



УДК 630*182.5+630*624+574.4(470)

Влияние объёмов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3

© Д. Г. Замолодчиков^{1,2}, В. И. Грабовский², В. А. Курц³

Influence of forest harvest rates on the carbon balance of Russian forests: projective analysis using the CBM-CFS3 model

D. G. Zamolodchikov, V. I. Grabowsky, W. A. Kurz (Lomonosov's Moscow State University; Center for Ecology and Productivity of Forests RAS; Natural Resources Canada, Canadian Forest Service)

A projection of the carbon balance of Russian forests up to 2050 is produced using the Canadian model CBM-CFS3 with description of the starting period using Russian inventory and activity data. The model estimates of the carbon sink in the starting period was close to 270 Mt C/yr. If current rates of forest harvest and fire disturbances will not change in the future, the carbon sink will decrease to 100 Mt C/yr in 2050 due to the increasing average age of forest stands. An increase of forest harvest within allowable cuts limits will lead to a more rapid decrease of the carbon sink. To sustain the carbon sink in Russian forests requires a set of targeted large-scales activities, including increase of forest fire protection, improvement of cutting technologies, and modification of approaches to artificial reforestation.

Key words: forest fund, carbon balance, modelling, projection, forest harvesting

Влияние объёмов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3

Д. Г. Замолодчиков, В. И. Грабовский, В. А. Курц

При помощи канадской модели СВМ-CFS3 осуществлён прогноз углеродного баланса лесов Российской Федерации на период до 2050 г. Состояние лесов в стартовый (современный) период охарактеризовано по российским учётным данным. Модельная оценка стока углерода в стартовый период составила около 270 Мт С/год. При сохранении современных уровней лесопользования и нарушений лесов от пожаров сток углерода уменьшится к 2050 г. до 100 Мт С/год в связи с увеличением среднего возраста лесных насаждений. Увеличение объёмов лесопользования в пределах расчётной лесосеки приведёт к более быстрому снижению стока углерода. Поддержание стока углерода в леса Российской

Федерации требует осуществления комплекса целенаправленных крупномасштабных мероприятий, в частности, усиления охраны лесов от пожаров, изменения технологий и режимов рубок, модификации подходов к искусственному лесовосстановлению.

Ключевые слова: лесной фонд, баланс углерода, моделирование, прогноз, лесопользование

Замолодчиков Дмитрий Геннадьевич, д-р биол. наук, зав. каф. общей экологии
Грабовский Василий Исаакович, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.
Kurz Werner A., Senior Research Scientist, PhD

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет

Адрес: 119234, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

Телефон: 8 (495) 939-52-54

E-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

Адрес: 117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

³Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre

Address: V8Z 1M5, Canada, British Columbia, Victoria, Burnside Road West, 506

Одно из проявлений глобального экологического кризиса представлено современным потеплением климата. Главной причиной потепления являются антропогенные эмиссии углекислого газа, связанные со сжиганием ископаемого топлива, сельскохозяйственным производством и изменениями землепользования. Вклад лесного хозяйства в рост атмосферной концентрации CO_2 варьирует в зависимости от степени экономического развития государства. В индустриальных странах с устоявшейся системой землепользования и относительно малым приростом населения, леса, как правило, являются стоком атмосферного углерода, тем самым тормозя процесс потепления. В развивающихся государствах ситуация обратная, леса вырубаются, а прежде занятые ими земли конвертируются в другие виды пользования. Эмиссии от обезлесения в тропических странах ныне составляют более 10 % от суммарных антропогенных выбросов углекислого газа [17].

Леса Российской Федерации в настоящее время являются стоком атмосферного углерода, величины которого по различным оценкам составляют от 100 до 700 млн т С/год [5-7, 10, 11, 16, 22, 37, 38]. Сравнительно недавно, в конце 1980-х годов, леса России ежегодно депонировали значительно меньше углерода. Усиление стока углерода произошло в первой половине 1990-х годов по причине резкого сокращения объёмов заготовки древесины в период социально-экономических реформ [6, 7]. Ныне ситуация в лесном хозяйстве разворачивается в обратную сторону, объёмы заготовок древесины начинают возрастать. В некоторых регионах крупные целлюлозно-бумажные и деревообрабатывающие комбинаты уже испытывают дефицит местного сырья [13], что свидетельствует о наличии реальных экономических стимулов к расширению объёма лесозаготовок. В этой связи логичным выглядит вопрос, как изменится углеродный баланс лесов России при росте объёмов лесопользования?

Поставленный вопрос имеет не только академический характер. Углерододепонирующий потенциал управляемых лесов может использоваться для выполнения национальных обязательств по Рамочной конвенции ООН об изме-

нении климата (РКИК ООН) и Киотскому протоколу. Российская Федерация отказалась от принятия обязательств по второму периоду действия Киотского протокола (2013-2018 гг.), но остаётся полноправным членом РКИК ООН и принимает участие в переговорном процессе по климатическому соглашению на период после 2020 г. Для адекватной формулировки национальных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов крайне важно иметь представление о том, как может измениться в будущем вклад лесного хозяйства.

Для решения поставленной задачи прогноза углеродного баланса лесов России используется модель СВМ-CFS3, разработанная в Лесной службе Канады [26]. Такой выбор связан с рядом обстоятельств. Во-первых, СВМ-CFS3 является признанным инструментом инвентаризации и прогноза углеродного баланса лесов, прошедшим проверку экспертами РКИК ООН. Во-вторых, программное обеспечение СВМ-CFS3 открыто для использования и сравнительно легко адаптируется к учётным данным по лесам России. В-третьих, модель достаточно детальна, чтобы адекватно описать отражённую в учётных материалах специфику лесов (породный и возрастной состав, ход роста, характер нарушений), но при этом достаточно обобщена, чтобы провести расчеты для всей совокупности лесов России.

