



# Использовать или охранять? Бореальные леса и изменение климата<sup>1</sup>

Р. Олссон, журналист и популяризатор

*Продолжение.*

*Начало читайте в № 3 (32) и в № 4 (33), 2012 г.*

## *Влияние углекислого газа*

Повышенный уровень концентрации углекислого газа в атмосфере может позитивно сказаться на росте деревьев, поскольку зеленые растения используют его при фотосинтезе. Тем не менее нет убедительного подтверждения того, что прогнозируемый уровень концентрации углекислого газа в атмосфере обеспечит усиление фотосинтеза [5]. У растений не было времени эволюционировать и адаптироваться к таким высоким уровням концентрации углекислого газа, следовательно, сложно спрогнозировать, каким образом откликнутся разные виды на повышение его концентрации [20].

Лабораторные эксперименты и полевые наблюдения показывают, что фотосинтез резко усиливается при повышении концентрации углекислого газа в атмосфере. Однако через несколько месяцев или лет интенсивность фотосинтеза падает до исходного уровня. В полевых условиях, при экспериментах, когда целые деревья выращивались в условиях повышенной концентрации углекислого газа, интенсивность фотосинтеза в долгосрочной перспективе ограничивалась наличием в почве питательных элементов [12]. Доступность азота также может быть лимитирующим фактором для роста растений, стимулируемого повышением температуры. Таким образом, это влияет на определенность прогнозов относительно стимулирования роста растений благодаря более высокой концентрации углекислого газа [20].

## *Влияние концентрации азотистых веществ на депонирование углерода лесами*

В природных условиях рост бореальных лесов, как правило, ограничен доступностью почвенного азота. Позитивное влияние потепления климата на рост лесов наблюдается сейчас преимущественно в регионах, где ни вода, ни питательные вещества не являются лимитирующими факторами (Европа и восточная часть Северной Америки). Эти регионы бореальной зоны относятся или прилегают к густонаселенным и индустриальным районам, подверженным выбросам азотистых веществ антропогенного происхождения. В некоторых из них содержание азотистых веществ в 10 раз превышает естественный фон. По некоторым оцен-



кам, загрязнением азотистыми веществами антропогенного происхождения охвачено до 30 % территории бореальной зоны [19].

В Европе рост лесов в среднем усилился с конца 1900-х годов благодаря увеличению концентрации азотистых соединений [37]. В Швеции от 70 до 80 % повышение депонирования углерода происходит благодаря более высоким концентрациям азотистых веществ, что подтверждается данными о лесах Южной и Северной Швеции [49].

Следовательно, увеличение концентрации азотистых соединений, связанное с атмосферным загрязнением, во многом определяет реакцию лесов на потепление климата. Моделирование показывает, что поступление азотистых соединений антропогенного происхождения из атмосферы может обуславливать повышение депонирования углерода наземными экосистемами планеты на величину от 0,44 до 0,74 Гт в год. Это повышение будет происходить главным образом за счет бореальных и умеренных лесов [46]. Тем не менее, как уже упоминалось выше, лишь небольшая часть лесов бореальной зоны подвергается загрязнению азотистыми веществами антропогенного происхождения.

Эмиссия оксидов азота в странах Евросоюза сократилась на 39 % в период с 1990 по 2008 год [15]. В соответствии с большинством сценариев загрязнение азотистыми веществами лесов Европы будет снижаться на протяжении последующих десятилетий [44]. Это означает и снижение воздействия азотистых соединений антропогенного происхождения на рост лесов.

## *Изменения экосистем и типов растительности*

Многие модели прогнозируют сдвиг климатических зон Северного полушария приблизительно на 500 км к северу при глобальном потеплении на 2 °С к 2100 году [29]. На первый взгляд можно предположить, что бореальные леса отреагируют на такое смещение климатических зон экспансией на север. Имеется ряд исследований, основанных на моделировании типов растительности, описывающих этот процесс. Тем не менее эти модели допускают следующее предположение: каждая древесная порода будет занимать все места, пригодные для ее произрастания, что вряд ли произойдет в реальности, по крайней мере на протяжении такого короткого отрезка времени для деревьев, как 100 лет [1]. Движение природных зон, происходящее со скоростью в среднем 5 км

<sup>1</sup> Источник: [www.airclim.org](http://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».



в год, намного превышает скорость естественного распространения деревьев, которая составляет в среднем 200–300 м в год [22]. Некоторые семена могут случайно оказаться в благоприятных условиях, из них вырастут отдельные деревья — «форпосты» для дальнейшего продвижения на север, но это не значит, что вся лесная экосистема будет плавно перемещаться на север в том же темпе, что и природная зона. Подтверждения чему можно найти, например, на Аляске и в горах Скандинавии [23, 30, 40].

Более вероятный сценарий состоит в том, что высокая температура в летние месяцы в сочетании с дефицитом воды приведут к усилению стресса, низкой устойчивости к вредителям и болезням и, следовательно, к гибели деревьев. Вместе с повышением природных катастрофических воздействий — более частых и более интенсивных лесных пожаров и вспышек численности насекомых-вредителей — это может привести к массовому усыханию деревьев и превращению бореальных лесов в редины, а затем и в низкополотные экосистемы саваннового типа или в травянистые экосистемы, что, в свою очередь, приведет к значительному увеличению выбросов углекислого газа в атмосферу.

Гибель бореальных лесов на обширных территориях признана одним из критических событий, которые могут ускорить потепление климата и произойти в результате перехода среднегодовой температуры на планете через определенную критическую отметку. Предположительно, таким порогом является повышение на 3–5 °С, однако на этот счет существуют разные мнения [50].

### Природные катастрофы

В бореальных лесах в последние десятилетия наблюдается учащение как пожаров, так и вспышек численности насекомых-вредителей, и дальнейшее повышение температуры только усилит эту тенденцию [2, 32, 33]. Экстремальные погодные условия, вызванные потеплением климата, также могут усилить повреждение лесов ураганскими ветрами [39].

### Пожары

Роль пожаров в цикле углерода в бореальной зоне трудно переоценить, причем не только из-за эмиссии углерода непосредственно во время пожара, но и спустя длительное время. Эмиссии углерода в бореальных лесах как непосредственно во время пожаров, так и с гарей превышают 20 % глобальных эмиссий от природных пожаров [26]. Подтверждено, что изменение динамики лесных пожаров — основной фактор, определяющий динамику стоков углерода бореальных лесов Канады на протяжении последних 50 лет (1948–2005 годы) [8].

Гари являются источниками углерода длительное время (в среднем 30 лет после пожара). Исследования, проведенные в бореальных лесах на Аляске, показали, что около 20 % углерода из верхних слоев почвы переходит в атмосферу вследствие ускорения процесса разложения в первые 20–30 лет после пожара, что обусловлено повышением температуры верхнего почвенного слоя [26].

В бореальной зоне Северной Америки общая площадь, проходимая огнем за год, возросла в 2,5 раза с 1960-х по 1990-е годы. На западе Северной Америки площадь пожаров удвоилась за последние 20 лет XX века [26]. В России площадь лесных пожаров увеличилась на 29 % с 1980-х по 1990-е годы. Официальная статистика по лесным пожарам в стране не точна, но оценки на основе спутниковой информации подтверждают значительное увеличение площади лесных пожаров год за годом. Тем не менее как официальная статистика, так и независимая оценка спутниковых данных сходятся в том, что начиная с 1998 года площадь пожаров возрастает [57].

Эмиссия углерода в результате лесных пожаров в Северной Америке удвоилась за период с 1960-х по 1990-е годы — приблизительно с 0,03 до более чем 0,06 Гт в год, в Евразии — с 0,1–0,2 Гт (1996–1997 годы) до почти 0,5 Гт (2002 год) [27].

