт будут доминировать низкорослые лиственные леса с невысоким уровнем биоразнообразия [49]. Палеоботанические данные, полученные в Северо-Восточной Сибири, на Аляске и северо-западе Канады, подтверждают, что в раннем Голоцене (13–10 тыс. лет назад) кустарниковые тундры в результате потепления превратились в широколиственные леса. Это произошло быстро, и новая растительность структурно и функционально отличалась от доминирующей сегодня растительности.

Таким образом, результатом глобального потепления может стать формирование листопадных бореальных лесов и исчезновение вечнозеленых видов [8]. Кроме того, прогно-

¹ Биом — крупная экосистема Земли, такая как степь (здесь и далее прим. автора).



зируемое повышение температуры, вероятно, приведет к таянию вечной мерзлоты на больших пространствах современной зоны бореальных лесов. Это скажется на трансформации лесных почв и создаст лесорастительные условия, пока не имеющие аналогов [1].

Даже если глобальное потепление ограничится повышением температуры на 2 °С, по всей видимости, результатом будет не продвижение лесных экосистем на север, а нелинейный ответ лесов, включая последствия, которые не наблюдались в результате изменений температуры в этом тысячелетии [1]. Видам с ограниченной адаптивной способностью к новым условиям окружающей среды грозит вымирание [2].

Существует концепция о движении северной границы произрастания деревьев на север, предполагающая по мере потепления климата сдвиг лесорастительных зон в результате глобального потепления и распространения бореальной растительности на территории современной зоны тундры на севере и выше в горах.

Действительно, в настоящее время в связи с потеплением наблюдается движение северных границ возможного произрастания деревьев и кустарников далее на север [15, 20], но спутниковые данные не подтверждают фактического распространения бореальных лесов в зону тундры. Для изменения границ распространения лесов на север требуются столетия [20].

Для условий Аляски определено, что между моментом изменения лесорастительных условий и фактическим продвижением леса на север должно пройти приблизительно 200 лет, это совпадает с прогнозами моделей. Несмотря на то, что модели прогнозируют продвижение ели канадской на север, наиболее вероятно, что реализуется сценарий нелинейного ответа лесов на потепление. Основными причинами станут невозможность заселения елью мест, затронутых вечной мерзлотой, изменения в распространении семян и условий, воздействующих на деревья на ранних стадиях развития, а также недавно выявленные особенности изменения роста отдельных деревьев при повышении температуры [34].

На протяжении прошлого столетия вследствие повышения средней температуры границы произрастания ели обыкновенной, сосны обыкновенной и осины поднялись выше по склонам гор на 95 % модельных площадей Скандинавии (в среднем на 70–90 м с максимум 200 м). Тем не менее наибольшее продвижение было возможным только в определенных условиях рельефа, в первую очередь в местах, защищенных от ветра, и на крутых вогнутых склонах. В местах, открытых ветру, продвижение видов вверх гораздо скромнее. Таким образом, даже в случае существенного потепления границы ареалов не передвинутся широким фронтом и альпийская тундра останется по-прежнему безлесной [26]. Результаты исследования, проведенного в Квебеке, показывают, что местные топографические факторы существенно влияют на подъем границ произрастания и развитие растений из семян на ранних стадиях. Распространение леса в южной части зоны тундры замедляется неблагоприятным воздействием ветров [12].

Воздействие других факторов

Для более глубокого понимания механизмов воздействия глобального потепления на бореальные леса необходимо учитывать влияние климатических изменений на ряд важных для лесов факторов. Нарушения экосистем являются движущей силой динамики состояния растительности бореального биома. Лесные пожары, ветровалы, гибель деревьев вследствие вспышек численности насекомых играют важную роль в формировании лесных ландшафтов. Пожары имеют особое значение, поскольку охватывают существен-

ные территории и глубоко воздействуют на лес и почву. Кроме того, они влияют на динамику мерзлотности, региональные климатические условия и на углеродный баланс [1]. Воздействие климатических факторов, особенно продолжительных периодов теплой погоды, в бореальных лесах нередко приводит к возникновению условий, следствием которых являются лесные пожары и вспышки численности насекомых-вредителей. Из-за изменения климата бореальные леса уже сейчас подвергаются стремительным изменениям, ведущим к долговременным последствиям. Воздействие таких факторов на уровне ландшафтов очень заметно в зоне лесотундры. Потепление, нарушения экосистем и растительность влияют друг на друга и все вместе — на скорость и характер изменения состояния лесов. Понимание механизма воздействия этих факторов и их взаимного влияния очень важно для прогнозирования воздействия климатических изменений и их последствий для экосистем бореальных лесов [1].

Лесные пожары

За исключением регионов, в которых лесохозяйственные мероприятия снижают риск возгорания и эффективно применяются меры по подавлению лесных пожаров, в последние десятилетия по всей бореальной зоне пожары участились, а пройденные огнем лесные площади увеличились. В частности, в бореальных лесах Северной Америки с 1960 по 1990 год площадь, пройденная огнем в результате пожаров, возникших по естественным причинам, возросла в 2,5 раза, в то время как площадь пожаров антропогенного характера осталась прежней [23]. За последние 20 лет площадь, пройденная лесными пожарами в год на западе Северной Америки, удвоилась [1]. В Канаде пять из восьми крупнейших пожаров позже 1920 года произошли за последние 17 лет. За 56 лет непрерывного мониторинга лесных пожаров на Аляске семь из одиннадцати крупнейших лесных пожаров произошли после 1988 года. Количество крупных лесных пожаров в последние годы увеличилось и в России [46].