Материал и методика

Разработка модели СВМ-CFS3 стартовала при поддержке Лесной службы Канады в начале 1990-х годов [27]. Для получения рабочей версии модели понадобилось более 10 лет интенсивной деятельности, связанной как с теоретическими решениями проблем моделирования [28, 29, 31], так и с созданием пользовательского интерфейса [26]. Модель применялась к оценке и прогнозу углеродного бюджета лесов Канады – в целом [33, 39] и отдельных её провинций [18, 35], а также Италии [34]. Результаты моделирования служат основой для формирования канадской лесной отчётности по РКИК ООН и принятия решений по управлению балансом углерода в национальных лесах. Расчётные процедуры и отчётные форматы

модели признаны соответствующими рекомендациям Межправительственной группы по изменениям климата [30].

Модель СВМ-CFS3 представляет собой программный комплекс, снабжённый пользовательским интерфейсом. Моделирование динамики фитомассы основывается на данных по ходу роста запасов деловой древесины. Для конверсии запасов древесины в надземные фракции фитомассы используются зависимые от возраста регрессионные уравнения. Подземные компоненты фитомассы (тонкие и крупные корни) рассчитываются через надземную фитомассу по эмпирическим уравнениям, полученным на основе литературных данных по бореальным лесам. С помощью набора коэффициентов, специфичных к породе и экоклиматической зоне, вычисляются годовые величины отпада древесины, отпада листвы, хвои и корней. Процессы разложения характеризуются через период полураспада, являющийся функцией среднегодовой температуры, древесной породы и возраста насаждения. Текущая величина данного пула мертвого органического вещества (МОВ) рассчитывается как сумма запасов растительных остатков различной степени разложения, отпавших либо опавших в предыдущие годы развития лесного насаждения. Пул гумуса почвы пополняется из других пулов МОВ. Для оценки стартовых величин пулов МОВ используется процедура инициализации модели, состоящая в ретроспективных расчетах динамики запасов этих пулов. Модель предоставляет возможность прогноза углеродного бюджета лесов по различным сценариям управляющих и нарушающих воздействий (сплошные и промежуточные рубки, лесные пожары). Процедуры формирования массивов исходных данных и приёмы работы с интерфейсом модели СВМ-CFS3 детально охарактеризованы в руководстве пользователя [26]. В Интернете на веб-сайте Лесной службы Канады [20] предоставлен доступ к программному обеспечению модели и руководству пользователя при бесплатной регистрации.

Предварительная адаптация модели СВМ-CFS3 к условиям Российской Федерации была осуществлена нами в применении к лесам Во-

логодской обл., Дальнего Востока и Северного Кавказа [1, 3, 4]. Верификация модельных расчётов производилась путём их сопоставления с независимыми оценками, выполненными для тех же регионов. Итоги сравнения продемонстрировали хорошую сходимость независимых оценок и результатов моделирования на СВМ-CFS3 – как для пулов, так и потоков углерода, что позволило сделать вывод о принципиальной применимости СВМ-CFS3 к российским лесам.

В модели СВМ-CFS3 элементарным пространственным объектом является учётная единица, соответствующая совокупности лесных насаждений со сходными свойствами. Такой подход к идентификации учётных единиц облегчает стыковку модели СВМ-CFS3 с данными Государственного лесного реестра (ГЛР) либо архивными материалами государственных учётов лесного фонда (ГУЛФ). Информация этих источников идентифицируется по кодам лесничеств (для ГУЛФ – лесохозяйственных предприятий), субъектов РФ, преобладающих пород, возрастов рубки (спелости) и другим параметрам.

Основным источником исходной информации по лесам Российской Федерации служила база данных ГУЛФ по состоянию на 1 января 2003 г. Для территориальной дифференциации материалов ГУЛФ были применены так называемые пространственные единицы (ПРЕ), образованные пересечением границ субъектов РФ и лесных районов согласно перечню [14]. По состоянию на начало 2003 г., база данных ГУЛФ включала информацию для 87 субъектов РФ, число лесных районов составляло 31, пересечения их границ образовали 160 ПРЕ. Учётную информацию по ПРЕ получали суммированием сведений по соответствующим лесохозяйственным предприятиям. Преобладающие породы из базы данных ГУЛФ были сопоставлены с биологическими родами древесных пород из списка СВМ-CFS3. Сведения по данной преобладающей породе дополнительно дифференцировали по коду возраста рубки (спелости). Таким образом, в нашем случае учётная единица представлена совокупностью лесных насаждений данной преобладающей породы с данным кодом возраста рубки (спелости) в пределах ПРЕ.

Для характеристики возрастной структуры лесных насаждений в ГЛР и ГУЛФ используются группы возраста (молодняки I и II классов возраста, средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные). Интервалы возрастов, используемые при отнесении лесного насаждения к конкретной группе, задаются кодом возраста рубки (спелости). При этом различные группы возраста могут иметь разную продолжительность. Модель СВМ-CFS3 оперирует с классами возраста, имеющими одинаковую продолжительность. Для пересчёта исходных данных из групп возраста в классы были разработаны процедуры предварительной обработки, применённые к данным ГУЛФ по состоянию на 1 января 2003 года. Сначала с учётом возраста рубки (спелости) были найдены зависимости изменения средних запасов от возраста лесных насаждений, затем эти зависимости были использованы для распределения общих запасов в группах возраста по составляющим классам. Полученные распределения площадей и запасов древесины по классам возраста вместе с зависимостями хода роста лесных насаждений были импортированы в СВМ-CFS3 что позволило сформировать массив стартовой информации для моделирования.