Результаты моделирования показывают, что частота и интенсивность лесных пожаров будут увеличиваться вместе с глобальным потеплением [26, 53]. По некоторым оценкам, число дней с высокой пожарной опасностью в бореальной зоне в России возрастет на 12–30 % при повышении среднегодовой температуры на планете на 2,4 °С [47]. При повышении температуры на 4 °С среднегодовая площадь лесных пожаров в Северной Америке к 2100 году может увеличиться на 74–118 % [16].

Одна из моделей показывает, что увеличение среднегодовой площади пожаров на 50 % приведет к повышению эмиссий углерода на величину от 0,33 до 0,8 Гт в год в следующие 50–100 лет в зависимости от частоты пожаров и распределения углерода в органических и минеральных слоях почвы [28].

Установлено также, что потепление от 2,4 до 3,4 °С приведет к возрастанию эмиссии углерода вследствие лесных пожаров в 2,5–4 раза по сравнению с 1990-ми годами. Это может сказаться на дальнейшем усилении глобального потепления, что, в свою очередь, создаст условия для возникновения еще более сильных лесных пожаров [57].

В то же время увеличение интенсивности и частоты лесных пожаров приведет к росту альбедо бореальной зоны, что произведет охлаждающий эффект [17]. По крайней мере одно исследование показывает, что рост альбедо может перекрыть климатическое воздействие эмиссий углерода на протяжении всего пожарного цикла (80 лет) [7].

### Вспышки численности насекомых-вредителей

Крупные вспышки численности насекомых, в результате которых погибают или повреждаются леса на больших площадях, наряду с лесными пожарами являются одним из природных факторов катастрофического свойства. В восточной части Онтарио (Канада) еловой листоверткой-почкоедом (*Choristoneura spp.*) была поражена площадь, в 20 раз превышающая площадь, пройденную пожарами с 1941 по 1996 годы [59]. В Британской Колумбии крупнейшая в истории вспышка численности лубоеда сосны скрученной (*Dendroctonus ponderosae*) не утихла на протяжении нескольких лет [32]. Вспышка численности сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus*) в Красноярском крае в 1990-е годы привела к потере 50 млн м<sup>3</sup> древесины, что эквивалентно объему, заготавливаемому там в течение 7 лет [53]. За последние 100 лет происходили и более впечатляющие вспышки численности насекомых-вредителей [57].

По мере потепления климата ожидается учащение и усиление вспышек численности насекомых-вредителей как от непосредственного воздействия повышения температуры на популяции насекомых, так и опосредованно, в результате нарушения экосистемных связей [58].

Воздействие учащения и усиления вспышек численности насекомых-вредителей на бюджет углерода бореальных лесов будет аналогичным воздействию лесных пожаров, и оно также может быть существенным. Значительные территории будут заняты мертвыми и поврежденными деревьями, что приведет к сокращению потенциала лесов по депонированию углерода, а эмиссии возрастут из-за разложения мертвой древесины. Вспышка численности еловой листовертки-почкоеда в Британской Колумбии превратила 37 млн га лесных земель из небольшого в значительный источник углерода. На пике численности ее климатическое воздействие бы-



ло эквивалентно 75 % воздействия всех лесных пожаров в Канаде [32].

Крупные лесные пожары происходят главным образом в естественных малонарушенных лесах, а вспышки численности вредителей — и в управляемых.

### Ветровалы

В результате потепления климата прогнозируется увеличение числа и интенсивности экстремальных погодных явлений, включая ураганные ветра [21]. Это означает высокий риск увеличения числа деревьев, поврежденных ураганными ветрами, что оказывает воздействие на бюджет углерода.

Данные о ветровалах имеются в основном только по управляемым лесам (см. также раздел 6.)

### Старовозрастные бореальные леса как стоки углерода

Распространено мнение о том, что старовозрастные леса являются углерод-нейтральными, т. е. не являются его стоком. Тем не менее изучение существующих данных опровергает это: умеренные и бореальные леса продолжают депонировать углерод и тогда, когда им несколько веков (рис. 1). Даже 800-летние леса могут быть стоком углерода [45]. По данным последних исследований, леса, растущие тысячами на островах Северной Швеции, продолжают выполнять функцию стока углерода, депонируя его в почвенном горизонте. В этих лесах более 90 % углерода сосредоточено в почве [25].

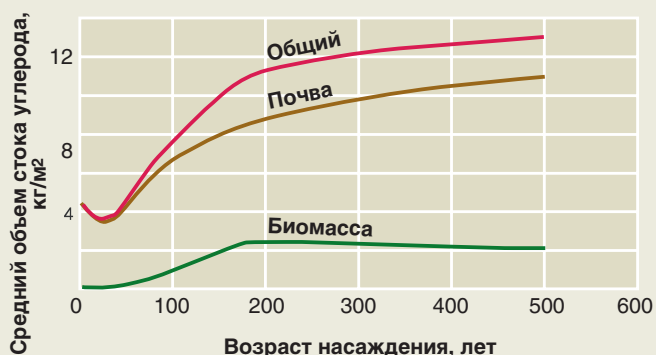


Рис. 1. Динамика структуры стоков углерода в древостое ели черной на Аляске. Содержание углерода в биомассе достигает своего максимума примерно через 200 лет, но общий запас углерода продолжает возрастать и спустя 500 лет благодаря депонированию в почве. График построен на оценочных данных (по [28])

Около половины сохранившихся старовозрастных малонарушенных лесов планеты произрастают в умеренной и бореальной зонах, причем основные площади сосредоточены в северной части бореальной зоны. Ими ежегодно депонируется от 0,8 до 1,8 Гт С, или около 10 % углерода, накапливаемого всеми экосистемами планеты.

Поскольку старовозрастные леса депонируют углерод столетиями, в них накапливаются очень большие запасы. При рубке таких лесов или других нарушениях большая часть накопленного углерода попадает в атмосферу [45].

Хотя бореальные старовозрастные леса частично защищены своей малой доступностью, продолжающаяся фрагментация, обезлесение и освоение (включая добычу полезных ископаемых, торфа, строительство плотин) рано или поздно сведут на нет их роль в качестве стоков и хранилищ углерода. Лишь у малой части бореальных лесов (менее 10 %) имеется тот или иной охранный статус. В результате фрагментации и интенсивной хозяйственной де-

ятельности в старовозрастных лесах, особенно в Сибири, возрастает количество пожаров. В 2002 году в России огнем пройдено около 7,5 млн, в 2003 году — 14,5 млн га. Большая часть пожаров имеет антропогенное происхождение [9].

### Что нам делать с бореальными лесами: управлять или охранять?

В девственных (первичных) бореальных лесах содержится намного больше углерода, чем в управляемых, причем основная его часть сосредоточена в почве (но много и в биомассе) [37]. Старовозрастные леса депонируют углерод медленнее, чем молодые (которые растут быстрее), но первые отнюдь не являются углерод-нейтральными, несмотря на то, что их так часто ошибочно позиционируют. Даже многовековые леса могут быть стоками углерода, как уже упоминалось выше. Их воздействие на климат определяется интенсивностью воздействия природных катастрофических факторов, связанных с потеплением климата.

Согласно оценкам от 70 до 90 % углерода древесной биомассы в ближайшие 20 лет будет сосредоточено в лесных ООПТ, т. е. фактически в старовозрастных лесах, освобожденных от рубок в природоохранных целях.

Одним из рисков «хранения» углерода в старовозрастном бореальном лесу является его подверженность воздействию природных факторов катастрофического характера (пожары, вспышки численности насекомых-вредителей и ветровалы), которые могут вызвать эмиссию части этого углерода. Уровень риска повышается с возрастом леса, а также с потеплением климата. Тем не менее замещение естественной динамики лесохозяйственными мероприятиями, в первую очередь рубками, не решает проблемы.