Согласно официальным данным в среднем около 1 млн га лесов ежегодно страдают от пожаров (по данным за 2003–2007 годы). За 1990-е годы, отличавшиеся более теплой погодой, выгорела площадь, на 29 % превышающая площадь, выгоревшую за 1980-е. Следует отметить значительное расхождение официальных данных с информацией спутникового наблюдения: согласно ей этот показатель составляет 55 % (рис. 7). Тем не менее и официальная информация, и данные, полученные со спутников, свидетельствуют об увеличении с 1998 года площади лесов, пройденных огнем за год. В годы с нормальной пожарной обстановкой около 22 % площади, пройденной огнем, приходится на разрушительные верховые пожары. В неблагоприятные годы

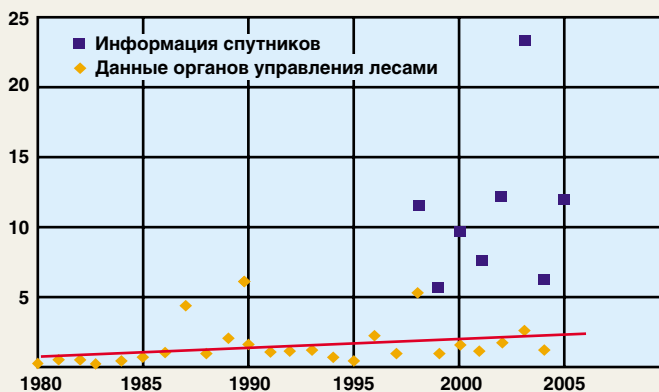


Рис. 7. Площадь, пройденная лесными пожарами в России с 1980 по 2005 год, млн га [46]



этот показатель возрастает до 50 %. С 1998 по 2002 год верховые пожары доминировали на протяжении 4 из 5 лет. Более того, сложная пожарная обстановка наблюдалась в 2003, 2005 и 2006 годах. Соответственно 7 из 9 лет в период с 1998 по 2006 год в Сибири характеризовались сложной пожарной обстановкой [46].

Административная реформа управления лесным сектором в последнем десятилетии оказала существенное неблагоприятное влияние на эффективность борьбы с лесными пожарами в России. Организация, отвечавшая за обнаружение лесных пожаров и борьбу с ними с воздуха (Авиалесоохрана), в которой ранее работало около 10 тыс. человек (включая пожарных-парашютистов) и в чьем распоряжении было несколько сотен самолетов, утратила большую часть потенциала [15].

Было разработано четыре климатические модели динамики лесных пожаров в России и Канаде в условиях более теплого климата. Согласно всем этим моделям угроза крупных лесных пожаров существенно возрастает для обеих стран при повышении среднегодовой температуры на планете выше 2 °С. Тем не менее возможности данных моделей по прогнозированию динамики возгораний ограничены [1, 15].

Модели прогнозируют существенную динамику площади лесных пожаров при различных сценариях изменения климата в этом столетии [20]. В том случае, если глобальное потепление достигнет 4 °С, площадь, пройденная огнем за год в бореальных лесах Северной Америки, может возрасти к концу XXI века на 74–118 % от сегодняшней величины [10].

По прогнозам, продолжительность пожароопасного периода в лесах бореальной зоны России к концу нынешнего столетия может возрасти до 12–30 % в том случае, если потепление составит 2,4 °С. Наибольшее увеличение продолжительности ожидается в южной части бореальной зоны, как в европейской части, так и в Сибири, без существенно увеличения в других районах [36]. Возможности служб, отвечающих за борьбу с пожарами, ограничены рядом причин, включая удаленность территорий и неразвитость транспортной инфраструктуры во многих районах произрастания бореальных лесов. В результате участвовавшие в условиях все более теплого климата пожары не будут тушиться на начальных стадиях, приводя к увеличению площадей, пройденных огнем, вне корреляции с непосредственно самим потеплением. Согласно прогнозам площадь, проходящая огнем каждый год, в некоторых районах зоны бореальных лесов может удвоиться, а частота возгораний — возрасти на 50 % [10]. Таким образом, изменение режима горимости лесов может повлиять на бореальные леса не меньше, чем само потепление. Уже сейчас в Восточной Канаде вследствие более частых и более крупных пожаров изменяются состав и структура растительности, происходит смена лесных сообществ с доминированием ели сообществами, в которых доминирует сосна, с уменьшением полноты древостоя на 75–95 % [20].

Одним из потенциальных долговременных последствий увеличения риска лесных пожаров является образование однородных лесных ландшафтов с преобладанием пионерных лиственных пород [1]. Изменение климата и условий произрастания может сделать невозможным возвращение растительности в исходное состояние. Воздействие пожаров на микроклимат в контексте лесовосстановления изучалось в районе Тунтса на территории Лапландии (Финляндия), где в 1960 году произошел крупный лесной пожар. Помимо прочих воздействий повреждение огнем деревьев привело к повышению скорости ветра на 60 % и изменению температурного режима почв из-за уменьшения уровня снежного покрова на 20–30 см. В результате неблагоприятное изменение местных условий произрастания может препятствовать восстановлению леса в этом районе [54].

Вспышки численности насекомых

Воздействие вспышек численности насекомых на бореальные леса значительно. Площадь, на которой деревья повреждаются вследствие вспышек численности насекомых, превышает площадь, повреждаемую огнем. Например, в Восточном Онтарио с 1941 по 1996 год листоверткой-почкоедом еловым (*Choristoneura fumiferana*) повреждено более чем в 20 раз больше лесных площадей, чем огнем [55]. В настоящее время в Британской Колумбии наблюдается беспрецедентная вспышка численности соснового лубоеда (*Dendroctonus ponderosae*), которая затронула 37 млн га бореальных лесов [29]. Многолетняя вспышка численности елового лубоеда (*Dendroctonus rufipennis*) на полуострове Кенаи (Аляска) привела к гибели около 1 млн га лесов с 1992 по 2000 год, уничтожив 90 % елей в данном районе [55].

Сильнейшая вспышка численности непарного шелкопряда в 1990-е привела к массовой гибели лесов в Красноярском крае, ущерб от которой оценивается в 50 млн м³ древесины (объем ее заготовки в регионе за 7 лет) [15]. Тем не менее следует отметить, что такие и даже более существенные вспышки численности насекомых характерны не только для последних десятилетий: они неоднократно фиксировались на протяжении последних 100 лет [46]. Вспышка численности елового лубоеда на Аляске связана с экстремальными погодными условиями — несколькими последовательными годами с теплым и сухим летом. Рост численности вредителя в 2003–2004 годах связан с рекордно высокими температурами летом 2004 года. Вспышки численности этого вида вызваны тем, что при высоких летних температурах насекомые успевают пройти полный жизненный цикл за год, а не за два, как при нормальных погодных условиях [55].