При осуществлении прогнозных расчётов авторы статьи сфокусировали внимание на факторе лесозаготовок. Были разработаны 4

сценария изменения лесопользования (рис. 1). Сценарий 1 («без изменений») предусматривает сохранение средних объёмов лесозаготовок за 1999-2008 гг. Согласно этому сценарию, объёмы лесопользования, лесовосстановления и уровень охраны лесов от пожаров остаются постоянными на период до 2050 г. включительно. Сценарии 2 и 3 разработаны с учётом «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2020 года» (далее – Стратегия) [15], предусматривающей увеличение заготовки древесины на 57 % к 2020 г., то есть на 5,7 % в год. Поскольку в Стратегии не рассматривается, какими темпами и до каких пределов будут расти лесозаготовки в 2021-2050 гг., для данного периода были приняты следующие допущения. Согласно сценарию 2 («краткий умеренный рост»), объёмы лесопользования после 2020 года не повышаются, а стабилизируются на уровне 157 % от современного. В сценарии 3 («продолжительный умеренный рост») ежегодный рост лесозаготовок на 5,7 % сохранится и после 2020 года, вплоть до достижения в 2047 году расчётной лесосеки (314 % от современного уровня). Дополнительно рассмотрен гипотетический сценарий 4 («быстрый рост»), предполагающий наиболее высокие темпы увеличения объёма лесозаготовок, обеспечивающие достижение размера расчётной лесосеки уже в 2020 году.

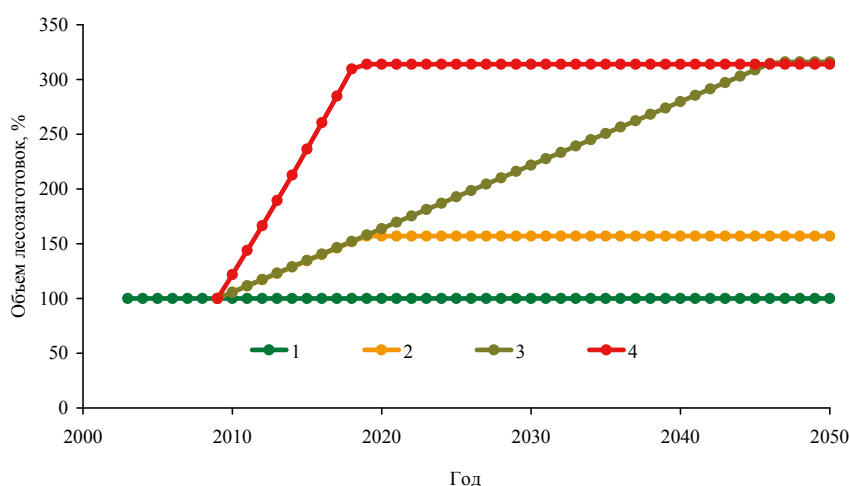


Рис. 1. Объёмы лесопользования при разных прогнозных сценариях: 1 – нет изменений; 2 – краткий умеренный рост; 3 – продолжительный умеренный рост; 4 – быстрый рост

Сценарии 2-4, предусматривающие рост лесопользования, учитывают региональные ограничения по расчетной лесосеке. Если в данном субъекте РФ достигается уровень расчетной лесосеки, то дальнейшего увеличения объема лесопользования не происходит, но при этом возрастают темпы роста заготовок в субъектах РФ с недоиспользованной расчетной лесосекой. Предполагается, что объем лесовосстановительных работ растёт пропорционально объемам лесозаготовок, а мероприятия по охране лесов, контролирующие масштабы гибели насаждений от пожаров и прочих причин, остаются на прежнем уровне. Для ввода в модель среднего уровня деструктивных лесных пожаров использованы величины, рассчитанные по площадям гарей с учётом времени их зарастания [5]. Климатические изменения, а также их потенциальное воздействие на продуктивность лесов и частоту лесных пожаров в модельном прогнозе не учитываются.

Все модельные расчёты стартовали с одинакового кадастрового файла, созданного на основе базы данных ГУЛФ по состоянию на 1 января 2003 г. Для 2003-2009 г. использовались постоянные значения объемов лесозаготовок, равные фактическим средним значениям за 1996-2002 гг. согласно официальным статистическим данным. При допущении, что вся древесина заготавливается при сплошных рубках, суммарный для России базовый уровень лесозаготовок составил 151 млн м³/год при площади рубок 592 тыс. га/год. Объемы лесозаготовок, исходно заданные для субъектов РФ, распределяли пропорционально площади лесов ПРЕ, образующих данный субъект РФ. Начиная с 2010 г., объёмы лесозаготовок увеличивали в соответствии со сценариями, представленными на рисунке 1. Глубина модельного прогноза составила 48 лет. При интерпретации модельных результатов было принято, что значения углеродных потоков за первый год периода имитации соответствуют 2003 г., за второй год – 2004 г. и так далее, вплоть до 2050 г.

Моделируемый временной интервал начинается с 2003 г., что делает возможным сравнение модельных результатов стартового периода

с современными оценками углеродных параметров лесов России. Эти значения были получены при помощи системы РОБУЛ, разработанной для инвентаризации углеродного бюджета лесов России [7]. Системы уравнений и табличные параметры РОБУЛ, а также полученные с её помощью результаты охарактеризованы в серии работ [5-7]. Ныне РОБУЛ используется в Национальном кадастре парниковых газов для формирования и предоставления в органы РКИК ООН отчётности по балансу парниковых газов в управляемых лесах Российской Федерации [12].

Результаты и обсуждение

Углеродные пулы на старте прогнозного периода. Идентификация параметров разнообразных процедур, используемых при расчёте пулов и потоков углерода в модели СВМ-CFS3, осуществлена по натурно-полевым данным для канадских лесов. В настоящей работе модель применена к российским лесам, отличающимся от канадских как по составу доминирующих древесных видов, так и по комплексам лесорастительных условий. *A priori* нельзя было ожидать, что результаты, полученные при помощи СВМ-CFS3, будут количественно сопоставимы с независимыми оценками, построенными на основе расчётных систем, изначально ориентированных на леса России.

Сравним рассчитанные по СВМ-CFS3 пулы углерода лесов России со значениями, полученными в системе РОБУЛ (табл.). Отметим небольшое расхождение площадей, к оценке которых были применены СВМ-CFS3 и РОБУЛ. В первом случае результаты относятся к площади 749,9 млн га (которые формируются из 717,7 млн га покрытых лесом земель и 32,2 млн га фонда лесовосстановления), находившейся в ведении Рослесхоза по состоянию на 2003 г. Оценка РОБУЛ получена для площади 767,5 млн га, что соответствует сумме покрытых лесом земель Рослесхоза, ООПТ и прочих ведомств, также по состоянию на 2003 г. Детальное рассмотрение изменений площадей категорий лесного фонда в связи с реформами российской системы управления лесами приведено в нашей работе [5].