При рубке старовозрастного леса депонирование им углерода временно приостанавливается, но, что более важно, некоторая его часть улетучивается в атмосферу. Поскольку в старовозрастном лесу углерода в почве и биомассе больше, чем в управляемом, при первой рубке произойдет такая значительная эмиссия в атмосферу, что следующему поколению леса потребуется долгое время, чтобы депонировать такое же количество углерода.

Канадские ученые с помощью компьютерного моделирования получили данные воздействия перехода от старовозрастного леса к управляемому на углеродный бюджет. В исследовании обрабатывались данные по шести массивам лесов площадью около 100 тыс. га, один из этих массивов — бореальный лес на востоке Канады. Вначале изучалось влияние природных катастрофических факторов на бюджет углерода. При моделировании на протяжении 100 лет воздействие природных катастрофических факторов постепенно замещалось рубками, затем рассчитывался прогноз на 250 лет. Результаты показывают, что переход от естественного малонарушенного леса к управляемому связан с чистой эмиссией даже в долгосрочной перспективе. По исследуемой бореальной лесной экосистеме потери углерода на экосистемном уровне составили 12 % в течение 350 лет после начала рубок. За первое столетие (переходный период) потери углерода были значительно выше (рис. 2) [31].

Необходимо подчеркнуть, что эти данные получены в результате компьютерного моделирования. Кроме того, между лесохозяйственными практиками, используемыми в Канаде и Скандинавии, есть много различий, что может воздействовать на потоки углерода. Воздействие может зависеть также от изменений в управлении лесами. Тем не менее результаты этого исследования чрезвычайно интересны, особенно по первому периоду (50–100 лет), поскольку воздействие в этот период наиболее сильное.

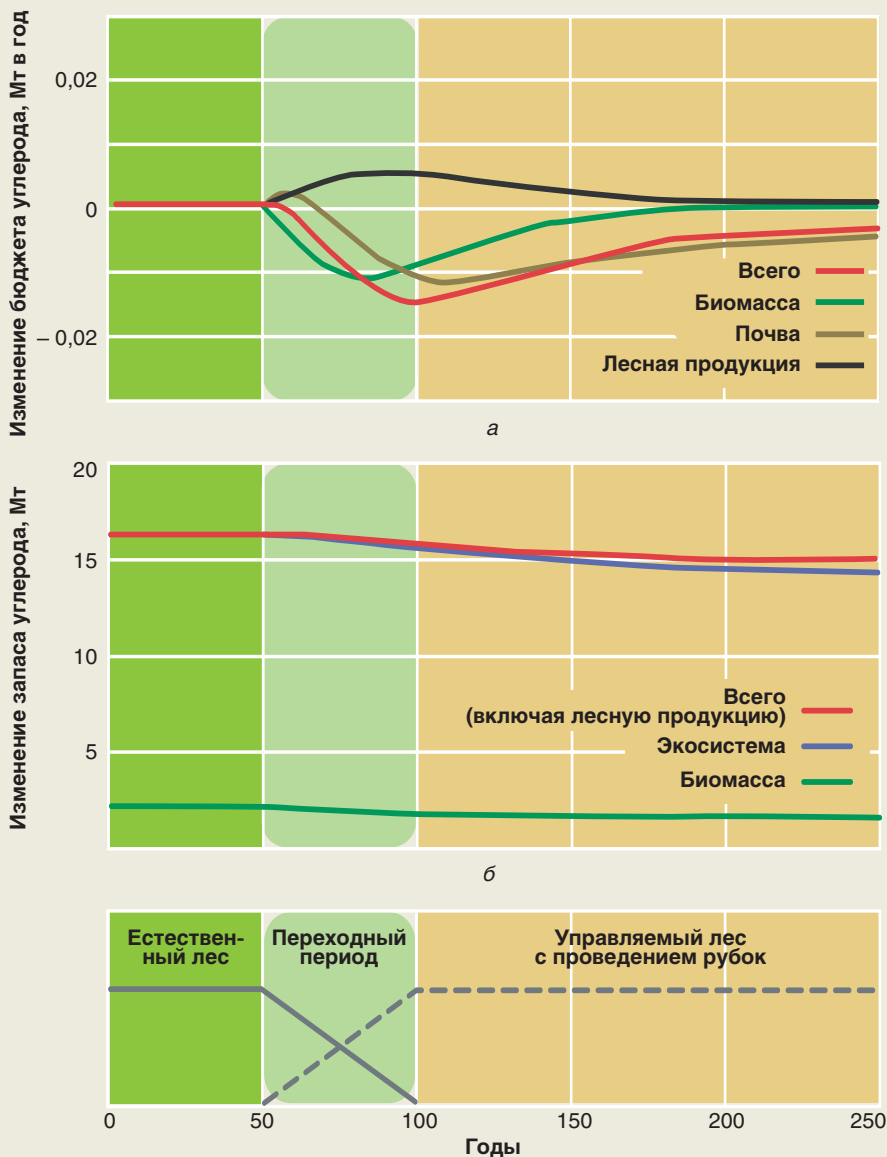


Рис. 2. Динамика бюджета (а) и запаса (б) углерода бореального лесного ландшафта в Канаде во время перехода от старовозрастного малонарушенного леса к управляемому. В первые 50 лет показано состояние малонарушенного леса, подверженного действию катастрофических природных факторов (с частотой воздействия 80 лет). От 50 до 100 лет эти факторы постепенно замещаются рубками в таком же объеме, но с более длительной частотой воздействия (ротацией) — 120 лет.

Данные получены с помощью компьютерного моделирования. В исследовании не рассматривались эмиссии парниковых газов при переработке, транспортировке и использовании заготовленной древесины, учитывался углерод, депонированный в заготовленной лесной продукции, но без эффектов замещения (по [31])

## 6. Управляемые лесные экосистемы

В управляемых лесах заготовка древесины, как правило, является основным фактором внешнего воздействия на экосистему. На углеродный бюджет по-разному влияют различные лесохозяйственные мероприятия, такие как подготовка площади, подбор пород, внесение удобрений. Лесохозяйственные мероприятия также оказывают воздействие на природные факторы катастрофического характера. В частности, в большей части управляемых бореальных лесов случается меньше лесных пожаров, чем в естественных. Риск ветровала и поражения насекомыми-вредителями зависит от лесохозяйственных мероприятий и может быть выше или ниже, чем в естественных лесах.

Принципиальное отличие малонарушенных лесов от управляемых состоит в том, что в последних происходит изъятие биомассы из экосистемы при рубках. С климатической точки зрения большое значение имеет то, что затем происходит с заготовленной древесиной. Если древесина используется, например, в качестве строительного материала, могут пройти многие десятилетия или даже века перед тем, как она сгниет или будет сожжена и высвободит депонированный углерод в атмосферу. Как упоминалось выше, лесная биомасса может использоваться в виде топлива, при этом сокращается использование ископаемого топлива и непосредственно замещается уголь, нефть или природный газ, а также другие материалы, для производства которых оно требуется (например, бетон или сталь).

Основное внимание в этом разделе уделяется лесам и лесному хозяйству Швеции, но рассматриваются примеры и других стран.

### Влияние климата на рост лесов

На большей части территории Швеции рост леса ограничивается, как правило, температурой, следовательно, логично предположить, что при потеплении климата рост усилится. В Вастерботтене ученые провели исследование, как скажется увеличение температуры лесной почвы (спелый ельник) на 5 °С относительно среднего уровня: интенсивность роста стволов по диаметру за 6 лет практически удвоилась. По оценкам, производительность лесов Швеции может возрасти на 5–14 % к 2040 году благодаря глобальному потеплению, а затем и еще больше (см. таблицу) [12].