Листовертка-почкоед еловый является самым опасным для лесов листогрызущим насекомым в Северной Америке. Воздействие климатических изменений на жизненный цикл этого вида — основной фактор, влияющий на частоту и интенсивность вспышек его численности. Ученые обнаружили, что у популяций почкоеда, возникших в местах с более суровыми зимами, яйца, как правило, более тяжелые, чем у популяций, сформировавшихся в менее суровых условиях. Эта генетическая адаптация позволяет насекомым быстро увеличивать численность после мягких зим — самка может произвести больше яиц [55].

В условиях более теплого климата ожидается учащение и усиление вспышек численности насекомых. Более того, изменение климата может сказаться на увеличении численности насекомых, питающихся древесной растительностью, и через нарушение связи хозяин — паразит. Исследования показывают ослабление связи хозяин — паразит при потеплении климата, вызванное тем, что при изменении сроков прохождения насекомым-хозяином жизненного цикла, паразитам сложнее находить его особи. Учитывая важную роль паразитов в регулировании численности насекомых, питающихся древесной растительностью, и в малонарушенных, и в управляемых экосистемах при изменении климата следует ожидать более частых и более интенсивных вспышек их численности вследствие нарушения связи паразит — хозяин [48].

Ветровал

Согласно прогнозам потепление климата в зоне бореальных лесов вызовет учащение аномальных метеорологических явлений, включая ураганы [17]. С большой вероятностью это приведет к увеличению поврежденных деревьев в бореальных лесах вследствие ветровала и бурелома.

Бореальные леса — одна из наиболее уязвимых зон Земли

В случае, если глобальное потепление превысит 2 °С, изменение экосистем бореальных лесов может быть еще



более глубоким, чем изменения, описанные в предыдущих разделах. Непосредственное воздействие потепления на рост лесов и их распространение в сочетании с опосредованным воздействием факторов, вызванных, в свою очередь, климатическими изменениями, могут привести к существенному изменению больших территорий бореальных лесов, превратив их в редины или вовсе в травянистые сообщества.

В регионах, где в южной части бореальной зоны леса переходят в травянистые сообщества, прогнозируется сокращение лесных площадей из-за воздействия засух, насекомых-вредителей и пожаров. При глобальном потеплении больше чем на 2–3 °С прогнозируется значительная деградация лесов высоких широт [20].

Согласно прогнозам к концу столетия среднегодовые температуры в южной части зоны бореальных лесов Центральной Евразии будут приблизительно соответствовать температурам, сейчас характерным для зоны лесов умеренного климата, но недостаток влаги и низкая скорость миграции древесной растительности не позволят сформироваться умеренным лесам на месте бореальных. В Сибири южно-таежная растительность сменится лесостепью. При климатических сценариях, прогнозирующих более значительное повышение среднегодовой температуры на планете (7 °С и выше в Арктике), сочетание повышения температуры и засухи приведет к смыканию тундр с семиаридными степями Евразии, при этом бореальные леса полностью исчезнут [1].

Группа ведущих международных экспертов считает бореальные леса одной из шести наиболее уязвимых точек Земли. При исчезновении уязвимых точек или критических изменениях произойдет неожиданный и резкий ответ планетарной экосистемы на повышение потепления сверх определенного порога. По мнению специалистов, нелинейный ответ экосистемы на глобальное потепление возможен уже в текущем столетии при повышении среднегодовой температуры в пределах 6 °С. Исчезновение лесов будет следствием нескольких факторов, включая недостаток влаги, высокие летние температуры, ведущие к гибели деревьев, а также опосредованных факторов, таких как увеличение подверженности деревьев заболеваниям. Другим важным фактором будет учащение и повышение интенсивности лесных пожаров. В районах бореальной зоны, расположенных в глубине материков, виды древесной растительности, характерные для умеренных широт, не смогут продвинуться дальше на север из-за низких зимних температур. После того как глобальное потепление превысит определенное пороговое значение, скорость негативных процессов резко увеличится и весьма ощутимые изменения в экосистемах бореальных лесов могут произойти в течение 50 лет. Пороговое значение глобального потепления, при котором возможно массовое исчезновение бореальных лесов, находится в пределах 3–5 °С (повышение средней планетарной температуры), точнее определить который пока не представляется возможным [31].

Таяние вечной мерзлоты

Вечная мерзлота занимает обширные территории суши в высоких широтах Северного полушария, где создаются условия для низких температур в зимние месяцы. К югу от пояса вечной мерзлоты лежат районы, в которых почва промерзает непостоянно или вечная мерзлота присутствует отдельными участками. В этой зоне температура в зимние месяцы недостаточно низка и не создаются условия для повсеместного распространения вечной мерзлоты, а ее распространение обуславливается местными факторами, такими как топографические условия, гидрология, характер растительности и глубина снежного покрова [45].

Бореальные леса занимают значительные площади на вечной мерзлоте и будут затронуты изменениями структуры

почв и гидрологических условий при ее таянии, вызванном глобальным потеплением. В России экотон¹ лесотундры, доминантами которого являются ель и лиственница, занимает пояс шириной несколько сотен километров. В северной части Западной Сибири сосновые леса растут на вечной мерзлоте.

Одним из последствий таяния вечной мерзлоты является усиление вывала деревьев. Другой вероятный негативный фактор — подтопление и гибель лесов при таянии верхних слоев мерзлоты, поскольку более глубокие не растаявшие слои мерзлоты не позволят воде впитываться в землю [15].