Таблица

Сравнение оценок углеродных пулов в лесах России
согласно модели СВМ-CFS3 и системе РОБУЛ

Пул углерода	Ед. измерения	СВМ-CFS3	РОБУЛ
Фитомасса надземная	Гт С	28,3	24,3±1,5
	т С/га	37,8	31,7±2,0
Фитомасса подземная	Гт С	6,7	7,6±1,0
	т С/га	8,9	9,9±1,3
Итого фитомасса	Гт С	35,0	31,9±2,5
	т С/га	46,7	41,6±3,2
Мертвая древесина	Гт С	11,4	6,2±0,5
	т С/га	15,1	8,1±0,7
Подстилка	Гт С	16,4	6,0±1,2
	т С/га	21,9	7,9±1,6
Почва	Гт С	68,4	78,2±14,5
	т С/га	91,2	102,0±18,9
Итого	Гт С	131,2	122,4±18,7
	т С/га	174,9	159,5±24,4

В таблице, помимо суммарных оценок углеродных пулов лесов, содержатся их значения на единицу площади, на которых не отражается 2 % различие в оцениваемых площадях. Запас углерода в надземной фитомассе лесов России равен 37,8 т С/га согласно СВМ-CFS3 и 31,7 т С/га согласно РОБУЛ, то есть имеет место расхождение в 16 %. Оценка подземной фитомассы, наоборот, выше в РОБУЛ, чем в СВМ-CFS3 (9,9 и 8,9 т С/га соответственно). В итоге, пулы углерода фитомассы составляют по СВМ-CFS3 – 46,7, РОБУЛ – 41,7 т С/га при расхождении 11 %. Следует признать, что оценки углеродных пулов фитомассы вполне сопоставимы.

Несколько иная, на первый взгляд, ситуация складывается в отношении пулов МОВ. По пулам мёртвой древесины и подстилки оценки СВМ-CFS3 выше в 2 и 3 раза соответственно, в то время как для почвы значение РОБУЛ превышает модельное на 12 %. Причины расхождений значений пула мёртвой древесины не вполне понятны. Возможно, это обусловлено недостатком исходных данных по запасам сухостоя и валежа в лесах, использованных для построения и калибровки соответствующих процедур СВМ-CFS3 и РОБУЛ.

Различия в значениях пула углерода подстилки и почвы закономерно связаны с национальной спецификой методических подходов к выделению органических подгоризонтов подстилки и почвы. Значительная часть углерода, относимого канадскими исследователями к подстилке, российскими почвоведом учитывается в качестве компонента гумусового горизонта почвы. Суммарные оценки углерода почвы и подстилки отличаются в среднем лишь на 3 %, что значительно меньше пределов неопределённости значения РОБУЛ.

Средний запас углерода во всех пулах лесов России составил согласно СВМ-CFS3 174,9, РОБУЛ – 159,5±24,4 т С/га. Различие между оценками равно 9 % и находится в пределах неопределённости методики РОБУЛ. Результаты проведённого сравнения свидетельствуют, что СВМ-CFS3 уверенно воспроизводит значения пулов углерода в лесах Российской Федерации.

Прогноз углеродного баланса по пулу фитомассы лесов России. Баланс углерода лесов является динамическим параметром, зависящим, в числе прочих факторов, от возрастной структуры лесных насаждений. Изменение возрастной структуры (старение лесов) само по себе воздействует на величину углеродного баланса лесной террито-

рии. Потому сначала следует рассмотреть базовый прогноз, характеризующий динамику баланса углерода по пулу фитомассы при отсутствии изменений лесопользования в соответствии со

сценарием 1 (см. рис. 1). Согласно этому прогнозу (рис. 2), поглощение углерода пулом фитомассы лесов России убывает от современных 150 до 30 Мт С/год к 2050 г.

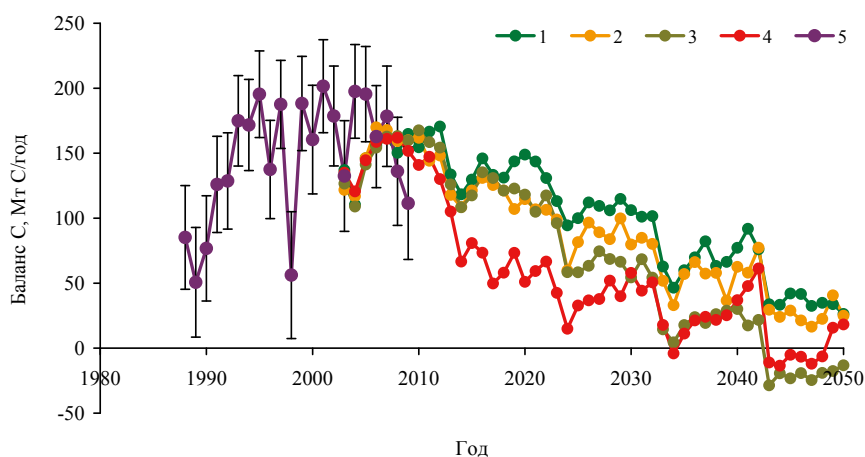


Рис. 2. Прогноз баланса углерода для пула фитомассы лесов России по модели СВМ-CFS3 в соответствии с разными сценариями лесопользования (1 — нет изменений; 2 — краткий умеренный рост; 3 — продолжительный умеренный рост; 4 — быстрый рост; 5 — ретроспективная оценка по системе РОБУЛ)

Для объяснения указанной тенденции более подробно рассмотрим механизмы, контролирующие углеродный баланс крупных лесных территорий. Леса подвержены различным нарушающим воздействиям: рубкам, лесным пожарам, вспышкам вредителей, ветровалам и так далее. Эти воздействия приводят к гибели либо деградации лесов, потерям запасов углерода и эмиссиям углекислого газа в атмосферу. Однако эти потери могут быть обратимыми. Если на вырубках, гарях и местах других нарушений начинают восстанавливаться молодые леса, с ростом биомассы происходит постепенная компенсация запасов углерода.