Усиление роста означает увеличение объема биомассы, т. е. депонирования углерода растущим лесом. Тем не менее все это требует допущения, что интенсивность рубок на данной территории не увеличится, а также не возрастет воздействие природных катастрофических факторов (пожаров, вспышек численности насекомых-вредителей и ветровалов). Модель, использованная для про-

Сравнительное увеличение производительности лесов Швеции при глобальном потеплении на 2,5 и 4,5 °С (сценарии МГЭИК В2 и А2)\*

Период, годы	Увеличение производительности, %, по сценарию	
	В2	А2
2011–2040	5	14
2041–2070	14	25
2071–2100	24	31

\* По более «теплому» сценарию А2 темп роста производительности ели замедлится к концу столетия. Климат станет слишком теплым для нее [12, 51].



гнозирования в данном исследовании, не учитывает воздействие этих факторов [12] из-за отсутствия необходимых для этого данных. Следовательно, результаты прогнозного моделирования в данном случае не отображают полной и реалистичной картины.

Следует отметить, что увеличение темпов прироста деревьев по диаметру не обязательно означает увеличение прироста биомассы, а следовательно, и депонирования углерода. Ускорение роста зачастую означает снижение плотности древесины. При 2-кратном увеличении темпов прироста плотность древесины может снизиться до 20 % [42].

### Природные катастрофические факторы в управляемых лесах

Как говорилось выше, природные катастрофические факторы значительно воздействуют на экологию и бюджет углерода в старовозрастных бореальных лесах. В управляемых лесах данные факторы могут быть взяты под контроль и их воздействие более ограничено. Несмотря на это, вероятно, климатические изменения существенно повлияют на интенсивность природных катастроф и бюджет углерода.

Уже имеются сообщения об отдельных таких метеорологических явлениях. Например, по некоторым оценкам, экстремальные температуры и засуха 2003 года в Европе снизили запасы углерода в растительной биомассе примерно на 30 %. Леса, подвергшиеся тогда засухе, превратились в источник углерода с интенсивностью около 0,5 Гт в год, что эквивалентно количеству углерода, депонируемому этими экосистемами за 4 года при нормальных погодных условиях [10].

#### Пожары

Частота возникновения лесных пожаров в Швеции значительно снизилась. Сейчас вероятность пожара для конкретного насаждения составляет менее 1 раза в 1000 лет, в то время как еще в начале 1900-х годов — 1 раз в 50–200 лет. Причина, по которой частота пожаров значительно снизилась, состоит в сочетании более эффективных мер борьбы с ними и лесохозяйственных мероприятий, направленных на предотвращение пожаров, главным образом связанных с сокращением объемов сухой мертвой древесины в лесу. В 1950–1960 годы произошел резкий скачок пожаров, но благодаря совершенствованию мер борьбы их частоту и интенсивность удалось значительно снизить.

При потеплении климата угроза лесных пожаров возрастает по всей Швеции вследствие более жарких летних сезонов и уменьшения количества осадков. Наиболее высокая пожарная опасность прогнозируется в провинции Готланд, где уже сейчас отмечаются очень засушливые летние сезоны [34].

#### Ветровал

Ветер — один из наиболее значимых катастрофических факторов для лесов Европы в XX веке. Размеры ущерба год от года колеблются, но с конца прошлого столетия прослеживается четкая тенденция к его увеличению. На юге Швеции ущерб от ветровалов наибольший, хотя это нельзя объяснить только тем, что ураганные ветры стали наблюдаться чаще. Одна из причин — более интенсивные сплошные рубки, при которых образуется выраженная кромка деревьев, неадаптированных к воздействию сильного ветра. Более умеренный климат, формирующий глобальное потепление, также снижает устойчивость насаждений к воздействию ураганных ветров. Одним из факторов, объясняющих увеличение ущерба от ветровалов, является увеличение в 1990-е годы в составе насаждений на юге Швеции доли ели — породы, менее устойчивой к воздействию сильного ветра. Изменение климата создает больший риск повреждения деревьев как непосредственно вследствие климатических изменений, так и от изменения состава насаждений. Чувствительность лесов

к воздействию ветра можно снизить, подбирая более устойчивые породы, а также используя грамотные лесоводственные подходы [12].

Ураган Гудран, обрушившийся на юг Швеции в январе 2005 года, повредил 66 млн м<sup>3</sup> древесины на площади около 2 720 км<sup>2</sup>. Потери углерода на этой территории в первый год после урагана во много раз превосходили те, которые произошли бы вследствие сплошной рубки. Общая эмиссия углерода в атмосферу в результате воздействия на леса за первый год после урагана оценена в 2,3–3,4 Мт. Дополнительно снижение потенциала насаждений, подвергшихся воздействию урагана, к депонированию углерода составляет 0,4 Мт в год [39]. Не будет большим преувеличением сказать, что общий эффект от воздействия урагана — это сокращение общего стока углерода в лесах Швеции в 2 раза. Ураган Лотар, обрушившийся на Европу в 1999 году, сократил депонирующую способность европейских лесов на 16 Мт. Доказано, что последствия повреждений деревьев из-за учащения и усиления интенсивности ураганных ветров необходимо учитывать при оценке роли лесов в изменении углеродного баланса в будущем [39].

В будущем более умеренные и влажные зимние периоды определят снижение стабильности насаждений. Подверженностью лесов воздействию сильных ветров можно будет управлять лесохозяйственными мероприятиями, подбором пород и лесохозяйственным территориальным планированием. Рубками ухода будут управляться высота и форма кроны деревьев, полнота насаждения и его изреживание. Компьютерные модели показывают, что игнорирование необходимости изменений в лесохозяйственных подходах приведет к большей подверженности лесов Швеции воздействию ветра [6].

#### Насекомые и фитопатогены

Потепление климата может оказаться благоприятным для ряда видов насекомых-вредителей и микроорганизмов, вызывающих болезни леса в Швеции. Это включает заболевания, вызванные грибами, которые и сейчас наносят большой урон лесному хозяйству страны, в частности корневой губкой (*Heterobasidion annosum*). Сплошные рубки и круглогодичная заготовка древесины создают условия для увеличения распространения корневой губки в последующие десятилетия. Потепление климата может привести к еще большему усилению этой тенденции. Кроме того, ожидается распространение микроорганизма, вызывающего корневую гниль, на север [12].

Другие микроорганизмы, которым благоприятствует потепление климата, — это сосновый вертун (*Melampsora pini-torqua*) и шютте (*Lophodermium pinastri*). В случае распространения соснового вертуна одного влажного года будет достаточно для возникновения ширококомасштабной эпифитотии. Климатические изменения могут привести к проникновению на территорию Швеции новых болезней леса [12].

Короед-типограф (*Ips typographus*) и большой сосновый долгоносик (*Hylobius abietis*) уже наносят существенный ущерб лесному хозяйству Швеции, а изменение климата может способствовать их дальнейшему распространению. С климатической точки зрения короед-типограф — наиболее опасный вредитель, поскольку он поражает старые деревья, которые содержат в своей биомассе много углерода. Массовому размножению и распространению короеда-типографа благоприятствуют три взаимосвязанных биологических механизма:

- учащение и усиление интенсивности ураганных ветров увеличивают количество поваленных деревьев, которые представляют собой идеальную базу для размножения;
- ель испытывает стресс из-за жары и засухи, в то время как тепло благоприятствует жизнедеятельности насекомого;



- потепление климата обеспечивает больше времени для питания и размножения.

