



Использовать или охранять? Бореальные леса и изменение климата¹

Р. Олссон, журналист и популяризатор

Продолжение. Начало читайте в № 3 (32), 2012 г.

Воздействие лесов на климат

Динамика роста бореальных лесов и их биомассы, а также почвенных процессов воздействует на углеродный цикл и, следовательно, на уровень концентрации углекислого газа и других парниковых газов в атмосфере.

Изменения лесных экосистем, обусловленные изменением климата, в свою очередь оказывают влияние на климат. Это влияние может быть как положительным, т. е. сдерживающим изменение климата, так и отрицательным, ускоряющим изменение [6]. Пока в научном сообществе нет согласия по вопросу о том, будет ли повышение температуры способствовать усилению депонирования углерода лесами [8]. Во многом отсутствие согласия обусловлено, по всей видимости, рассмотрением процессов в разных временных интервалах, а также учетом природных катастроф или его отсутствием.

В том случае, если в научной работе анализ сводится к оценке, насколько более теплый климат или более высокая концентрация углекислого газа в атмосфере повлияют на рост лесов, то воздействие, как правило, оценивается как положительное, т. е. леса будут поглощать больше углерода. Предполагается, что все леса будут продолжать находиться в малонарушенном состоянии. Картина резко меняется, если учитывать, что пожары и другие природные катастрофы будут учащаться и усиливаться. Повышение эмиссии углерода вследствие природных катастроф, по результатам многих исследований, превышает секвестрирование углерода благодаря усилению роста лесов (см. раздел 5).

Другие взаимосвязи между бореальными лесами и климатом

Бореальные леса также воздействуют на климат через механизмы, не связанные напрямую с углеродным циклом. Кратко рассмотрим два таких механизма.

Альbedo

В метеорологии используется понятие «альbedo» — отношение поглощенной солнечной радиации и доли солнечной радиации, отраженной в космос облачным покровом и поверхностью Земли. Солнечная радиация, неотраженная в космос, поглощается почвой или растительностью либо трансформируется в длинноволновое тепловое излучение.

¹ Источник: www.airclim.org. Исследование подготовлено при участии экспертов WWF Швеции, Шведского общества по охране природы и НПО «AirClim» (Швеция). Предыдущую статью Роджера Олссона, посвященную бореальным лесам и изменению климата, читайте в № 3 (28) нашего журнала за 2011 год. Материал публикуется в рамках проекта «Интенсивное и устойчивое лесопользование в России».



Все это стимулирует дальнейшее потепление климата. Снижение альbedo означает превращение большей части солнечной энергии в тепло, что ведет к усилению глобального потепления. И наоборот, увеличение альbedo дает охлаждающий эффект.

Таким образом, альbedo земной поверхности очень важно для теплового баланса планеты. Изменения в типе растительности, а также в продолжительности снежного периода и интенсивность снежного покрова влияют на альbedo, хотя зависимость эта сложная и воздействие трудно прогнозировать.

Ни один из биомов Земли так не воздействует на альbedo, как бореальные леса. Благодаря темному цвету и неровной структуре поверхность бореального леса поглощает значительное количество солнечной радиации, в то время как плоская, покрытая снегом поверхность тундры имеет высокое альbedo. Сокращение площади бореальных лесов и повышение интенсивности лесных пожаров могут способствовать снижению потепления климата благодаря изменению альbedo [6].

Более интенсивный рост лесов означает увеличение доли хвойных пород, что может снижать альbedo лесных ландшафтов. В то же время этот же фактор усиливает транспирацию, т. е. увеличивает количество воды, испаряемое деревьями в атмосферу, что усиливает образование облаков [20]. Как упоминалось выше, образование облаков вызывается эмиссией летучих органических соединений. Эти факторы могут быть очень существенными для баланса глобальной климатической системы. В холодном климате низкое альbedo бореального леса вызывает разогревающий эффект. При потеплении климата повышение испарения воды может привести к образованию облаков и к охлаждающему эффекту [22].