При постоянстве уровня нарушающих воздействий происходит адаптация совокупности лесов региона, возникает устойчивое соотношение площадей лесов различного возраста. Суммарные для региона запасы углерода лесов стабилизируются, а региональный баланс приближается к нулевому (потери с нарушениями компенсируются приростами за-

пасов углерода в молодых лесах). Если уровень нарушений со временем увеличивается, то совокупность лесов начинает терять углерод и превращается в источник углекислого газа для атмосферы. Если уровень нарушений снижается, то совокупность лесов обретает способность к поглощению дополнительных количеств углерода и становится его стоком. Таким образом, уровень нарушающих воздействий является фактором, который управляет бюджетом углерода лесов.

Уровень нарушений в лесах России существенно изменился за последние два десятилетия. Годовой объём лесозаготовок в начале 1990-х годов в связи с социально-экономическими реформами снизился с 350 до 150 млн м³. Это снижение явилось главной причиной повышения стока углерода в управляемые леса России до современных величин поглощения 150-200 Мт С/год по пулу фитомассы [6, 7]. Указанное повышение стока углерода чётко прослеживается на динамике ба-

ланса углерода по пулу фитомассы лесов России согласно РОБУЛ, для сравнения помещенной на рис. 2.

Ныне происходит адаптация лесов России к текущему уровню лесозаготовок, формируется новая возрастная структура лесов с увеличенной долей старовозрастных насаждений. Стимулирующий по отношению к стоку углерода эффект снижения лесозаготовок начинает иссякать с середины 2010-х годов, в первой половине 2040-х годов депонирование углерода фитомассой лесов России приблизится к тем же величинам, которые имели место в конце 1980-х годов.

Сценарии, предусматривающие усиление лесопользования, негативно сказываются на балансе углерода лесов России (рис. 2). По сценарию 2 (краткий умеренный рост лесозаготовок) произойдет незначительное снижение депонирования углерода пулом фитомассы в средней части прогнозного периода. Сценарий 3 (продолжительный умеренный рост) мало сказывается на углеродном бюджете в первой половине прогнозного периода, однако его влияние становится сильнее во второй половине. Именно этот сценарий приводит к наиболее мощному снижению стока углерода после 2040 г. и к конверсии фитомассы лесов России в источник углерода с уровнем потерь 20 Мт С/год. Сценарий 4 (быстрый рост лесозаготовок) вызывает резкое снижение стока углерода на старте имитации, но в конце прогнозного периода источник углерода (10 Мт С/год) оказывается меньше, чем при сценарии 3.

Приведенная на рисунке 2 ретроспективная оценка баланса углерода по пулу фитомассы лесов России, полученная в системе РОБУЛ [6, 7], свидетельствует, что близость с результатами СВМ-CFS3 сохраняется и для потоков углерода. На пересекающемся временном интервале (2003-2009 гг.) значения стока углерода в пул фитомассы составили 146 (СВМ-CFS3) и 159 ± 40 (РОБУЛ) Мт С/год, что следует признать количественным совпадением. Отсутствие сходства в динамике сравниваемых величин связано с тем, что в РОБУЛ учитывались фактические масштабы рубок и лесных пожа-

ров, обладавшие значительными межгодовыми вариациями, в то время как в СВМ-CFS3 использовались постоянные значения этих нарушений.

Прогноз баланса по всем пулам углерода лесов России. С концептуальной точки зрения, прогнозная динамика баланса по всем пулам углерода лесов России (рис. 3) близка к таковой для пула фитомассы. Средний для 2003-2009 гг. сток углерода в леса России составил согласно СВМ-CFS3 255 Мт С/год, согласно РОБУЛ – 224 ± 67 Мт С/год, что снова следует признать количественным совпадением. С середины 2010-х годов сток начинается снижаться, причем тем сильнее, чем больше рост уровня лесозаготовок. Однако конверсии лесов в источник углерода (как в случае рассмотрения лишь пула фитомассы) не происходит, даже при наиболее негативных сценариях 3 и 4 к 2050 г. сток углерода сохраняется на уровне 30-40 Мт С/год.

Отмеченные различия в прогнозе баланса по пулу фитомассы и всем пулам связаны с тем, что пулы МОВ обладают спецификой реакции на изменение режимов нарушений. Рассмотрим, к примеру, деструктивный верховой пожар в хвойном лесном насаждении. При полной гибели древостоя весь углерод выводится из пула фитомассы. Однако непосредственно в атмосферу попадает сравнительно небольшая его часть, содержащаяся в сгоревшей хвое и тонких ветвях. Углерод стволов, толстых ветвей и корней переходит в пул мертвой древесины, и лишь постепенно, по мере разложения древесных остатков, попадает в атмосферу. В этом примере четко проявляется буферная роль пулов МОВ. В этой связи не удивительно, что прогнозная динамика баланса углерода по всем пулам (рис. 3) выглядит более сглаженной, чем для пула фитомассы (см. рис. 2).

