

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*162.5+547.45(470)

**ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ И ЗАГОТОВОК ДРЕВЕСИНЫ
НА УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС ЛЕСОВ РОССИИ***

© 2013 г. Д. Г. Замолодчиков^{1,2}, В. И. Грабовский², П. П. Шуляк², О. В. Честных¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический ф-т
119234 Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117810 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

Поступила в редакцию 01.03.2013 г.

Расширена система региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ) за счет введения процедур формального расчета неопределенностей. Осуществлены расчеты углеродного баланса лесов Российской Федерации за 1988–2009 гг. Для оценки пожарного воздействия на углеродный баланс лесов использованы как сведения официальной статистической отчетности, так и данные дистанционного зондирования. За рассматриваемый период годовой сток углерода в леса России в среднем составлял $205 \pm 64 \times 10^6$ т С год⁻¹ при вариациях от $70 \pm 81 \times 10^6$ т С год⁻¹ (1998 г.) до $287 \pm 60 \times 10^6$ т С год⁻¹ (2001 г.). Межгодовые вариации величины стока определяются динамикой потерь углерода при лесных пожарах. Рассмотрено распределение потерь углерода от лесных пожаров по субъектам Российской Федерации при оценке по данным дистанционного зондирования.

Леса России, углеродный баланс, динамика лесного фонда, фитомасса, мертвая древесина, подстилка, почва, рубки, лесные пожары, неопределенность оценки, дистанционное зондирование.

Проблема оценки углеродного баланса лесов на различных пространственных масштабах, от локального до глобального, по-прежнему остается в фокусе внимания многочисленных научных коллективов. При всей значительности предпринимаемых усилий, совершенствовании существующих и появлении новых методических подходов, единства мнений в отношении размеров стока углекислого газа атмосферы в леса пока не наблюдается. Опубликованные даже в наиболее современных работах [6, 31, 39] оценки баланса углерода в лесах России варьируют в пределах 200–700 Мт С год⁻¹, то есть различаются более чем в 3 раза. Такая ситуация в некоторой степени объясняется значительной пространственной и временной изменчивостью исследуемого процесса. Близкие по географическому положению лесные экосистемы существенно различаются по величине и даже знаку (сток или источник) годового углеродного баланса, что определяется воз-

растом древостоя, историей лесопользования, наличием воздействий, ослабляющих леса (насекомые, климатогенные усыхания, загрязнение). Межгодовые вариации углеродного баланса лесов в первую очередь связаны с динамикой нарушений, особенно лесных пожаров.

Для значительной части работ по оценкам углеродного баланса лесов регионального или национального уровня характерно использование, в той или иной степени, материалов учетов лесного фонда (ныне – лесного реестра) [3, 6, 8, 20, 31 и др.]. Масштаб усилий, направленных на проведение инвентаризации лесов России в хозяйственных целях, многократно превышал ресурсы натуральных научных исследований биопродукционного процесса в лесных экосистемах. При проведении лесоустройства обследовались десятки и сотни тысяч выделов, вся территория лесного фонда была охвачена теми или иными формами инвентаризационных работ. В сравнении с этим громадным информационным массивом блекнут достижения биопродукционного лесоведения, представленные приблизительно 4000 пробных

* Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (Соглашение № 8107) и РФФИ (11–04–01486-а).

площадей с определениями запасов фитомассы, исчерпывающий обзор которых приведен в монографии В.А. Усольцева [25]. Отсюда вполне логичным выглядит формирование методического подхода, при котором информация биопродукционных исследований используется для интерпретации материалов учета лесного фонда в терминах запасов и потоков углерода.