Оксид азота

Нитраты из лесных почв также могут переходить в атмосферу в виде газообразного азота и оксида азота (N_2O) в пропорциях, определяемых химией почвы [17]. По парниковому эффекту оксид азота в 296 раз превосходит углекислый газ [16]. Наиболее интенсивно оксид азота выделяется из почв, в которых уровень грунтовых вод нестабилен и периодически находится высоко [16]. Эмиссия оксида азота из почв экосистемы бореальных лесов оценивается примерно в 0,5 Мт в год, что с климатической точки зрения эквивалентно чуть более 0,1 Гт С (по расчетам согласно [19]). В Швеции этот показатель оценивается в 4 700 т, что эквивалентно пример-



но 0,0004 Гт С. Практически все эти эмиссии происходят из осушенных торфяников [2].

Потепление климата может привести к повышению эмиссии оксида азота. Эксперименты по удобрению лесных насаждений азотистыми соединениями показывают, что лесные экосистемы по-разному реагируют на дополнительный азот. Величина эмиссии оксида азота во многом зависит от того, насколько недостаток азота лимитирует рост деревьев. В экосистемах, испытывающих дефицит азота, дополнительный азот быстро поглощается растениями, повышение эмиссии оксида азота кратковременно и наблюдается сразу после внесения азотных удобрений. Напротив, экосистемы, которые уже выделяют оксид азота в атмосферу, немедленно реагируют на внесение дополнительного азота еще большей эмиссией. Если допустить, что экосистема реагирует на увеличение концентрации азота, вызванной усилением разложения органических веществ при повышении температуры так же, как и на внесение азотных удобрений, то можно грубо оценить возрастание эмиссии оксида азота бореальными лесами при потеплении климата. По результатам моделирования, осуществленного финскими учеными, умеренное потепление климата может привести к росту эмиссии оксида азота бореальными лесами до 1,5 Мт N в год, т. е. эмиссия возрастет в 3 раза по сравнению с современным уровнем

[19]. Климатический эффект такого возрастания эмиссии оксида азота будет эквивалентен эмиссии 0,12 Гт С, что составляет примерно 10–20 % всего углерода, ежегодно депонируемого бореальными лесами. Осушение торфяников и удобрение лесов также может привести к возрастанию эмиссии оксида азота (см. раздел 6).

Лес как инструмент климатической политики

В конечном счете есть три разных способа использования лесов при управлении глобальным углеродным циклом, а следовательно, концентрацией углекислого газа в атмосфере [9]:

- **Сохранение лесов.** Это один из способов предотвратить эмиссию депонированного углерода в атмосферу и сохранить естественный потенциал экосистем по его депонированию. Меры по сохранению лесов должны включать борьбу с опустыниванием, увеличение площадей лесных ООПТ, а также борьбу с лесными пожарами и другими природными катастрофами, влекущими за собой снижение потенциала по депонированию углерода.
- **Использование лесохозяйственных мероприятий для секвестрирования углерода.** Управление лесами и использование лесоматериалов существенно воздействуют на климат. Среди мер, способствующих усилению роста лесов, — использование удобрений и лесоразведение на ра-

Точность данных

Данные, приводимые в этом разделе по запасам углерода и частям углеродного цикла, сильно различаются, что отражает состояние современных знаний по этим вопросам. Несмотря на проведение интенсивных и глубоких исследований, все еще сохраняется значительная неопределенность относительно запасов углерода в лесных экосистемах Земли и количества ежегодно депонируемого ими углерода. Разница между крайними оценками депонирования углерода в научной литературе составляет около 0,5 Гт. Оценка углеродного бюджета лесов Европы варьирует в тех же пределах — от источника 0,1 Гт до стока 0,46 Гт в год [10]. Разница оценок эквивалентна почти половине объема эмиссий стран ЕС в результате сжигания ископаемого топлива [15]. Величина бюджета углерода зависит от методической базы расчетов, а также от выбора оцениваемых стоков и частей углеродного цикла. Всестороннее изучение бюджета углерода лесов Европы, основанное на лесотаксационных данных, экспериментальный сбор данных о различных потоках углерода в углеродном цикле и использование математических моделей показывают, что варьирование оценок в широких пределах объясняется методикой исследований и разными допущениями при математическом моделировании. Данные оценки чистой первичной продукции колеблются от 439 до 574 г С/м² в год, т. е. в пределах более 30 % [15].