Согласно модельному прогнозу, вклад пулов МОВ в углеродный баланс лесов России будет возрастать. В 2003-2009 гг. на долю мертвой органики приходилось около 40 % стока углерода. В 2045-2050 гг. при сценарии 1 (нет изменений лесозаготовок) вклад пулов МОВ в сток углерода будет составлять 64 %. При сценариях 3 и 4 в период после 2040 г. пул фитомассы становится источником углерода, а пулы

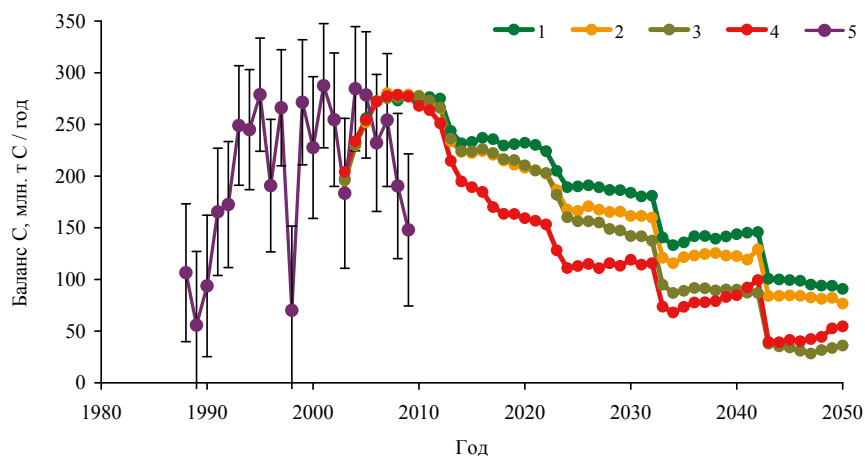


Рис. 3. Прогноз полного баланса углерода лесов России по модели СВМ-CFS3 в соответствии с разными сценариями лесопользования (1 – нет изменений; 2 – краткий умеренный рост; 3 – продолжительный умеренный рост; 4 – быстрый рост); 5 – ретроспективная оценка по системе РОБУЛ)

МОВ продолжают его депонировать, в результате леса в целом остаются стоком углерода. Эти результаты объясняются буферной ролью пулов МОВ, приводящей к запаздыванию реакции углеродного баланса лесов на изменение режимов нарушений.

Влияние уровня лесозаготовок на сток углерода в леса России. Рассмотрим прямые эффекты воздействия лесозаготовительной деятельности на углеродный баланс лесов Российской Федерации. Каждый сценарий лесопользования (см. рис. 1) будем характеризовать по среднегодовому объёму древесины, заготовленной в лесах России в период 2011-2050 гг. Для сценария 1 («нет изменений») это 151 млн м³/год, для сценариев роста лесопользования 2, 3 и 4 – соответственно 229, 337, 447 млн м³/год. Характеристику баланса углерода осуществим по среднегодовой величине его стока в фитомассу либо все пулы лесов России за период 2011-2050 гг.

При отсутствии изменений объёма лесозаготовок (сценарий 1) сток углерода в фитомассу лесов России за 2011-2050 гг. составит 93,2 МтС/год (рис. 4). Это наибольшая величина, полученная при модельном анализе сценариев лесозаготовок. Наименьшая величина сто-

ка в фитомассу (40,3 МтС/год) наблюдается при быстром росте лесопользования (сценарий 4). Для баланса по всем пулам углерода максимальная и минимальная оценки составили 173,6 и 114,6 МтС/год соответственно. Отметим, что рост лесопользования главным образом сокращает сток углерода в пул фитомассы. Сток углерода в пулы МОВ меняется в меньшей степени, что является отражением буферной функции мёртвой органики в осуществлении углеродного цикла лесных экосистем.

Для рассматриваемого временного интервала (2011-2050 гг.) можно вывести простые соотношения. Увеличение заготовки древесины в лесах России на 1 млн м³/год приводит к уменьшению стока углерода на 0,18 МтС/год в пул фитомассы и на 0,20 МтС/год во все пулы. При потенциальном развитии механизмов национального углеродного рынка, либо появления более жёсткого климатического соглашения на период после 2020 г., предложенные соотношения между ростом лесозаготовок и снижением лесных стоков углерода могут быть использованы для принятия решений по выбору национальных приоритетов управления лесами.

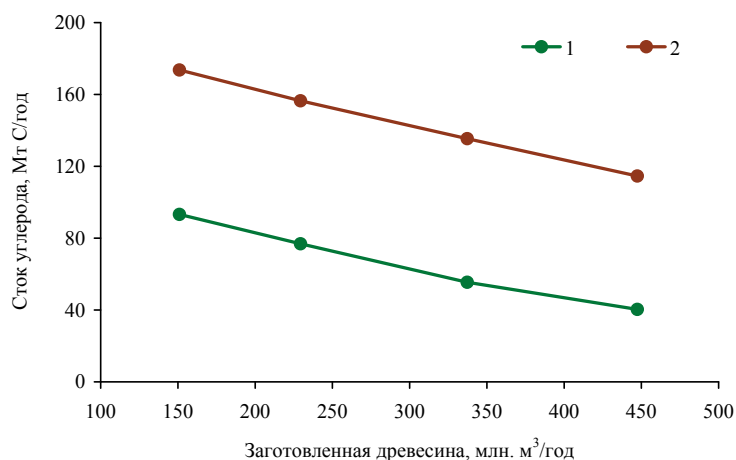


Рис. 4. Зависимость стока углерода в фитомассу (1) и все пулы (2) лесов России от годового объёма заготовленной древесины согласно оценкам CBM-CFS3

Сравнение с результатами независимых исследований. Оценка пулов и потоков углерода в лесах на различных пространственных уровнях является популярным направлением научных исследований в последние два десятилетия. По величинам углеродных пулов лесов России уже к концу 1990-х годов была достигнута высокая степень согласования результатов независимых исследований (см. обзор в книге [8]). Иная ситуация наблюдается для оценок баланса углерода в лесах России. Современные оценки стока углерода распределяются по двум диапазонам: «низкому» 100-300 Мт С/год [5-7, 19, 23, 37, 38] и «высокому» 500-700 Мт С/год [10, 11, 16, 22]. Модельные оценки, найденные при помощи CBM-CFS3, принадлежат к низкому диапазону. Впрочем, сопоставимость значений баланса углерода согласно CBM-CFS3 и системе РОБУЛ, используемой для инвентаризации бюджета парниковых газов в лесах России, была наглядно продемонстрирована выше.