Прогнозные модели показывают, что потепление вызовет деградацию вечной мерзлоты на большей части территории Канады. С 1850-х по 1990-е годы зона вечной мерзлоты сократилась на 5,4 %. С 1850 по 2002 год глубина ее залегания увеличилась в среднем на 3 м, что означает увеличение активного слоя² в среднем на 34 %. Исследования выявили очаги, где вечная мерзлота полностью растаяла. Они становятся крупнее и встречаются чаще. Вследствие наличия этих очагов возможны негативные последствия для гидрологии ландшафтов и экосистем [56].

Пожары сокращают содержание органических веществ в верхнем слое почвы, что приводит к большему прогреванию почв и таянию вечной мерзлоты. Они обусловили таяние крупных участков вечной мерзлоты на бореальных болотах, что вызывает существенное изменение гидрологического режима территорий и растительности [45]. В России вследствие глобального потепления ожидается перемещение южной границы вечной мерзлоты на несколько сотен километров севернее. Наиболее серьезные изменения произойдут на низменностях Западной Сибири [15] (рис. 8). Изучение



Рис. 8. Распространение вечной мерзлоты в Северном полушарии [45]

¹ Экотон — переходная зона между крупными растительными сообществами, например такими, как лес и степь.

² Активный слой — верхний слой вечной мерзлоты, оттаивающий летом и замерзающий зимой.



мест таяния вечной мерзлоты на Аляске показывает, что в течение 100 лет бореальный лес на таких участках сменится сначала водно-болотными экосистемами с преобладанием осоки, а затем произойдет трансформация в торфяные болота. Трансформация водно-болотных экосистем с преобладанием осоки в торфяные болота совпала с увеличением продолжительности вегетационного периода. Наблюдаемые сукцессионные изменения водно-болотных экосистем являются индикатором наступления нового этапа в ответе экосистем на изменение климата в регионе. Дальнейшее потепление и (или) усиление воздействия пожаров может привести к деградации вечной мерзлоты и распространению торфяных болот. Одновременно на повышениях возникнут засушливые условия, которые будут препятствовать развитию как мхов, так и подраста ели [37].

Влияние бореальных лесов на климат

Не только изменение климата воздействует на леса: бореальная экологическая зона является ключевым регионом, с одной стороны, чувствительным к изменениям окружающей среды, с другой — обладающим таким размером, который сам способен существенно воздействовать на климатические условия. Это воздействие определяется следующим:

- бореальные леса влияют на баланс поглощения и отражения тепловой энергии поверхностью земли, изменяя альbedo поверхности, которое зависит от характера землепользования, возникновения гарей, состава растительности;
- бореальные леса влияют на содержание парниковых газов в атмосфере, они могут как поглощать, так и выделять углерод в атмосферу в зависимости от изменений, происходящих в самих лесах;
- бореальные леса поддерживают водный баланс [46].

Во многом воздействие бореальных лесов на климат определяется способностью лесов поглощать углерод из атмосферы и связывать его в биомассе и почве. В бореальных лесах находится около 27 % углерода, содержащегося во всей растительности планеты, и от 25 до 30 % почвенного карбона планеты [52]. Вместе с тундрой бореальный лес представляет собой крупнейший на Земле резервуар углерода, который содержится в основном в органических веществах лесной подстилки [46]. Равнинные бореальные леса, примыкающие непосредственно к югу зоны вечной мерзлоты, связывают в органических веществах в почве углерода больше, чем какая-либо другая экосистема Земли [1]. Тем не менее согласно ряду исследований бореальные леса в целом способствуют потеплению климата, поскольку их воздействие в части поглощения углерода почвой и растительностью нейтрализуется активным поглощением солнечной радиации темным лесным пологом [47].

Воздействие бореальных лесов на баланс теплового излучения

Бореальные леса значительно влияют на баланс теплового излучения. Неровная структура поверхности полога, его темный цвет объясняют активное поглощение им солнечной радиации, которая затем превращается в тепловую энергию. Наоборот, ровная и покрытая белым снегом поверхность тундры обладает высокой отражающей способностью. В высоких широтах, где снег держится на земле полгода или даже больше, разница между поглощением солнечной радиации лесом и тундрой весьма ощутима. На среднюю годовую температуру планеты бореальные леса воздействуют больше, чем другие экосистемы Земли: утрата лесов снизит температуру, а их распространение на террито-

рию, в настоящее время занятую тундрой, вызовет потепление климата [1]. Увеличение площадей гарей может еще существеннее повлиять на энергетический баланс, поскольку это приведет к возникновению гомогенных ландшафтов, в которых будут доминировать пионерные лиственные породы. По всей видимости, трансформация сообществ с доминированием хвойных в сообщества с преобладанием лиственных будет замедлять потепление из-за изменения альbedo поверхности Земли [1, 3].

Аэрозольные вещества и образование облаков

Вследствие выделения в атмосферу аэрозольных веществ биологического происхождения увеличивается конденсация водяных паров. Благодаря наличию ядер конденсации над территориями произрастания бореальных лесов в атмосфере образуется вдвое больше облаков по сравнению с близлежащими территориями, на которых леса отсутствуют [47]. Исследования европейских лесов показывают, что лес является основным источником аэрозольных частиц, превосходя в объемах выбрасываемых в атмосферу ядер конденсации даже антропогенные источники [51].

Сочетание специфических характеристик альbedo, создаваемых бореальными лесами, и лесов как источника ядер конденсации играет важную роль в поддержании глобального гомеостатического равновесия. В условиях холодного климата эффект, создаваемый альbedo снежного покрова и растительности, доминирует, и бореальный лес в целом способствует потеплению климата. В то время как в условиях более теплого климата бореальные леса выделяют в атмосферу больше аэрозольных веществ органического происхождения, тем самым изменяя альbedo поверхности облаков и приводя к снижению температуры воздуха [47]. Следовательно, вызванные потеплением климата изменения в составе растительности и географическом распространении бореальных лесов будут иметь большое значение для баланса отражения и поглощения солнечной радиации, и глубокое понимание этих механизмов важно для прогнозирования климата в будущем [51].