Во многих странах, в том числе и в Швеции, углерод, депонируемый в наземной биомассе растений (в растущих лесах), определяется в ходе лесной таксации на основе данных о насаждениях (в Швеции сбор этих данных осуществляет Национальное агентство по инвентаризации лесов). Данные по биомассе в почве не столь точны, что отражается и на точности оценок углерода. Согласно процедурам Киотского протокола необходимо учитывать и другие пулы углерода, включая углерод органического происхождения в почве. Сбор этих данных редко обеспечивает необходимую точность. Проблематичность обеспечения высокой точности оценок концентрации органического углерода в почве объясняется ее колебаниями в слабой связи с изменением общего пула углерода и значительным различием в разных почвах. Это затрудняет аппроксимирование отдельных измерений до национального масштаба [8].

Существуют технологии непосредственного измерения углеродного обмена лесов с атмосферой (вихревая ковариация). Но применение этой технологии ограничено ее стоимостью. В Швеции к 2006 году было построено восемь башен для проведения таких измерений, что недостаточно для обеспечения надлежащей точности прямых измерений общего бюджета углерода. Требуется проведение измерений в лесах разного породного состава, класса возраста, растущих на разных почвах, в разных климатических условиях и т. д. [8].

Погрешность данных по секвестрированию углерода лесной биомассой, официально представляемых Швецией в UNFCCC, составляет около 20 % от общего стока углерода. Погрешность данных по углероду, депонируемому в лесной подстилке и почве, оценивается соответственно в 70 и 35 % [13]. Тем не менее данные по Швеции отличаются сравнительно высокой точностью благодаря имеющейся подробной лесотаксационной информации о лесе на корню и лесных почвах. Швеция — одна из немногих стран, у которых существует объективная информация более-менее точной оценки эмиссии углерода живой биомассой. Большая часть стран вынуждена опираться лишь на субъективные экспертные оценки [13].

Обеспечение точности прогноза изменения бюджета бореальных лесов еще более проблематично. При прогнозировании допускают, что леса не будут резко реагировать на изменение экологических факторов, несмотря на то, что изменения этих факторов уже вышли за значения, в рамках которых до сих пор происходила эволюция современной флоры и к которым она приспособилась. Примерами экосистемных феноменов могут служить широкое распространение поражения лесов насекомыми и грибковыми микроорганизмами, наносящими существенный ущерб лесам и снижающими их потенциал по депонированию углерода. Это означает, что современные прогнозы изменения потенциала лесов по депонированию углерода, по всей видимости, слишком оптимистичны [4].

С точки зрения климатической политики такой разброс научных данных, безусловно, является серьезной проблемой при представлении государствами отчетности по стокам углерода в лесных экосистемах или лесоматериалам при определении сокращения ими эмиссий углерода.



нее безлесных землях. Еще одной возможностью увеличения депонирования углерода лесами и лесоматериалами являются увеличение периодов ротации насаждений и обеспечение более длительного жизненного цикла продукции из древесины.

- **Замещение топлива и материалов.** Замещение означает, что лесоматериалы используются вместо ископаемых видов топлива и других материалов, производство или применение которых ведет к значительной эмиссии парниковых газов. Замещение может достигаться использованием древесины в качестве топлива или вместо материалов, производство которых связано с большими энергетическими затратами, такими как сталь и бетон, применяемыми в строительстве.