В России последовательное развитие такого методического подхода осуществляется авторским коллективом Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН). Основателями и идейными вдохновителями коллектива являлись акад. РАН А.С. Исаев, член-корр. РАН Г.Н. Коровин, проф. А.И. Уткин. Первая работа коллектива, опубликованная в 1993 г. [13], содержала и универсальную систему конверсионных коэффициентов для расчета запасов углерода фитомассы по объемным запасам лесных насаждений, и методику расчета прироста углерода по динамике его запасов в возрастных группах лесных насаждений. Главным генератором идей в коллективе был Г.Н. Коровин, памяти которого посвящен текущий номер “Лесоведения”. Отметим, что в то время преобладал картографический метод оценки запасов углерода в лесах и других типах экосистем, связанный с прямым распространением данных биопродукционных исследований на полигоны географических карт. Такой подход приводил к значительному завышению оценок запасов и потоков углерода в лесах [41].

Знаковой вехой в развитии работ коллектива ЦЭПЛ РАН по углеродному циклу лесов следует признать монографию “Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России” [12]. При работе над этой публикацией предметом особого интереса Г.Н. Коровина были оценки пожарного воздействия на углеродный бюджет лесов России, а также возможности увеличения депонирования углерода лесами. В монографии были применены методические подходы, связанные с расчетами земельного баланса, использованием сценариев освоения доступных земельных фондов, обсуждались проблемы формирования официальных статистических данных по лесным пожарам и возможности их коррекции в расчетах углеродного бюджета лесов.

В последующее десятилетие работа коллектива была сосредоточена на разработке подходов к оценке пулов и потоков углерода, связанных с мертвым органическим веществом в лесах [30, 33–35], рассмотрении региональной специфики углеродного цикла [26–29]. В 2005 г. вышла в

свет монография “Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России” [9], в которой была осуществлена динамическая характеристика углеродного бюджета лесов России по данным последовательных учетов лесного фонда и архивам официальных статистических материалов. Г.Н. Коровин стал инициатором перехода коллектива к рассмотрению динамической картины углеродного бюджета лесов России.

В последние годы внимание Г.Н. Коровина было в основном сфокусировано на завершении разработки модели динамики лесного фонда [15]. Модель включала блок расчета углеродного бюджета лесов, что обеспечивало возможность его прогнозирования при различных сценариях управляющих и нарушающих воздействий. Деятельность авторского коллектива по инвентаризации углеродного цикла лесов перешла в стадию практической реализации. Совокупность разработанных методик была сведена в систему региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ) [6]. Ныне РОБУЛ является базовой для сектора лесного хозяйства в Национальном кадастре парниковых газов России [22, 23]. Цель настоящей работы состоит в изложении результатов современных усилий авторского коллектива по развитию системы РОБУЛ, связанных с уточнением вклада лесных пожаров на основе данных дистанционного зондирования и формальной оценкой неопределенности расчетов углеродного бюджета лесов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Анализируемые в работе величины получены в системе РОБУЛ, ориентированной на использование в качестве исходных данных материалов Государственного лесного реестра (ГЛР). ГЛР был введен Лесным кодексом РФ [17], сменив предшествующую систему Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ). К счастью, методология формирования ГЛР и ГУЛФ мало различаются, что дает возможность восстановить согласованные ряды данных, необходимых для оценки динамики бюджета углерода в лесах. Детальные описания процедур формирования рядов данных, специфики представления учетной информации в связи с изменениями полномочий по управлению лесами и динамики учетных категорий лесного фонда приведены в нашей работе [6]. В табл. 1 представлены обобщенные данные по площадям земель лесного фонда по состоянию на 1988, 1993, 1998, 2003 и 2008 гг. Обсуждаемые в настоящей статье оценки РОБУЛ относятся к категории “покрытые

Таблица 1. Динамика структуры земель лесного фонда Российской Федерации согласно государственным учетам лесного фонда (1998, 1993, 1998, 2003 гг.) и государственному лесному реестру (2008 г.)