Бореальные леса и глобальный цикл углерода

Бореальные леса поглощают углекислый газ в процессе фотосинтеза и связывают углерод в живой и мертвой растительной материи. Основной сток углерода приходится на стволы крупных деревьев и лесную почву. Одновременно леса выделяют углекислый газ в атмосферу при дыхании растений и животных, а также при разложении органической материи и лесных пожарах. Определяющими для баланса поглощения и выделения являются следующие факторы:

- скорость роста растений;
- скорость разложения мертвых органических остатков;
- скорость распространения или деградации вечной мерзлоты;
- частота и интенсивность пожаров.

Эти четыре фактора, в свою очередь, определяются степенью нарушений на ландшафтном уровне. Скорость, период и характер нарушений экосистем пожарами и насекомыми — основные факторы, обуславливающие превышение поглощения лесами углерода над выделением.

По всей видимости, основным механизмом краткосрочных нарушений углеродного цикла бореальных лесов в результате климатических изменений являются вариация скорости разложения органики лесной подстилки и древесного опада, а также степень минерализации почвы, что определяется видовым составом, зависящим от изменения климата [1].

Поглощение деревьями и другими растениями углекислого газа из атмосферы ускоряется или замедляется вслед-



ствие повышения температуры. Это зависит от видов, месторасположения, степени повышения температуры и ряда других климатических факторов, таких как интенсивность осадков, — на все эти факторы влияет изменение климата [1]. Раньше модели прогнозов об изменениях наземных экосистем в ответ на изменение климата предполагали достижение пика наземных карбоновых стоков примерно к 2050 году, а затем их снижение к концу 21 столетия [39]. Как показано выше, рост деревьев при потеплении климата в бореальных лесах будет усиливаться не всегда. Во многих случаях в ответ на климатические изменения рост ухудшается, а с дальнейшим повышением среднегодовой температуры эти негативные закономерности могут проявиться еще сильнее и шире. Более того, удлинение сезонов вегетации и другие изменения, прогнозируемые в связи с изменением климата, приведут к ускорению разложения мертвой органики и в итоге к непостоянному стоку углерода [28]. Баланс углерода в наземных экосистемах особенно подвержен изменениям вследствие глобального потепления в осенне-весенний период [24]. Обнаружено, что и фотосинтез, и дыхание осуществляются сильнее при более теплой погоде осенью, тем не менее интенсивность дыхания выше. Напротив, тепло весной больше способствует усилению фотосинтеза. Модели и наблюдения показывают, что северные наземные экосистемы могут терять углерод в ответ на потепление осенью в объеме $0,2 \text{ Гт}^1$ на 1°C . В результате повышения осенних температур произойдет выделение 90 % углерода, связанного весной, в ответ на повышение весенних температур. До настоящего времени рост температур в осенние месяцы происходил быстрее, чем в весенние. При сохранении этого тренда способность экосистем поглощать углерод снизится сильнее, чем прогнозировалось раньше [39]. Моделирование ответа насаждений ели черной на Аляске в целом подтверждает предположение о том, что сезонные изменения температуры влияют на баланс углерода, и вывод, что связывание углерода необязательно возрастет в ответ на потепление климата [53]. Исследования показывают, что общий сток углерода в самих деревьях возрастает при лучшем прогревании почвы летом, в то время как сток в почве снижается. Другими словами, при потеплении объем стока увеличивается в надземной части и снижается в почвенной, что, очевидно, делает сток в бореальных лесах чувствительным к лесным пожарам [21].

В российских лесах в целом наблюдается значительное увеличение доли биомассы зеленых частей деревьев (листьев и хвои). На севере Сибири, где климат стал теплее, но суше, снижается доля биомассы зеленых частей и повышается доля корней и надземных одревесневших частей. Эти изменения соответствуют результатам экспериментов и прогнозам математических моделей, согласно которым с повышением температуры рост связывания углерода листовой частью деревьев будет происходить, но при недостатке почвенной влаги будет замедляться. Вместе с тем отмечается, что фиксирование увеличения доли листовой части деревьев может быть вызвано ошибками при расшифровке спутниковых данных и системными ошибками при определении углеродного стока в живой биомассе российских лесов [30].

Увеличение содержания почвенного азота (или, другими словами, плодородия лесных почв) является одним из факторов, содействующих более активному росту боре-

альных пород и, с другой стороны, замедляющих разложение органических остатков в почве, что увеличивает таким образом карбоновые стоки почвы и стволов деревьев [38]. Тем не менее, по всей видимости, актуальность этого для старовозрастных северных лесов невысока: содержание азота в почвах этих лесов близко к естественному уровню. Как отмечалось выше, приток антропогенного азота бореальные леса испытывают не более чем на $\frac{1}{3}$ территории [16].

Ранее считалось, что старовозрастные леса не имеют значения как сток углерода и для того чтобы углерод поглощался лесами, в них необходимо вести интенсивное хозяйство. Исследования же показали, что леса могут накапливать углерод столетиями. Нетто-баланс углерода как правило положительный в лесах возрастом от 15 до 800 лет. Около половины малонарушенных лесов мира расположено в умеренной и бореальной зонах Северного полушария, причем в основном в бореальной зоне. Согласно оценкам живой биомассой и почвами этих лесов каждый год поглощается около $1,3 \text{ Гт}$ углерода, что в пересчете составляет 10 % стока углерода всеми экосистемами Земли. Старовозрастные леса накапливают углерод веками, поэтому его в них содержится большое количество. Значительная часть углерода попадет в атмосферу при освоении этих лесов [35].