В 2006 и 2007 годах на территории Швеции этот вид успевал размножаться дважды за летний сезон. Возможность возникновения такой опасной ситуации предсказывалась учеными давно, хотя изначально предполагалось, что условия для нее сложатся только к концу столетия. Тем не менее мы наблюдаем это уже сейчас [56]. Благоприятные условия для размножения короледа-типографа могут привести к многократному росту популяции и гораздо более сильным поражениям насаждений [13].

Массовое размножение насекомых-вредителей означает снижение роста и жизнеспособности лесов, а следовательно, потенциала лесов депонировать углерод. Если вспышки численности насекомых-вредителей приводят к гибели насаждений, то они становятся источником углерода вследствие разложения мертвой древесины. Согласно некоторым прогнозам, две крупные вспышки численности насекомых-вредителей в сочетании с другими природными факторами катастрофического характера могут трансформировать управляемые леса Канады из нетто-стоков углерода в нетто-источники интенсивностью от 0,030 до 0,245 Гт в период с 2008 по 2012 год. Это подтверждает необходимость использования стратегий управления углеродным бюджетом лесов с помощью лесохозяйственных мероприятий, которые позволят предотвратить воздействие на леса природных факторов катастрофического характера [32, 33].

### Климатический взгляд на лесохозяйственные мероприятия

#### Заготовка древесины и подготовка делянок

В процессе заготовки большие объемы древесной биомассы вместе с содержащимся в ней углеродом удаляются из леса. Тем не менее больше всего углерода содержится в лесной почве. В результате сплошной рубки почва открывается воздействию света, тепла, кислорода, в особенности при скарификации. В почве ускоряются процессы разложения, что усиливает эмиссию углекислого газа. Это приводит к тому, что 15–20 лет после рубки (даже если сразу после нее был посажен новый лес) лесосеки остаются нетто-источниками углерода. Для того чтобы депонирование углерода молодым лесом перевесило эмиссию почвенного углерода, требуется до двух десятилетий. Для полного восстановления бюджета углерода после рубки может потребоваться 30–40 лет [18, 39].

Следовательно, леса, в которых проводятся сплошные рубки, теряют при каждом обороте рубки значительную часть почвенного углерода (рис. 3). По мере роста леса запас углерода начинает медленно повышаться, но до следующей сплошной рубки не успевает восстановиться до уровня, который соответствует его содержанию в девственном лесу [18]. Потенциал лесов Швеции по депонированию углерода может быть значительно повышен при отказе от сплошных рубок.

Рубки в несколько приемов оказывают на бюджет углерода совсем другое воздействие, нежели сплошные рубки. Если древесная растительность на почве всегда в той или иной степени сохраняется, то это позволяет избежать значительных эмиссий почвенного углерода и почва остается стоком углерода. Общий объем эмиссии лесом углекислого газа слабо зависит от изъятия небольших объемов биомассы, поскольку оставшиеся на делянке деревья отвечают на ослабление конкуренции усиленным ростом. Это означает, что отказ от сплошных рубок выгоден с точки зрения воздействия на климат, несмотря на то что прирост молодых деревьев после сплошных рубок более интенсивен, чем прирост оставшихся после выборочных, а также что про-

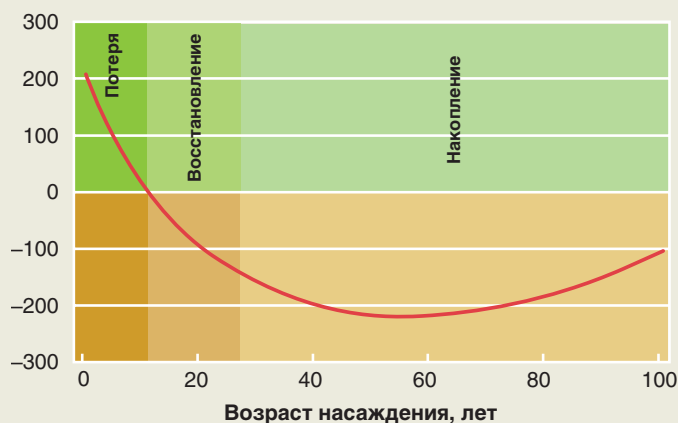


Рис. 3. Чистый баланс обмена парниковых газов между лесом и атмосферой после сплошной рубки. Нулевой год — время сплошной рубки. Лес остается нетто-источником парниковых газов более 10 лет после сплошной рубки. Целое десятилетие требуется молодому поколению, чтобы восстановить потери углерода экосистемой. График составлен по данным исследований в Швеции, Финляндии, Великобритании и Франции

изводится больше лесоматериалов. Запасы углерода в лесах, которые не подвергаются сплошным рубкам, несколько выше, чем там, где такие рубки происходят [18]. Тем не менее следует учитывать, что постепенные рубки сложнее, а заготовка порубочных остатков затратнее, поэтому потенциал по замене ископаемого топлива древесным снижается.

Воздействие прореживания и других рубок ухода на углеродный бюджет минимально. Как правило, они практически не приводят к повышению эмиссии углерода [38].

#### Значение ротационного периода

Если допустить, что максимизация запаса углерода в почве и в биомассе имеет первостепенное значение, то увеличение ротационных периодов является приоритетным.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что увеличение ротационного периода на 20 % увеличивает запас углерода в биомассе на 13, в почве — на 10 % за 100 лет [3]. В краткосрочной перспективе позитивное воздействие может оказаться еще сильнее. Снижение интенсивности рубок на 10 % в лесах Швеции может увеличить запас углерода на 60 % к 2030 году. Никакие другие изменения в лесохозяйственных мероприятиях не способны сопоставимо повлиять на бюджет углерода за такое короткое время [41].

Более длительные периоды ротации приводят также к снижению объемов заготавливаемых лесоматериалов и порубочных остатков для производства биотоплива. Если учесть, что биотопливо замещает ископаемое топливо и тем самым снижает эмиссии углекислого газа, удлинение ротации способствует большему снижению эмиссий, чем ее сокращение даже в длительной (100-летней) перспективе [3].

Это подтверждается исследованием, которое учитывает эффект замещения (рис. 4). Лесохозяйственные подходы, сочетающие длительные ротационные периоды со снижением интенсивности прореживания, обеспечивают увеличение запаса углерода в лесу и параллельно сокращение эмиссий вследствие замещения. Позитивный эффект достигается за счет увеличения выхода пиловочника. С другой стороны, увеличение выхода целлюлозы и топливной биомассы, как правило, негативно воздействует на бюджет углерода. Результаты исследования также показывают, что стратегия, направленная на максимизацию «любой ценой» выхода древесины с единицы площади, является не лучшей с климатической точки зрения [55].



Рис. 4. Воздействие лесохозяйственных мероприятий на депонирование и эмиссию углерода за год при четырех сценариях ведения лесного хозяйства, два из которых характеризуются длительным периодом ротации и меньшей интенсивностью прореживания (большей полнотой насаждений). Результаты представлены в сравнении с современными лесохозяйственными практиками согласно финским руководствам по лесному хозяйству. Лесная продукция разделена на три основные категории — пиломатериалы, целлюлозу и биотопливо. Принято, что 70 % биомассы порубочных остатков собираются и используются. При исследовании учитывался эффект замещения ископаемого топлива и других материалов лесной продукцией. В ельниках с климатической точки зрения все лесохозяйственные режимы оказываются благоприятными: происходит накопление углерода и в лесу, и через замещение. В сосняках воздействие лесохозяйственных режимов на годовую эмиссию оказывается негативным в том случае, если предусматривается только удлинение ротации. Благоприятное влияние накопления углерода в пиломатериалах не перевешивает негативного воздействия на бюджет углерода целлюлозы и биотоплива, за единственным исключением (по [55])

Важно учитывать, что стратегии, направленные на увеличение потенциала лесов к депонированию углерода, охватывают определенный, ограниченный отрезок времени. Сток углерода не может увеличиваться бесконечно. Кроме того, со временем возрастает риск эмиссии углерода вследствие воздействия природных катастрофических факторов [3].