Эти три способа имеют различный потенциал по сокращению уровня концентрации углекислого газа в атмосфере в кратко- и долгосрочной перспективе. Наиболее эффективным способом в краткосрочной перспективе является сохранение лесов, особенно в тех регионах, где имеются старовозрастные леса со значительным количеством депонированного углерода, которым угрожают рубки или иные формы хозяйственного воздействия (такие как добыча нефти и природного газа). Бореальные леса отличаются уязвимостью к катастрофическим воздействиям (пожарам, ураганам ветрам, вызывающим ветровалы и поражению насекомыми-вредителями), ведущим к выбросу углерода в атмосферу. В долгосрочной перспективе бореальный лес достигает равновесного стояния, при котором выбросы углерода в результате катастрофических воздействий равны или приблизительно равны объемам углерода, секвестрируемым живой биомассой. Тем не менее необходимо учитывать, что депонирование углерода почвой может не прекращаться тысячелетиями.

Когда лесоправление направлено на обеспечение климатической функции леса, осуществляются лесохозяйственные мероприятия, способствующие более активному депонированию углерода, а также повышается сток экосистемы в целом. Но зачастую необходимо время, чтобы эффект лесохозяйственных мероприятий проявился, в краткосрочной же перспективе воздействие некоторых лесохозяйственных мероприятий на баланс углерода может быть нейтральным или негативным. Например, из почвы некоторое время после рубки происходит эмиссия углерода, но затем он будет поглощаться из атмосферы молодым лесом, активно растущим на вырубке. Вне зависимости от того, какая модель используется для описания этих процессов, рано или поздно продуктивность леса достигает своего максимума, что и ограничивает депонирование углерода. Это также применимо и для лесной продукции: рано или поздно продукция из древесины либо будет сожжена, либо разложится. Если только не будет непрерывного роста производства лесной продукции (что, очевидно, невозможно в долгосрочной перспективе), в определенное время будет достигнута точка равновесия между депонированием и эмиссией углерода.

Полезность от замещения состоит в том, что использование топлива из древесины ведет к гораздо меньшей эмиссии парниковых газов, чем использование ископаемого топлива. Аналогично и использование древесины в строительстве, которое также связано с меньшими эмиссиями по сравнению с использованием других материалов. Каждая тонна нефти, стали и бетона, замещенная древесными материалами, сокращает эмиссию углекислого газа в атмосферу. Это означает, что замещение материалов древесиной в отличие от усилий по сохранению лесов или целевых лесохозяйственных мероприятий оказывает более значительный, долгосрочный эффект по снижению уровня концентрации углекислого газа в атмосфере при допущении, что благодаря использованию, к примеру, древесного топлива не вырабатывается дополнительная энергия, а сокращается использование энергии, получаемой от

сжигания ископаемого топлива. Замещение может происходить по-разному: например, порубочные остатки могут использоваться в качестве топлива; древесина сначала может заменять сталь и бетон при строительстве зданий, а затем, когда здания отслужат свой срок, будет использована как топливо.

Если рассматривать эти три способа относительно насаждения, то они не могут работать параллельно. Если идти по пути увеличения стока растущего леса, то с климатической точки зрения недопустимо заготавливать большие объемы лесоматериалов для замещения. С другой стороны, лесохозяйственные мероприятия, направленные на секвестрирование углерода, могут дополнять замещение. Повышение производительности лесов означает увеличение объемов биомассы, которая может использоваться для замещения других материалов.

С широкой географической перспективы — регионального или государственного уровня — эти способы, конечно, можно комбинировать. Нет необходимости управлять всеми лесами одинаково. С климатической точки зрения ниже показано, что управление старовозрастными малонарушенными лесами должно отличаться от управления другими лесами — на это есть веские причины.

Как уже упоминалось, эти способы производят различный климатический эффект в зависимости от рассматриваемых временных рамок. Мероприятия, оказывающие значительное позитивное воздействие на снижение эмиссии парниковых газов в долгосрочной перспективе, могут иметь или нулевой, или даже отрицательный эффект в краткосрочной. Это следует внимательнее учитывать именно в настоящее время, когда требуются решительные и неотложные меры по сокращению эмиссий для того, чтобы избежать катастрофических последствий изменения климата и неуправляемого повышения среднегодовой температуры на планете. Подход, который кажется оптимальным при планировании на перспективу 100–200 лет, может оказаться совершенно неприемлемым в свете того, что нужно общими усилиями достигнуть в ближайшие десятилетия.