Нарушения экосистем

Нарушение экосистем является важнейшим фактором регионального баланса углерода и одним из факторов сезонных колебаний баланса углерода наземных экосистем. Модельные исследования и полевые эксперименты показывают, что в течение нескольких лет после того или иного нарушения экосистем происходит значительная потеря почвенного углерода и питательных веществ. Лесные пожары — самое значительное нарушение, но вспышки численности насекомых и ветровалы также оказывают значительное воздействие [1]. Результаты модельных экспериментов свидетельствуют о том, что в 1980-е годы лесные экосистемы Канады из стоков углерода трансформировались в эмиттеры. Это объясняется изменением режимов нарушений и подтверждается последней статистикой пожаров [1]. Согласно исследованиям моделей применительно к гипотетическим бореальным лесам Северной Америки потери углерода вследствие нарушений не компенсируются более интенсивным ростом, если принять во внимание усиление разложения органики вследствие изменения характера нарушений. Только очень сильное увеличение темпов роста бореальных лесов могло бы компенсировать утрату углерода вследствие изменения характера нарушений, тем не менее, как показано выше, бореальные леса не ответят на глобальное изменение климата усилением роста [28].

Лесные пожары

Лесные пожары играют важнейшую роль в динамике углерода в циркумполярном регионе не только во время их воздействия, но и потом. Даже после низового пожара может произойти значительный отпад деревьев, что приведет к эмиссии углерода при отмирании тонких корней и листовой части деревьев (листьев и хвои), поскольку именно эти части разлагаются наиболее быстро [1]. Как отмечалось выше, баланс углерода в бореальных лесах Канады напрямую зависит от изменений характера нарушений в экосистемах, вызванных пожарами, которые произошли с 1948 по 2005 год [6]. Имеются свидетельства, что «язвы», оставшиеся в лесных ландшафтах после пожаров, остаются нетто-эмиттерами углерода даже 30 лет спустя. Результаты экспериментов в бореальных лесах Аляски показывают, что в первые 20–30 лет из-за разложения органики теряется око-

¹ Гт — гигатонна ($1 \cdot 10^{15}$ г). Общий сток углерода в почвах оценивается в 1500 Гт, сток растущих растений — 500 Гт. В атмосфере содержится 30 Гт углерода, ежегодная эмиссия углерода от сжигания ископаемого топлива и другой промышленной деятельности составляет 8 Гт. За год бореальные леса поглощают приблизительно 1 Гт углерода [17].



ло 20 % почвенного углерода, стимулируемого нагреванием почвы при пожаре [1].

Вследствие лесных пожаров эмиссия углерода в Канаде с 1959 по 1999 год составляла ежегодно 0,027 Гт, в некоторые годы превышая 0,1 Гт. В Сибири с 1998 по 2002 год она достигала в среднем около 0,2 Гт [47]. Объемы эмиссий, возникающих вследствие как непосредственного, так и опосредованного воздействия огня на бореальные леса, могут превысить 20 % от общего объема эмиссий в результате сгорания биомассы на всей планете [1]. Изменение температурного режима почв и деградация вечной мерзлоты от воздействия пожаров подтверждены научными исследованиями. Более теплые и сухие условия, наступающие после лесного пожара, усиливают разложение органических остатков и снижают сток углерода. Согласно результатам моделирования потепление на 5 °С приведет к уменьшению почвенного стока углерода на 6–20 % в течение 25 лет [1].

Моделирование сценариев потепления на 2,4–3,4 °С показывает, что эмиссия углерода в результате пожаров к 2100 году возрастет в 2,5–4 раза (по сравнению с последним десятилетием XX столетия), в зависимости от конкретного сценария потепления и от тех или иных предположений о реализации усиления роста деревьев благодаря большему содержанию в атмосфере углекислого газа. Несмотря на увеличение эмиссий углерода, вызванных пожарами, результаты моделирования свидетельствуют о том, что в случае, если деревья будут расти лучше благодаря более высокому содержанию углекислого газа в атмосфере, в XXI веке бореальные леса Северной Америки будут стоком углерода. Наоборот, если исключить фактор усиления роста деревьев, леса превратятся в эмиттер углерода, причем при потеплении на 3,4 °С эмиссия будет в 2,1 раза больше, чем при потеплении на 2,4 °С [4].

Эмиссия лесами углерода вследствие лесных пожаров является одним из основных факторов воздействия на климат, при этом возрастание объема эмиссий углерода будет приводить к более теплому и сухому климату, что, в свою очередь, приведет к усилению угрозы возникновения пожаров [46]. Тем не менее увеличение количества пожаров увеличит альbedo земной поверхности и результирующее воздействие на потепление климата сложно предсказать с точностью [14]. Имеются данные одного исследования, которое показывает, что в том случае, если пожары происходят на территории раз в 80 лет, снижение температуры благодаря изменению альbedo превышает повышение температуры вследствие эмиссии углерода [5].

Вспышки численности насекомых

До настоящего времени воздействие со стороны вспышек численности насекомых на динамику углерода не учитывалось в прогнозных климатических моделях. Однако вспышки численности насекомых являются серьезным фактором, который может существенно снизить возможности бореальных лесов в отношении связывания атмосферного углерода. Гибель деревьев сокращает способность лесов связывать углерод и одновременно в будущем приводит к увеличению эмиссий вследствие разложения опада. Вспышка соснового лубоеда в Британской Колумбии превратила 370 тыс. км² лесов из стока углерода в эмиттер, причем эмиссия углерода не прекращается и после затухания самой вспышки. В один из наиболее тяжелых годов с точки зрения размножения насекомых объем эмиссии углерода с данной территории доходил до 75 % объема среднегодовой эмиссии углерода вследствие пожаров на всей территории Канады [29].

В результате двух последних вспышек численности насекомых в управляемых лесах Канады последние превратились

из стока в эмиттер углерода; согласно оценкам эмиссия углерода ими в период с 2008 по 2012 год может составлять в эквиваленте от 0,03 до 0,245 Гт углекислого газа в год. Это показывает, что усилия по сохранению баланса атмосферного углерода путем интенсификации лесопользования могут быть сведены к нулю в результате природных нарушений, причем это относится не только к Канаде, но и к другим странам [27].

Ветровал и бурелом

Ураган «Гудран», прошедший по территории Швеции в январе 2005 года, привел к образованию ветровала и бурелома объемом 66 млн м³ на площади около 2 720 км². Согласно оценкам в первый год после урагана нетто-эмиссия углерода на пострадавшей территории составила 897–1259 г углерода с 1 м². По объему эта эмиссия значительно превышает эмиссию, происходящую в результате вырубки лесов (от 100 до 420 г). За первый год после урагана сток углерода пострадавшей территории сократился на 0,003 Гт.