#### Подбор пород

Подбор пород играет большую роль в обеспечении возможностей леса адаптироваться к климатическим изменениям, а также важен с точки зрения углеродного бюджета.

Ельники и березняки накапливают в почве больше углерода, чем сосняки. Это может быть связано с более высоким содержанием органического азота в опаде ели и березы, чем сосны. На севере Швеции в почве ельников и березников

углерода содержится на 65 % больше по сравнению с сосняками, в то время как на юге эта разница в 2 раза меньше и составляет 33 %. Более высокая депонирующая способность почв в отдельных регионах страны, например на востоке Готланды, в северной части Даларны и Естрикленда, может объясняться большим участием ели и (или) березы в составе насаждений, что может быть одним из способов увеличения потенциала лесов Швеции к депонированию углерода в будущем [3].

По всей видимости, на юге Швеции климат в летние месяцы будет и жарче, и суше, чем на севере. Это значит, что сосна будет более привлекательной породой для многих районов. Она менее чувствительна к воздействию ураганных ветров, чем ель, однако по сравнению с той же елью и березой обладает меньшим депонирующим потенциалом [3].



### Интенсивное лесовыращивание

Основными методами интенсификации лесовыращивания являются активное использование удобрений и более интенсивное использование интродуцентов, включая сосну скрученную, лиственницу и ель ситхинскую.

Часть арсенала интенсивного лесовыращивания — использование гибридного посадочного материала в сочетании с удобрением почвы [35]. В будущем при интенсивных методах лесовыращивания за период ротации может потребоваться внесение в почву до 1 500 кг/га азотных удобрений [52] (сейчас, как правило, вносится около 150 кг/га примерно за 10 лет до рубки). В экспериментах при внесении от 600 до 1 800 кг/га азота на протяжении 14–30 лет депонирование углерода возросло в среднем на 25 кг на 1 кг азота. Увеличился запас и почвенного углерода (на 11 кг на 1 кг внесенного азота). При внесении фосфора и калия увеличение депонирования углерода деревьями составило 38, почвой — 11 кг [3]. Даже учитывая, что производство удобрений также связано с эмиссией парниковых газов, которая эквивалентна 0,4–1,2 кг углерода на 1 кг азота, климатический эффект их применения весьма позитивен.

По данным исследования, проведенного в Вестерботтене, при многократном удобрении ельника к возрасту рубки запасы углерода в нем были на 26 % выше, чем в среднем по аналогичным окружающим древостоям, которые не удобрялись. С применением удобрений насаждение дало на 80 % больше древесного сырья. Это позволяет в большей мере использовать лесную продукцию для замещения ископаемого топлива и других материалов [43].

Результаты одного из исследований потенциала интенсивного лесовыращивания в Швеции показывают, что около 15 % лесов на территории страны могут быть объектом интенсивного лесного хозяйства, главным образом за счет интенсивного удобрения и использования сосны скрученной или высокопродуктивных гибридов ели [35]. Интенсивное лесовыращивание позволит увеличить ежегодное депонирование углерода на 3,8 Мт за период с 2030 по 2040 год по сравнению с обычными практиками лесопользования [41].

Тем не менее в настоящее время в Швеции отсутствует опыт широкого и длительного интенсивного лесовыращивания, которое сопряжено с определенными значительными рисками. В частности, многократное применение удобрений влияет на состав насаждений и наземного покрова. Кроме того, пока не разработаны экспериментальные методики измерения потоков углерода, которые способны показать нетто-накопление углерода лесами при многолетнем использовании удобрений [18].

Интенсификация лесовыращивания ведет к формированию однородных популяций и сокращению разнообразия лесов, что может повысить угрозу распространения насекомых-вредителей и болезней леса, а также снижения устойчивости к климатическим изменениям. В настоящее время научных данных, которые позволили бы количественно оценить эти риски, нет [60].

Удобрение лесов может повысить риск распространения определенных патогенных микроорганизмов, например возбудителя ржавчины сосны (*Cronartium flaccidum*) и снежного шютте (*Phacidium infestans*). Внесение удобрений в лесах, зараженных гнилями, может ускорить развитие корневой гнили, что, в свою очередь, повысит чувствительность насаждений к бурелому. Также необходимо учитывать возможное увеличение количества поврежденных молодых насаждений оленями [60]. Все эти воздействия ведут к снижению потенциала лесов по депонированию углерода.

Существует прямая зависимость между содержанием азота в почве и интенсивностью эмиссий оксида азота, соответственно при внесении азота в составе удобрений повышается риск увеличения эмиссии оксида азота лесной почвой.

В настоящее время 80–90 % эмиссии оксида углерода в Швеции приходится на сельскохозяйственные земли, на которых применяются азотные удобрения для повышения их производительности. Применение удобрений в лесу сказывается на содержании почвенного азота аналогичным образом. Приток азота в почву повысит относительное содержание азота в органическом веществе лесной почвы по сравнению с углеродом, тем самым увеличится риск нитрификации и эмиссии оксида азота [3].

Часть азота (0,5–1 %), внесенного с удобрениями, выделяется из лесной почвы при эмиссии оксида азота. При планируемом в рамках интенсивного лесовыращивания уровне внесения удобрений и результатах усиления роста деревьев, наблюдаемого при проведении экспериментов, повышение эмиссии будет с лихвой перекрыто повышением депонирования углерода [52]. Тем не менее точный объем эмиссии оксида азота из почв различного состава при интенсивном лесовыращивании неизвестен. Также пока нет достоверных данных о том, что будет происходить с почвенным азотом после заготовки древесины на участках интенсивного внесения удобрений. Поскольку оксид азота является очень мощным парниковым газом, даже незначительное изменение его потоков может привести к существенным изменениям в общем балансе парниковых газов.

На эмиссию парниковых газов могут оказать влияние и опосредованные эффекты внесения удобрений, например в результате попадания удобрений в озера и ручьи, которые являются частью лесного ландшафта. В настоящее время данные, позволяющие количественно оценить такое воздействие, отсутствуют [52].

По результатам ряда исследований, внесение азотных удобрений снижает способность лесных почв разлагать метан, тем не менее имеются и противоположные сведения. Вычисления для условий Финляндии показывают, что современный уровень притока азота с атмосферными осадками недостаточен для снижения окисления метана. По всей видимости, небольшое повышение концентрации азота в лесных почвах существенно не повлияет на окисление метана, поэтому повышение эмиссии метана в атмосферу не будет значительным [54].

Широкое распространение интенсивного лесовыращивания изменит сортиментную структуру древостоев. В частности, выход пиловочника будет снижаться, а выход сырья для получения целлюлозы и биотоплива — повышаться. Упомянутое исследование показывает, что продукция интенсивного лесовыращивания может с успехом использоваться и для производства пиломатериалов, и в целлюлозно-бумажной промышленности, но доля низших сортов в сортиментной структуре немного увеличится [35]. Таким образом, главной мотивацией к распространению интенсивного лесовыращивания является увеличение выхода лесной продукции с единицы площади.

### Осушение торфяников и ведение лесного хозяйства

На территории Швеции 5 млн га лесов находятся в зоне избыточного увлажнения, т. е. с торфяными почвами, которые используются для ведения лесного хозяйства. Это приблизительно 20 % покрытой лесом площади, или половина всех торфяников страны [3]. Начиная с 1850 года более 1,5 млн га торфяников было осушено с целью формирования продуктивных насаждений [4].