4. О границах системы

Обсуждая связь между лесами и климатом, необходимо учитывать фактор, имеющий важнейшее значение: каким образом определить систему в пространстве и времени, в которой будет рассмотрен цикл углерода. Различные границы этой системы во многом обусловят выводы о том, как конкретное действие или стратегия повлияет на потоки парниковых газов и, следовательно, на климат.

Оценки и прогнозы воздействия потепления климата на рост лесов часто относятся к уровню насаждения, т. е. мы ограничиваемся рассмотрением того, как отдельное лесное насаждение реагирует на изменение температуры и (или) уровня концентрации углекислого газа в атмосфере. Тем не менее, если мы, например, вводим в изучаемую систему лесную почву, то это может привести к другим выводам, поскольку изменение климата воздействует на скорость разложения органического вещества и на потоки углерода. При рассмотрении крупных участков леса или целых экосистем неизбежно придется учитывать лесные пожары и другие природные катастрофические воздействия, а также малопродуктивные лесные земли, включая безлесные торфяные болота. Взаимовлияние леса и климата с такой экосистемной перспективой лучше изучено для малонарушенных лесов.

В управляемых лесах возникает дополнительный фактор, значительно влияющий на бюджет углерода: заготовка биомассы в процессе рубок. При рассмотрении воздействия заготовки древесины на климат необходимо принимать во внимание, что учитывается — заготовка древесины или дру-



гие воздействия, которые она влечет за собой (а также другие лесохозяйственные мероприятия, проводимые с целью производства биомассы). Известно, например, что в результате сплошных рубок в атмосферу выбрасывается значительное количество углерода [11].

Степень влияния рубок на потоки парниковых газов в значительной степени зависят от способа использования заготовленной древесины. Согласно правилам отчетности в рамках Киотского протокола считается, что углерод, заключенный в древесине, возвращается в атмосферу непосредственно после рубки. Это допущение также широко применяется и в других оценках. Тем не менее в реальности часть древесины расходуется, например, для строительства домов. Углерод, заключенный в такой древесине, остается в ней десятилетиями, прежде чем она сжигается или разлагается.

Поэтому при анализе системы необходимо учитывать целевое назначение древесины, а также выбросы углерода при работе лесохозяйственных машин и лесоперерабатывающего оборудования (см. рисунок).

Более того, систему можно исследовать еще подробнее, учитывая фактор замещения. Лесная биомасса может использоваться для замещения угля и нефти. Сокращение эмиссии углекислого газа вследствие замещения также важно при вычислении баланса углерода. Аналогичным образом можно принимать во внимание, что древесина замещает другие строительные материалы, например бетон, производство которых связано со значительно большими эмиссиями углерода. Таким образом, при вычислениях можно учитывать и сокращение эмиссий благодаря сокращению производства бетона. Как будет показано ниже, это замещение играет очень важную роль при оценке воздействия лесного хозяйства на климат.

Временной период так же, как и пространственные границы, имеет большое значение. Практически все прогнозы климатических изменений, их последствий и результаты принимаемых мер ограничены, как правило, 2100 годом, т. е.

периодом лишь одной ротации деревьев в управляемом лесу. Если наша цель состоит в ограничении глобального потепления в пределах 2 °С, то критический период значительно короче. Как уже упоминалось, уровень эмиссий парниковых газов должен начать снижаться к 2015 году и уменьшиться на 50–85 % к 2050 году. Очень немногие оценки климатического эффекта различных подходов к использованию лесов и лесоматериалов ориентированы на такой короткий период, ведь для леса и 100 лет — небольшой срок. При анализе климатических воздействий рассматривается период нескольких ротаций, как правило 200–300 лет, без учета того, как за это время социально экономическое развитие и изменение климата могут повлиять на леса, их продуктивность, развитие производства строительных материалов или глобального энергетического рынка, а также как все эти факторы, в свою очередь, будут влиять на климат [1, 3, 18, 21].