Мощный ураган «Лота» 1999 года сократил сток европейских лесов на 0,016 Гт, что составляет около 30 % всего объема стока биомассы европейских лесов. Таким образом, при разработке прогнозных моделей климатических сценариев нельзя игнорировать такой фактор повреждения лесов, как сильный ветер [32].

Таяние вечной мерзлоты

Таяние вечной мерзлоты и разложение органических остатков, которые до этого были заморожены, являются одним из самых значительных факторов, увеличивающих эмиссию углерода из наземных экосистем в атмосферу. Воздействие этого фактора усиливает пожары, резко увеличивающие эмиссию углерода в атмосферу с территорий, которые раньше были заняты вечной мерзлотой. Потепление климата приведет к утрате значительной площади вечной мерзлоты в региональном и мировом масштабах, что повлечет за собой существенное возрастание содержания углекислого газа в атмосфере уже в текущем столетии. К концу столетия прогнозируется дополнительное поступление в атмосферу от 50 до 100 Гт углерода (в зависимости от климатического сценария) вследствие таяния тундры в циркумполярном регионе. Одно из исследований прогнозирует поступление в атмосферу 48 Гт углерода на протяжении этого столетия вследствие таяния вечной мерзлоты только лишь на территории Канады при повышении среднегодовой температуры на 4 °С.

Для оценки нетто-воздействия на динамику потепления климата модельные прогнозы учитывают изменения растительности и другие нарушения экосистем, а также эмиссию углерода вечной мерзлотой. Тем не менее они, как правило, не учитывают сложные факторы, которые возникают, когда таяние вечной мерзлоты происходит быстро. В сочетании с засушливыми условиями, вызванными изменением климата и (или) возрастанием темпов инфильтрации, таяние мерзлоты и пожары могут активно способствовать очень быстрой эмиссии почвенного углерода в атмосферу.

Недавно появившиеся результаты моделирования последствий потепления на 4 °С прогнозируют практически полное исчезновение поверхностной вечной мерзлоты на всей территории севера Сибири [58]. Более активное поглощение углерода растениями при их более активном росте и увеличение продолжительности вегетационного периода, по всей видимости, будут не очень существенными, в то время как воздействие пожаров на альbedo, которое приведет к снижению температуры, компенсирует эмиссию углерода только от самих этих пожаров. Данные экосистемные механизмы не смогут компенсировать потери углерода вследствие таяния вечной мерзлоты. Над-



земные части всей растительности тундры на 1 м² содержат приблизительно 0,4 кг углерода, а у бореальных лесов этот показатель составляет в среднем около 5 кг. Соответственно теоретически выигрыш от захвата бореальным лесом территории тундры составит 4,5 кг углерода на 1 м². Тем не менее следует учитывать, что вечная мерзлота может содержать в 10 раз больше углерода, чем почва бореальных лесов, не растущих на вечной мерзлоте (приблизительно 9 кг углерода на 1 м² слоя толщиной 1 м). Таким образом, потеря связанного углерода вследствие трансформации бореального леса в тундру составит 35 кг на 1 м². Эти потери могут быть еще больше и достичь 100 кг углерода на 1 м², если описанными процессами будет затронут слой глубиной 3 м [45].

Бореальные торфяники

В бореальной зоне торфяниками занято около 3,5 млн км², в их торфе содержится от 250 до 455 Гт углерода. С окончания последнего оледенения торфяные болота Северного полушария являются нетто-стоками атмосферного углерода, но природные и антропогенные факторы, главным образом пожары, могут снижать их ценность в этом отношении. Исследования, проведенные в Альберте, где торфяные болота занимают 2 280 км², показывают, что повышение температуры в летние месяцы на 2 °С при 2-кратном учащении пожаров вполне могут превратить эти болота, на которых доминируют сфагновые мхи, из стока в эмиттер углерода [24].