При осушении в почве возрастает интенсивность циркуляции кислорода, что создает благоприятные условия для разложения торфа. Это приводит к повышению эмиссии углекислого газа, а в некоторых условиях и оксида азота в атмосферу. С другой стороны, осушение торфяников ведет к снижению эмиссии метана, который выделяется в анаэробных (с пониженным содержанием кислорода) условиях.





Цель осушения — создание благоприятных условий для произрастания леса. При успешном осушении поглощение углекислого газа лесами усиливается. Согласно оценкам, климатическое воздействие осушения торфяников в краткосрочной перспективе, как правило, нейтрально или негативно даже с учетом эффекта замещения ископаемого топлива древесным сырьем [13].

Осушенные земли занимают более 7 % лесного фонда Швеции, но на их долю приходится 15 % эмиссий парниковых газов лесными землями. По оценочным данным, эмиссия углекислого газа осушенными лесными землями составляет около 10 Мт/год. Тем не менее, по отчетам Финляндии, аналогичный показатель для этой страны составляет около 5 Мт, хотя в Финляндии в 3 раза больше осушенных лесных земель (около 5 млн га), что наводит на мысль о неточности оценок [41].

С учетом депонирования углерода лесами на осушенных землях они остаются нетто-источниками парниковых газов с интенсивностью 1–2 Мт  $\text{CO}_2$ -экв. в год [4].

С начала 1930-х годов из хозяйственного использования выведено, по разным оценкам, от 300 до 450 тыс. га осушенных сельскохозяйственных земель, под которые отводились торфяники или бывшие ложа озер. Значительная часть этих территорий, вероятно, сейчас покрыта лесом. Таким образом, 30–45 % осушенных лесных земель Швеции могут составлять заброшенные сельскохозяйственные угодья. По данным исследования финских ученых, такие земли являются основным источником эмиссий оксида азота. Экспериментально подтверждена эмиссия до 30 кг в год. Это означает, что осушенные лесные земли могут оказаться более интенсивными эмиттерами оксида углерода, чем считалось ранее [4].

После рубки леса на торфяниках уровень грунтовых вод поднимается, поскольку деревья перестают испарять влагу. Изменение уровня грунтовых вод имеет принципиальное значение для объема и состава эмитируемых парниковых газов. Как правило, повышение уровня грунтовых вод обуславливает повышение эмиссии метана и снижение — углекислого газа. Поскольку парниковый эффект метана в 23 раза сильнее эффекта углекислого газа, повышение уровня грунтовых вод способно иметь негативное климатическое воздействие. Изменение уровня грунтовых вод может также сказываться на эмиссии оксида углерода. Минимум роста эмиссий достигается при стабильном уровне грунтовых вод [5].

При лесовосстановлении на осушенных торфяниках после рубки осуществляется прочистка заросшей мелиоративной сети, что также ведет к росту эмиссий парниковых газов. Альтернатива — заиливание и зарастание мелиоративных канав может существенно повлиять как на бюджет углерода, так и на производительность насаждения [5]. По результатам научно-исследовательской программы LUSTRA рекомендовано на осушенных лесных землях при зарастании мелиоративной системы управлять этими землями таким образом, чтобы поддерживать высокую продуктивность леса. Грунтовые воды необходимо поддерживать на уровне, обеспечивающем продолжение роста леса. Тем не менее результаты исследований показывают, что дальнейшее снижение уровня грунтовых вод приводит к усилению почвенной эмиссии, превышающей депонирование углекислого газа растущим лесом, и, следовательно, оказывает отрицательный климатический эффект [4].

#### *Заготовка древесины для производства топлива*

Производство топливной древесины в Швеции за прошедшее десятилетие практически утроилось. Большая часть топлива производится из порубочных остатков (ветви и вер-

шины). В настоящее время сбор порубочных остатков организуется приблизительно на трети деланок сплошных рубок [14]. Заготовка древесины для производства топлива означает изъятие биомассы из леса с последующим сжиганием. Разрушение древесины и эмиссия углекислого газа в атмосферу происходят быстрее, нежели при ее гниении в лесу. Если бы эта древесина осталась в лесу, то небольшая часть углерода, содержащегося в ней, в конечном итоге перешла бы в почвенный сток.

Заготовка порубочных остатков также означает изъятие из лесной почвы питательных веществ, особенно когда порубочные остатки заготавливаются раньше, чем с них осыпается хвоя. Если при этом рост молодого поколения леса замедляется, интенсивность накопления углерода в биомассе уменьшается. По данным исследований, заготовка сучьев и ветвей на лесосеке ведет к снижению производительности следующего поколения деревьев на 6–32 % [24, 50]. В тех случаях, когда заготовка порубочных остатков ведется при рубках прореживания, темпы роста сокращаются на 11–26 % [11].

#### *Заготовка пней*

Пень составляет почти 20 % биомассы дерева, поэтому эта его часть является ценным потенциальным ресурсом для производства топлива. Интерес к заготовке пней резко возрос в последние годы. Тем не менее их заготовка до сих пор осуществляется в довольно ограниченном объеме.

### Что такое лесное топливо?

Любое топливо, произведенное на основе биомассы, называют биотопливом. Древесное топливо получают из деревьев или их частей.

*Лесное топливо* — это топливо из первичной древесины, например из порубочных остатков, из древесины, которая еще не была в промышленном использовании (например, получаемая при расчистках территорий), из отходов лесозаготовительной и лесоперерабатывающей промышленности. Древесное топливо, сырье для производства которого заготавливается непосредственно в лесу, называют первичным лесным топливом.

*Порубочные остатки* — это остатки (ветви и вершины) после заготовки ствола.

Воздействие заготовки пней на потоки углерода и окружающую среду мало изучено [18]. Исследования проводятся, но пока немногие результаты опубликованы. Сильное воздействие на почву при корчевке может приводить к ускорению процессов разложения и, следовательно, к повышению эмиссии углерода. С другой стороны, нарушение почвенных слоев может во многих случаях благоприятствовать лесовозобновлению и таким образом позитивно сказываться на депонировании углерода в долгосрочной перспективе.

По результатам одного из исследований, эмиссия углекислого газа не меняется в первый год после корчевки и подготовки лесокультурной площади. На второй год наблюдается тенденция увеличения эмиссии почвой, хотя причины этого явления остались невыясненными. Было замечено, что площадь поверхности, подвергающейся воздействию колес тракторов или другим механическим воздействиям, была намного больше, чем площадь почвы, нарушенной непосредственно корчевкой. Сильное уплотнение почвы обуславливает сокращение эмиссии углекислого газа, но и ведет к снижению дренированности, что повышает риск эмиссии метана [48].



По результатам другого исследования, запасы углерода в почве, древесной биомассе и экосистеме не восстановились через 27 лет после заготовки пней до уровня контрольных площадок, на которых после рубки не проводились корчевка и заготовка порубочных остатков. Разница запасов углерода приблизительно равнялась запасу углерода в пнях. Это означает, что в данном случае использование пней для производства биотоплива не дает позитивного климатического эффекта. Можно сделать вывод о том, что заготовка пней также снижает запасы углерода в почве и биомассе в долгосрочной перспективе, хотя при недостаточности экспериментальных данных было трудно интерпретировать некото-

рые результаты. Требуется продолжить исследования для того, чтобы сделать однозначный вывод о климатическом эффекте заготовки пней [48].

Воздействие увеличения объемов заготовки пней на потоки углерода оценивается в 25 млрд кВт-ч к 2030 году. Это соответствует примерно 30 % объема ежегодной заготовки пней. Заготовка пней в таком масштабе снижает депонирование углерода биомассой на 1,8 Мт к 2030 году. В данных расчетах не учитывается депонирование углерода почвой [41].

Окончание читайте в следующем номере.