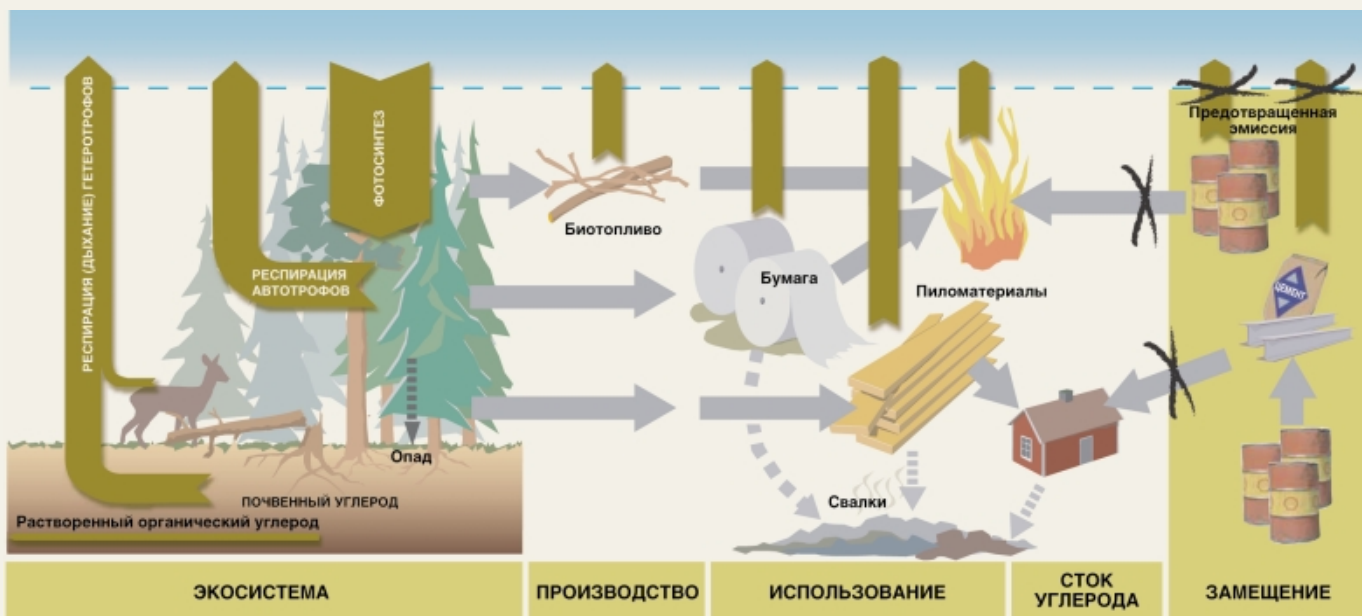
Подходы к лесопользованию в целях его адаптации к противодействию изменения климата, которые считаются оптимальными в долгосрочной (100 лет и более) перспективе, могут оказаться противоположными для периода, критического для климата в будущем, а это ближайшие 30 лет. Подробнее эти аспекты рассмотрены ниже.

Границы системы, принятые в этой статье

В статье рассматриваются возможные границы системы. Цель — четко обозначить применяемые границы и определить, каким образом они влияют на результаты анализа и выводы.

В разделе 5, в котором рассказывается о малонарушенных бореальных лесах, приводится анализ экосистемы в целом, включая лесные земли. Поскольку в малонарушенных лесах по определению не происходит изъятия биомассы рубками, экосистема может с достаточной степенью точности рассматриваться как закрытая система.

Парниковые газы, выделяемые системой, попадают в атмосферу, а поглощаемые ею соответственно из атмосферы



Взаимовлияние лесов, лесного хозяйства и производства лесной продукции с климатической перспективой. В малонарушенных лесах, в которых никогда не проводилась рубка, воздействие на климат определяется соотношением эмиссии и депонирования парниковых газов лесной экосистемой. На практике лесная экосистема и атмосфера могут рассматриваться как два элемента закрытой системы. Если биомасса (древесина) изымается из системы, это воздействует не только на углеродный бюджет экосистемы, но и на производство лесоматериалов и продукции из древесины. Такое воздействие напрямую зависит от длительности жизненного цикла лесной продукции. Эмиссии парниковых газов происходят при транспортировке, производстве и использовании продукции из древесины.