ЛИТЕРАТУРА

1. ACIA, Arctic Climate Impact Assessment 2005: Chapter 14: Juday, G et al: Forests, Land management and Agriculture.
2. Aitken, S.N. et al 2008: Adaption, migration or extirpation: climate change outcome for tree populations. *Evolutionary Applications*, vol. 1:1, p. 95–111.
3. Amir, B.D. et al 2006: The effect of post-fire stand age on the boreal forest energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 140:1–4, p. 41–50.
4. Balshi, M.S. et al (в печати): Vulnerability of carbon storage in North American boreal forests to wildfires during the 21st century. *Global Change Biology*.
5. Bonan, G.B. 2008: Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests. *Science*, vol. 320:5882, p. 1444–1449.
6. Bond-Lamberty, B. et al 2007: Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance. *Nature*, vol. 450:7166, p. 89.
7. Bryant, D. et al 1997: The last frontier forests. World Resources Institute.
8. Edwards, M.E. et al 2005: Structurally novel biomes: A response to past warming in Beringia. *Ecology*, vol. 86:7, p. 1696–1703.
9. Flannigan et al 2005: Future area burned in Canada. *Climate Change*, vol. 72:1–2, p. 1–16.
10. Flannigan, M. et al 2009: Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, vol. 15:3, p. 549–560.
11. Frieler, K. et al 2009: Hagh noon for +2 °C. Factsheet from the AirClim Secretariat.
12. Gache, I. & Payette, S. 2005: Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *Journal of Biogeography*, vol. 32:5, p. 849–862.
13. Girardin, M.P. 2008: Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: A comparison of empirical, process-based, and hybrid modelling approaches. *Ecological modelling*, vol. 213:2, p. 209–228.
14. Goetz, S.J. et al 2007: Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Env. Research letters*, vol. 2:4, #045031.
15. Grigoriev, A 2009: Boreal forest and climate change — a Russian perspective. www.airclim.org
16. Hari, P. & Kulmala, L. (ed) 2008: Boreal forest and climate change. *Advances in global change research* 27. Springer.
17. IPCC 2007: Fourth assessment report, Climate Change: Synthesis report.
18. IPCC 2007: Fourth assessment report, WG1, chapter 11: Regional Climate Projections.
19. IPCC 2007: Fourth assessment report, Climate Change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 1: Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems.
20. IPCC 2007: Fourth assessment report, Climate Change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 4: Ecosystems, their properties, goods and services.
21. Kane, E.S. & Vogel, J.G. 2009: Patterns of Total Ecosystem Carbon Storage with Changes in Soil Temperature in Boreal Black Spruce Forests. *Ecosystems*, Vol. 12:2, p. 322–335.
22. Kang, S. et al 2006: Simulating effects of fire disturbance and climate change on boreal forest productivity and evapotranspiration. *Science of the Total Environment*, vol. 362:1–3, p. 85–102.
23. Kasischke, E.S. & Turetsky, M.R. 2006: Recent changes in the fire regime across the North American boreal region — Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophysical Research Letters*, vol. 33:9, #L09703.
24. Kelman Wieder, R. et al 2009: Postfire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada. *Global Change Biology*, vol. 15:1, p. 63–81.
25. Kirilenko, A.P. & Sedjo, R.A. 2007: Climate change impacts on forestry. *PNAS*, vol. 104:50, p. 19697–19702.
26. Kullman, L. & Oberg, L. 2009: Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective. *Journal of Ecology*, vol. 97:3, p. 415–429.
27. Kurz, W.A. et al 2008: Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain. *PNAS*, vol. 105:5, p. 1551–1555.
28. Kurz, W.A. et al 2008: Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances? *Phil. Trans. R. Soc. B — biological sciences*, vol. 363, p. 2259–2268.
29. Kurz, W.A. et al 2008: Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, vol. 452:7190, p. 987–990.
30. Lapenis, A. et al 2005: Acclimation of Russian forests to recent changes in climate. *Global Change Biology*, vol. 11:12, p. 2090–2102.
31. Lenton, T. M. et al 2008: Tipping elements in the Earth's climate system. *PNAS*, vol. 105:6, p. 1786–1793.
32. Lindroth, A. et al 2008: Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Global Change Biology*, vol. 15:2, p. 346 — 355.
33. Lloyd, A.H. & Bunn, A.G. 2007: Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability. *Environmental research letters*, vol. 2:4, #045013.
34. Lloyd, A.H. 2005: Ecological histories from Alaskan tree lines provide insight into future change. *Ecology*, vol. 86:7, p. 1687–1695.
35. Luysaert, S. et al 2008: Old-growth forests as carbon sinks. *Nature*, vol. 455, p. 213–215.
36. Malevsky-Malevich, S.P. et al 2008: An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the 21st century. *Climate Change*, vol. 86:3–4, p. 463–474.
37. Myers-Smith, I.H. et al 2008: Wetland succession in a permafrost collapse: interactions between fire and thermokarst. *Biogeosciences*, vol. 5:5, p. 1273–1286.
38. Olsson, P. et al 2005: Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Global Change Biology*, vol. 11:10, p. 1745–1753.
39. Piao, S. et al 2008: Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, vol. 451:7174, p. 49–53.
40. Prof. Ulf Molau, личное сообщение.
41. Raupach, M. et al 2007: Global drivers of accelerating CO₂ emissions. *PNAS*, vol. 104:24, p. 10288–10293.
42. Rummukainen, M. 2009: Ny klimatvetenskap 2006–2009. Kommissionen for hallbar utveckling.
43. Schaphoff, S. et al 2006: Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. *Climatic Change*, vol. 74:1–3, p. 97–122.
44. Schlyter, P/ et al 2006: Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce. *Climate Research*, vol. 31:1, p. 75–84.
45. Shuur, E.A.G. et al 2008: Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle. *BioScience*, vol. 58:8, p. 701–714.
46. Soja, A.J. et al 2007: Climate-induced boreal change: Predictions versus current observations. *Global and Planetary Change*, vol. 56, p. 274–296.
47. Spracklen, D. et al 2008: Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society A — Mathematical Physical And Engineering Sciences*, vol. 366:1885, p. 4613–4626.
48. Stireman, J.O. et al 2005: Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: Implications of global warming. *PNAS*, vol. 102:48, p. 17384–17387.
49. Taggart, R.E. & Cross, A.T. 2009: Global greenhouse to icelhouse and back again: The origin and future of the Boreal Forest biome. *Global and Planetary Change*, vol. 65: 3–4, p. 115–121.
50. Tivy, J. 1993: Biogeography. A study of plants in the ecosystem. Longman Scientific & Technical, UK.
51. Tunved, P. et al 2006: High natural aerosol loading over boreal forests. *Science*, vol. 312: 5771, p. 261–263.
52. Turetsky, M.R. et al 2005: Spatial Patterning of Soil Carbon Storage Across Boreal Landscapes, p. 229–255.
53. Ueyama, M. et al 2009: Response of the carbon cycle in sub-arctic black spruce forests to climate change: Reduction of a carbon sink related to the sensitivity of heterotrophic respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149:3–4, p. 2090–2102.
54. Vajda, A. & Venalainen, A. 2005: Feedback processes between climate, surface and vegetation at the northern climatological tree-line (Finnish Lapland). *Boreal Environment Research*, vol. 10:4, p. 299–314.
55. Volney, W.J.A. & Fleming, R.A. 2007: Spruce budworm (*Choristoneura* spp.) biotype reactions to forest and climate characteristics. *Global Change Biology*, vol. 13:8, p. 1630–1643.
56. Zang, Y. et al 2006: Temporal and spatial changes of permafrost in Canada since the end of the Little Ice Age. *Journ. of Geophysical Research — Atmospheres*, vol. 111:D22, #D22103.
57. Barley, S. et al 2009: No rainforest, no monsoon: get ready for a warmer world. *New Scientist*, 30 September 2009.
58. McCarty, M. 2009: Government launches map to highlight global warming threat. *The Independent*, 22 October 2009.