Научная литература дает существенно меньше материала для сравнения прогнозных результатов, полученных в настоящей работе. В основном исследователей интересовали проблемы воздействия потенциальных климатических изменений на углеродный баланс лесов и

других наземных экосистем [2, 9, 24, 32 и др.]. Например, при помощи модели ССВФ климат-индуцированный (то есть возникший в результате действия изменений климата и атмосферной концентрации CO₂) сток углерода в леса России был оценён [24] в 116 Мт С/год для 1990 г. и 302 Мт С/год для 2020 г. По своему порядку эти значения попадают в «низкий» диапазон оценок баланса, однако напрямую сравнивать их с результатами, полученными в настоящей статье, не стоит. Наш анализ учитывает воздействие не глобального потепления, а изменений режимов лесопользования и модификаций возрастной структуры лесов.

Комбинированное рассмотрение эффектов как режимов управления лесами, так и климатических изменений обеспечивают модели, ориентированные на локальный пространственный уровень. Для примера процитируем работы, выполненные на основе известной модели EFIMOD [21, 25]. В модельном исследовании, проведенном для Мантуровского лесничества Костромской области [36] воспроизводятся постепенное снижение стока углерода в леса при отсутствии рубок, нулевые значения баланса при назначении выборочных рубок, уменьшение запасов углерода в лесах при сплошных

рубках. Добавление климатических изменений модифицирует значения баланса углерода, увеличивая пул фитомассы и снижая пулы МОВ. В концептуальном отношении цитируемые прогнозы по модели EFIMOD согласуются с представленными в настоящей работе. Отметим, что применение моделей класса EFIMOD к крупным пространственным масштабам (уровня Российской Федерации) связано с очевидными трудностями, вызванными требовательностью модели к детальности исходных данных.

Заключение

Результаты, полученные в процессе прогнозного анализа по модели CBM-CFS3, вызывают определённые опасения в отношении перспектив использования лесного хозяйства России как стока атмосферного углерода. Даже при сохранении низкого современного уровня лесопользования сток углерода будет

уменьшаться, в то время как увеличение лесозаготовок неизбежно приведёт к ускорению сокращения стока. Увеличение заготовки древесины в лесах России на 1 млн м³/год приводит к уменьшению стока углерода на 0,18 МтС/год в пул фитомассы и на 0,20 МтС/год во все пулы лесной экосистемы. Задача поддержания величин стока углерода в лесах России требует осуществления целенаправленных крупномасштабных лесохозяйственных мероприятий, примером которых могут быть усиление охраны лесов от пожаров, изменение технологий и режимов рубок, модификация подходов к искусственному лесовосстановлению.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Российского географического общества (13-05-41478 РГО_А).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакаева, З.М. Прогноз углеродного бюджета лесов Северного Кавказа по модели CBM-CFS / З.М. Бакаева, Д.Г. Замолдчиков, В.И. Грабовский // Проблемы региональной экологии. – 2009. – № 1. – С. 51-56.
2. Голубятников, Л.Л. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы / Л.Л. Голубятников, И.И. Мохов, Е.А. Денисенко, В.А. Тихонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41. – № 1. – С. 25-35.
3. Замолдчиков, Д.Г. Управление бюджетом углерода лесов Дальнего Востока России: прогнозный анализ по модели CBM-CFS / Д.Г. Замолдчиков, В.И. Грабовский, Г.Н. Коровин // Лесная таксация и лесоустройство. – 2009. – Вып. 1(41). – С. 98-103.
4. Замолдчиков, Д.Г. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области при помощи канадской модели CBM-CFS / Д.Г. Замолдчиков, В.И. Грабовский, Г.Н. Коровин, В. Курц // Лесоведение. – 2008. – № 6. – С. 3-14.
5. Замолдчиков, Д.Г. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия / Д.Г. Замолдчиков, В.И. Грабовский, Г.Н. Краев // Лесоведение. – 2011. – № 6. – С. 16-28.
6. Замолдчиков, Д.Г. Инвентаризация бюджета углерода в лесном хозяйстве России / Д.Г. Замолдчиков, В.И. Грабовский, П.П. Шуляк // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2013. – № 3. – С. 22-32.
7. Замолдчиков, Д.Г. Влияние пожаров и заготовок древесины на углеродный баланс лесов России / Д.Г. Замолдчиков, В.И. Грабовский, П.П. Шуляк, О.В. Честных // Лесоведение. – 2013. – № 5. – С. 36-49.
8. Замолдчиков, Д.Г. Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России / Д.Г. Замолдчиков, Г.Н. Коровин, А.И. Уткин, О.В. Честных, Б. Сонген. – М.: КМК, 2005. – 200 с.
9. Кокорин, А.О. Оценка влияния потепления климата и роста потока фотосинтетически активной радиации на бореальные леса / А.О. Кокорин, И.М. Назаров // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 5. – С. 44-54.