Лесная продукция содержит углерод. Распространение отчетности на эффекты замещения продукции означает дальнейшее расширение границ системы и предусматривает учет сокращения эмиссий парниковых газов при замещении лесной продукцией (топливо и лесоматериалы) ископаемого топлива и материалов, изготавливаемых с его использованием.



удаляются. Чистый баланс обмена между экосистемой и атмосферой определяет климатический эффект.

В разделе 6, посвященном управляемым лесам, обсуждаются аспекты воздействия различных стратегий управления лесами и лесохозяйственных мероприятий на депонирование и эмиссию парниковых газов лесами.

Повторимся, что анализ должен начинаться на уровне экосистемы. Тем не менее в управляемых лесах изъятие биомассы и дальнейшая судьба получаемой лесной продукции имеют гораздо большее значение для климата, чем природные процессы на уровне лесной экосистемы. Это частично относится к эффектам при замещении продукции и материалов, которые обсуждаются в разделе 8. Депонирование углерода в лесоматериалах рассматривается в разделе 7.

В отношении временных рамок следует отметить, что рассматривается и кратко- и долгосрочная перспектива. Краткосрочная перспектива интересна по той причине, что возможность человечества ограничить глобальное потепление в рамках 2 °С определится в течение ближайших десятилетий. Если это не удастся, то возникает значительный риск резкого ускорения потепления за счет начала таких явлений, как таяние вечной мерзлоты и массовое усыхание лесов, которые будут подпитывать ускорение глобального потепления, выделяя в атмосферу парниковые газы. При таком развитии событий экологические условия произрастания boreальных лесов и ведения лесного хозяйства могут сильно измениться. В то же время возможности предотвращения ускорения потепления за счет рационального лесопользования и использования лесной продукции сильно сократятся или даже исчезнут, поскольку сократятся или исчезнут возможности воздействия на повышение эмиссии парниковых газов с помощью лесохозяйственных мер.

5. Естественные лесные экосистемы

Фундаментальное различие между естественными (малонарушенными) и управляемыми лесами с климатической точки зрения состоит в том, что в первых не происходит изъятия биомассы (путем проведения рубок), а преобладает естественная динамика. Биомасса не удаляется из системы. Деревья и другая растительность перегнивают в лесу, углерод, который был заключен в этих организмах, либо возвращается обратно в атмосферу в виде углекислого газа, либо остается в почве на разный период. Доля углерода, депонированного в почве, и скорость разложения очень важны для климата. Также на потоки углерода в boreальных лесах большое влияние могут оказывать такие катастрофические природные явления, как пожары, массовое размножение насекомых-вредителей и ветровалы.

В этом разделе boreальные леса рассматриваются главным образом с планетарной перспективы. Большая часть малонарушенных boreальных экосистем находится в Северной Америке и России.

Рост лесов

Влияние глобального потепления

На первый взгляд логично предположить, что boreальные леса в более теплом климате будут расти лучше, поскольку температура и длительность сезона вегетации являются важнейшими лимитирующими экологическими факторами. Тем не менее результаты исследований отклика boreальных лесов на потепление климата опровергают эту точку зрения. За последние десятилетия одни леса стали расти лучше, другие — хуже, в зависимости от региона произрастания, характеристик конкретных мест произрастания и пород. В ряде случаев наблюдалось значительное ухудшение роста. Одним из

объяснений может быть стресс, вызванный засухой, которая является последствием потепления климата [6]. Изучение годичных колец деревьев по всей boreальной зоне показывает, что снижение темпов роста наблюдается во многих районах с 1900-х годов и связано с повышением среднегодовой температуры. Это наблюдается во многих районах по всей boreальной зоне среди широкого спектра исследуемых хвойных пород. Снижение темпов роста чаще наблюдается в более теплых районах и косвенно подтверждает, что дело и в повышении температуры. Во многих районах снижение темпов роста деревьев проявилось уже в 1950-е годы. В отдельных районах существует и обратная тенденция [12, 14]. По мере повышения температуры негативное воздействие на деревья и их рост может усиливаться по мере того, как виды и экосистемы будут исчерпывать свои адаптивные возможности к все более и более экстремальным условиям окружающей среды [5].