## ЛИТЕРАТУРА

- Aitken, S N m. fl. 2008: Adaption, migration or extirpation: climate change outcome for tree populations. Evolutionary applications, vol. 1:1, p. 95–111.
- Balshi, M S m. fl. (в печати): Vulnerability of carbon storage in North American Boreal Forest to wildfire during the 21<sup>st</sup> century. Global Change Biology.
- Bergkvist, B & Olsson, M (red) 2008: Kolet, klimatet och skogen — Sa kan skogsbruket paverka. Information fran LUSTRA.
- Bergkvist, B (red) 2007: Kolet, klimatet och skogen. Skogskladda, torvtackta marker. Information fran LUSTRA.
- Barnes, C 2003: En varmare varld? Monitor 18, Statens Naturvardsverk.
- Blennow, K 2007: Risk for vindfallning i skogsbruket. I «Alnarps forskare om klimatforandring», SLU.
- Bonan, G B 2008: Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests. Science, vol. 320:5882, p. 1444–1449.
- Bond-Lamberty, B m. fl. 2007: Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance. Nature, vol. 450:7166, p. 89±.
- Bradshaw, C J A m. fl. 2009: Urgent preservation of boreal carbon stocks and biodiversity. Trends in Ecology and Evolution, vol. 24, № 10, p. 541–548.
- Ciais, P m. fl. 2003: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature, vol. 437, p. 529–533.
- de Jong, J (red) 2010: Konsekvenser av skogsbransleuttag. Preliminar rapport. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram inom skogsbransle och miljo 2005–2009.
- Eriksson, H 2007 (red): Svenskt skogsbruk moter klimatforandringar. Skogsstyrelsens rapport 8:2007.
- Eriksson, H 2008: Skogens roll i klimatarbetet. PM 2008-05-30. Skogsstyrelsen.
- Eriksson, H 2011: Muntlig uppgift Hillevi Eriksson, Skogsstyrelsen.
- EEA (European Environmental Agency) 2010: European Union emission inventory report 1990–2008 under the UNECE convention on long-range transboundary air pollution (LRTAP). EEA technical report 7/2010.
- Flannigan, M m. fl. 2009: Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. Global Change Biology, vol. 15:3, p. 549–560.
- Goetz, S J m. fl. 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.
- Grelle, A 2010: Skogens kolbalans bestams av upptag och utslapp. I «Sverige i nytt klimat — vatvarm utmaning». Formas Fokuserar 16.
- Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2008: Boreal forest and climate change. Advances in global change research 27. Springer.
- 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.
- IPCC 2007a: Fourth assessment report, Climate Change: Synthesis report.
- IPCC 2007c: 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.
- IPCC 2007d: Fourth assessment report, Climate change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 4: Ecosystems, their properties goods and services.
- Jacobson, S m. fl. 2000: Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous forest stands. Forest. Ecol. Management 129, p. 41–51.
- Johnsson, M & Wardle, D 2010: Inlagring och kolbalanser en aldrande skog. Presentation vid FSC-seminarium «Klimat, energi och skogsforvaltning» 2010-11-10: [www.fsc-sverige.org/images/dokument/micael\\_johnson.pdf](http://www.fsc-sverige.org/images/dokument/micael_johnson.pdf)
- Juday G m. fl. 2005: Forests, land management and agriculture. Chapter 14 in «ACIA, Arctic Climate Impact Assessment». Arctic Council.
- 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.
- Kasischke, E S m. fl. 1995: Fire, global warming and the carbon balance of boreal forest. Ecological applications 5 (2), pp. 437–451.
- Kirilenko, A P & Sedjo, R A 2007: Climate change impacts on forestry. PNAS, vol. 104:50, p. 19697–19702.
- 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.
- Kurz, W A m. fl. 1998: Carbon budget implications of the transition from natural to managed disturbance regimes in forest landscapes. Mitigation and Adaption Strategies for Global Change. № 2, p. 405–421.
- Kurz, W A m. fl. 2008a: Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. Nature, vol. 452:7190, p. 987–990.
- Kurz, W A m. fl. 2008b: 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.
- 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.
- Larsson, S m. fl. 2009: Mojligheter till intensivodling av skog. Slutrapport regeringsuppdrag Jo 2008/1885. SLU.
- Lenton, T M m. fl. 2008: Tipping elements in the Earth's climate system. PNAS, vol. 105:6, p. 1786–1793.
- 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.
- Lindroth, A 2009: Brev till Goran Persson, Sveaskog 2009-07-01.
- Lindroth, A m. fl. 2009: Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. Global Change biology, vol. 15:2, p. 346–355.
- Lloyd, A H 2005: Ecological histories from Alaskan tree lines provide insight into future change. Ecology, vol. 86:7, p. 1687–1695.
- Lundblad, M m. fl. 2009: Floden av vaxthusgaser fran skog och annan markanvandning. Slutrapport regeringsuppdrag JO 2008/3958.
- Lundgren, C (odaterad) : Fiberskog som vedrevara. Rapport rengranprojektet, SLU, [http://www-gran.slu.se/Webbok/PDFdokument/Ved\\_slutrapport.pdf](http://www-gran.slu.se/Webbok/PDFdokument/Ved_slutrapport.pdf)
- Lundmark, T 2010: Godslad skog ger storsta klimatnyttan. I «Sverige i nytt klimat — vatvarm utmaning». Formas Fokuserar 16.
- Luyssaert, S m. fl. 2010: The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology, vol. 16: 1429–1450.
- Luyssaert, S m. fl. 2008: Old-growth forests as global carbon sinks. Nature, vol. 455, p. 213–215.
- Magnani, F m. fl. 2007: The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. Nature, vol. 447, p. 848–850.
- Malevsky-Malevich, S P m. fl. 2008: An assessment of potential change in wild fire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the 21<sup>st</sup> century. Climate Change, vol. 86:3-4, p. 463–474.
- Mjofors, K & Stromgren, M: Forandringar i skogens kolforrad — ett matt pa stubbskots klimatnytta. I «Stubbskord och miljoeffekter — en popularvetenskaplig lagesrapport, varen 2010». SLU.
- Moren, A-S & Olsson, M (red) 2007: Kolet, klimatet och skogen — sa funkar det. Information fran LUSTRA 2007.
- Nabuurs, G J m. fl. 2008: Hotspots of the European carbon cycle. Forest Ecology and Management, vol. 256, p. 194–200.
- Naturvardsverket 2011: National Inventory Report Sweden 2011. Submitted under the UN Framework Convention on Climate Change and the Kyoto protocol. Swedish Environmental Protection Agency.
- Nordin, A m. fl. 2009: Eff ekter av ett intensivare skogsbruk pa skogslandskapet mark, vatten och vaxthusgaser. Faktunderlag till MINT-utredningen. SLU.
- Olsson, R 2010: Boreal Forest and Climate Change — regional perspectives. AirClim Report 24. Air Pollution and Climate Secretariat.
- Pihlatie, M 2009: CH4 fluxes in Changing Climate. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
- Pingoud, K, Pohjala, J & Valsta, L 2010: Assessing the integrated Climatic Impacts of Forestry and Wood Products. Silva Fennica, vol. 44(1), p. 155–175.
- Schlyter, F 2008 : Granbarkborren — klimatforandringens vinnare. I «Alnarps forskare om klimatforandringen», SLU.
- Soja, A J m. fl. 2007: Climate-induced boreal change: predictions versus current observations. Global and Planetary Change, vol. 56, p. 274–296.
- Stireman, J O m. fl. 2005: Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: Implications of global warming. PNAS, vol. 102:48, p. 17384–17387.
- 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.
- Witzell, J m. fl. 2009: Skador pa skog. Skogskotselserien nr 12. Rapport, Skogsstyrelsen.