10. Моисеев, Б.Н. Баланс органического углерода в лесах и растительном покрове России / Б.Н. Моисеев // Лесное хозяйство. — 2007. — № 2. — С. 13-16.
11. Моисеев, Б.Н. Методика МГЭИК для расчета годичного депонирования углерода и оценка ее применимости для лесов России / Б.Н. Моисеев, А.Н. Филиппчук // Лесное хозяйство. — 2009. — № 4. — С. 11-13.
12. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2011 гг. Москва, 2013. Часть 1. — 421 с.
13. Общественный совет при Министерстве по природопользованию и экологии Республики Карелия обсудил ситуацию в лесной отрасли // Карелия официальная. 2013. http://www.gov.karelia.ru/gov/News/2013/12/1226_17.html.
14. Приказ Минсельхоза РФ от 04.02.2009 № 37 «Об утверждении перечня лесорастительных зон и лесных районов Российской Федерации» (Зарегистрирован в Минюсте РФ 15.04.2009 № 13764).
15. Стратегия развития лесного комплекса на период до 2020 года (утверждена приказами Министерства промышленности и торговли РФ № 248, Министерства сельского хозяйства РФ № 482 от 31 октября 2008 г.)
16. Федоров, Б.Г. Поглощающая способность лесов России и выбросы углекислого газа энергетическими объектами / Б.Г. Федоров, Б.Н. Моисеев, Ю.В. Синяк // Проблемы прогнозирования. — 2011. — № 3. — С. 127-142.
17. Vaccini, A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps / A. Vaccini, S.J. Goetz, W.S. Walker, N.T. Laporte, M. Sun, D. Sulla-Menashe, J. Hackler, P.S.A. Beck, R. Dubayah, M.A. Friedl, S. Samanta, R.A. Houghton // Nature Climate Change. — 2012. — V. 2. — P. 182-185, doi:10.1038/nclimate1354.
18. Banfield, G.E. Variability in regional scale estimates of carbon stocks in boreal forest ecosystems: results from west-central Alberta / G.E. Banfield, J.S. Bhatti, H. Jiang, M.J. Apps // Forest Ecology and Management. — 2002. — V. 169. — P. 15-27.
19. Beer, C. Small net carbon uptake by Russian forests during 1981-1999 / C. Beer, W. Lucht, C. Schmullius, A. Shvidenko // Geophysical Research Letters. — 2006. — V. 33. L15403, doi:10.1029/2006GL026919.
20. Carbon budget model. <http://www.nrcan.gc.ca/forests/climate-change/13107>.
21. Chertov, O. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels / O. Chertov, A. Komarov, A. Loukianov, A. Mikhailov, M. Nadporozhskaya, E. Zubkova // Ecological Modelling. — 2006. — V. 194. — P. 227-232.
22. Dolman, A.J. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion method / A.J. Dolman, A. Shvidenko, D. Schepaschenko, P. Ciais, N. Tchebakova, T. Chen, M.K. van der Molen, L. Beileli Marchesini, T.C. Maximov, S. Maksyutov, E.-D. Schulze // Biogeosciences. — 2012. — V. 9. — P. 5323-5340, doi:10.5194/bg-9-5323-2012.
23. Hayes, D.J. Is the northern high-latitude land-based CO₂ sink weakening? / D.J. Hayes, A.D. McGuire, D.W. Kicklighter, K.R. Gurney, T.J. Burnside, J.M. Melillo // Global Biogeochemical Cycles. — 2011. — V. 25, GB3018, doi:10.1029/2010GB003813.
24. Kokorin, A.O. The analysis of growth parameters of Russian boreal forests in warming, and its use in carbon budget / A.O. Kokorin, I.M. Nazarov // Ecological Modelling. — 1995. — V. 82. — P. 139-150.
25. Komarov, A.S. EFIMOD 2 — a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems / A.S. Komarov, O.G. Chertov, S.L. Zudin, M.A. Nadporozhskaya, A.V. Mikhailov, S.S. Bykhovets, E.V. Zudina, E.V. Zoubkova // Ecological Modelling. — 2003. — V. 170. — No 2-3. — P. 373-392.
26. Kull, S. Operational-Scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3). Version 1.2: User's Guide / S. Kull, G. Rampley, S. Morken, E.T. Metsaranta, W.A. Neilson, W.A. Kurz. — Edmonton: Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2011. — 344 p.
27. Kurz, W.A. Contribution of northern forests to the global carbon cycle: Canada as a case study / W.A. Kurz, M.J. Apps // Water, Air, and Soil Pollution. — 1993. — V. 70. — P. 163-176.

28. Kurz, W.A. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector / W.A. Kurz, S.J. Beukema, M.J. Apps // *Can. J. For. Res.* – 1996. – V. 26. – P. 1973-1979.
29. Kurz, W.A. Carbon budget implications of the transition from natural to managed disturbance regimes in forest landscapes / W.A. Kurz, S.J. Beukema, M.J. Apps // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.* – 1998. – V. 2. – P. 405-421.
30. Kurz, W.A. CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards / W.A. Kurz, C.C. Dymond, T. White, G. Stinson, C.H. Shaw, G. Rampley, C. Smyth, B.N. Simpson, E.T. Neilson, J.A. Trofymow, J. Metsaranta, M.J. Apps // *Ecological Modelling.* – 2009. – V. 220. – No 4. – P. 480-504.
31. Li, Z. Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP / Z. Li, W.A. Kurz, M.J. Apps, S.J. Beukema // *Can. J. For. Res.* – 2003. – V. 33. – P. 126-136.
32. Lucht, W. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change / W. Lucht, S. Schaphoff, T. Erbrecht, U. Heyder, W. Cramer // *Carbon Balance and Management.* – 2006. – V. 1. I. 6, doi:10.1186/1750-0680-1-6.
33. Metsaranta, J.M. Implications of future disturbance regimes on the carbon balance of Canada's managed forest (2010-2100) / J.M. Metsaranta; W.A. Kurz; E.T. Neilson; G. Stinson // *Tellus.* – 2010. – V. 62B. – P. 719-728, doi: 10.1111/j.1600-0889.2010.00487.x.
34. Pilli, R. Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995–2020 / R. Pilli, G. Grassi, W.A. Kurz, C.E. Smyth, V. Blujdea // *Ecological Modelling.* – 2013. – V. 266. – P. 144-171.
35. Price, D.T. Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal-Cordilleran forest-management unit / D.T. Price, D.H. Halliwell, M.J. Apps, W.A. Kurz, S.R. Curry // *Canadian Journal of Forest Research.* – 1997. – V. 27. – P. 2005-2016.
36. Shanin, V.N. Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes / V.N. Shanin, A.S. Komarov, A.V. Mikhailov, S.S. Bykhovets // *Ecological Modelling.* – 2011. – V. 222. – P. 2262-2275, doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.11.009.
37. Shvidenko, A. Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961-1998: an assessment based on long-term forest inventory data / A. Shvidenko, S. Nilsson // *Climatic change.* – 2002. – V. 55. – P. 5-37.
38. Shvidenko, A. A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 / A. Shvidenko, S. Nilsson // *Tellus.* – 2003. – V. 55B. – P. 391-415.
39. Stinson, G. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008 / G. Stinson, W.A. Kurz, C.E. Smyth, E.T. Neilson, C.C. Dymond, J.M. Metsaranta, C. Boisvenue, G.J. Rampley, Q. Li, T.M. White, D. Blain // *Global Change Biology.* – 2011. – V. 17. – P. 2227-2244, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x.