В ряде boreальных районов на рост лесов влияют азотистые вещества антропогенного происхождения. Как правило, сложно отделить влияние этого фактора от воздействия изменения климата (см. далее).

Для boreальных лесов Канады показано, что потенциальное усиление роста, вызванное потеплением климата, может существенно ограничиваться или быть сведено на нет из-за изменения в выпадении осадков [7].

Продолжение читайте в следующем номере.



ЛИТЕРАТУРА

1. Bergkvist, B & Olsson, M (red) 2008: Kolet, klimatet och skogen — Sa kan skogsbruket paverka. Information fran LUSTRA.
2. Bergkvist, B (red) 2007: Kolet, klimatet och skogen. Skogskladda, torvtackta marker. Information fran LUSTRA.
3. Eriksson, E m. fl. 2007: Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. Canadian Journal of Forest Research, vol. 37, p. 671–681.
4. Hari, P m. fl. 2009: Evaluation of the Connections between Boreal Forests and Climate Change. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
5. IPCC 2007d: Fourth assessment report, Climate change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 4: Ecosystems, their properties goods and services.
6. Juday G m. fl. 2005: Forests, land management and agriculture. Chapter 14 in «ACIA, Arctic Climate Impact Assessment». Arctic Council.
7. Kang, S m. fl. 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.
8. Lagergren, F m. fl. 2006: Current carbon balance of the forested area in Sweden and its sensitivity to global change as simulated by Biome-BGC. Ecosystems 9, p. 894–908.
9. Lindner, M & Karjalainen, T 2007: Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: a short review of recent progress. Eur. Forest Institute, Finland.
10. Lindner m. fl. 2004 i Nabuurs, G J m. fl. 2008: Hotspots of the European carbon cycle. Forest Ecology and Management, vol. 256, p. 194–200.
11. Lindroth, A m. fl. 2009: Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. Global Change biology, vol. 15:2, p. 346–355.
12. Lloyd, A H & Bunn A G 2007: Responses of the boreal forest to 20th century climate variability. Environmental research letters, vol. 2:4, #045013.
13. Lundblad, M m. fl. 2009: Floden av vaxthusgaser fran skog och annan markanvandning. Slutrapport regeringsuppdrag JO 2008/3958.
14. Lundmark, T 2010: Godslad skog ger storsta klimatnyttan. I «Sverige i nytt klimat — vatvarm utmaning». Formas Fokuserar 16.
15. Luyssaert, S m. fl. 2010: The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology, vol. 16: 1429–1450.
16. Moren, A-S & Olsson, M (red) 2007: Kolet, klimatet och skogen — sa funkar det. Information fren LUSTRA 2007.
17. Nordin, A m. fl. 2009: Eff ekter av ett intensivare skogsbruk pa skogslandskapets mark, vatten och vaxthusgaser. Faktunderlag till MINT-utredningen. SLU.
18. Olsson, R 2010: Boreal Forest and Climate Change — regional perspectives. AirClim Report 24. Air Pollution and Climate Secretariat.
19. Pihlatie, M, Pumpanen, J & Hari, P 2009: N₂O emissions from Boreal Forests. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
20. Raisanen, J & Smolander, S 2009: Climatic Effects of Increased leaf Area: reduced surface albedo and Increased Transpiration. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
21. Sathre, R m. fl. 2010: Primary energy and greenhouse gas implications of increasing biomass production through forest fertilization. Biomass and Bioenergy, vol. 34, p. 572–581.
22. Spracklen, D m. fl. 2008: Boreal forests, aerosols and impacts on clouds and climate. Philosophical Transactions of the Royal Society A — Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 366:185, p. 4613–4626.