Категория земель	Площадь, 10 ³ га				
	1988 г.	1993 г.	1998 г.	2003 г.	2008 г.
Покрытые лесом земли	758715.7	750953.1	763826.0	767473.6	787147.8
в том числе					
хвойные	546041.4	527645.8	528621.8	527359.0	538429.3
твердолиственные	18096.1	18285.8	18497.5	18676.5	18787.5
мягколиственные	132223.4	135754.9	142255.7	146949.9	151818.0
прочие породы и кустарники	62354.8	69266.6	74451.0	74488.2	78113.0
Не покрытые лесом земли	111731.0	121075.8	106576.1	105858.5	93344.1
в том числе					
редины	63457.5	75279.5	70094.5	69720.9	61544.2
гари и погибшие насаждения	30081.9	28652.2	25161.2	27300.3	23402.0
вырубки	8876.0	8849.0	5126.2	3732.4	3868.6
Нелесные земли	299053.2	292131.3	293844.3	294194.4	288983.1
в том числе					
сенокосы и пастбища	20579.9	20147.4	19785.7	19892.0	13847.6
болота и прочие земли	254448.0	249556.6	251453.8	251245.5	252632.0
Все земли	1169499.9	1164160.2	1164246.4	1167526.5	1169475.0

лесом земли”, площадь которой увеличилась от 758.7×10^6 га в 1988 г. до 787.1×10^6 га в 2008 г.

В полном виде совокупность уравнений РОБУЛ опубликована в работе [6], на веб-сайте ЦЭПЛ РАН в свободном доступе представлено программное обеспечение системы [7]. В настоящей статье ограничимся лишь общей характеристикой схемы расчетов, но при этом приведем табличные значения параметров уравнений РОБУЛ. Ранее эти таблицы были разбросаны по разным публикациям [5, 10, 33, 35], причем для конверсионных коэффициентов фитомассы и мертвой древесины не были опубликованы величины неопределенностей.

Начальная часть расчетов по методике РОБУЛ состоит в оценке запасов углерода для возрастных групп лесных насаждений в дифференциации по преобладающим породам. Расчет запасов углерода в пулах фитомассы и мертвой древесины проводится на основе данных по объемным запасам стволовой древесины из материалов ГЛР либо ГУЛФ с применением соответствующих конверсионных коэффициентов (табл. 2 и 3). Расчет запасов углерода в пулах подстилки и почвы проводится на основании сведений о площадях насаждений лесообразующих пород из ГЛР либо ГУЛФ с применением эталонных средних значений (табл. 4 и 5). Получение оценок запасов углерода в разрезе групп возраста насаждений обеспечивает возможность расчета углеродных

приростов по всем пулам с применением информации о продолжительности возрастных групп. Применение сведений о годичных масштабах деструктивных нарушений (рубки, лесные пожары, прочие причины гибели лесных насаждений) к найденным запасам углерода в различных категориях лесных насаждений дает оценку годовых потерь углерода.

Оценка неопределенности в настоящей работе базируется на стандартной ошибке среднего значения. Для параметров, рассчитанных по выборкам натуральных данных (табл. 2, 4 и 5), она равна:

$$SE = \frac{STD}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где SE – стандартная ошибка среднего, STD – среднеквадратичное отклонение, n – размер выборки.

Конверсионные коэффициенты для мертвой древесины найдены по модели формирования пула крупных древесных остатков [5]. Расчет неопределенности коэффициентов основан на сравнении модельных значений с величинами независимых натуральных определений (общим числом 35). Сначала найдена сумма квадратов отклонений натуральных от модельных значений, затем рассчитано среднеквадратичное отклонение натурального от модельного значения, далее на его основе – величина, аналогичная стандартной ошибке среднего. В относительном выражении к средней модельной

Таблица 2. Коэффициенты конверсии объемного запаса насаждений в углерод фитомассы древостоя ($t C m^{-3}$) по группам возраста преобладающих древесных пород России [по 10]

Преобладающая порода	Полоса	Группа возраста			
		молодняки I и II класса возраста	средне-возрастные	приспевающие	спелые и перестойные
Сосна	1	0.469±0.059	0.347±0.012	0.369±0.023	0.331±0.012
	2	0.397±0.039	0.323±0.009	0.358±0.026	0.323±0.014
	3	0.434±0.023	0.352±0.013	0.329±0.011	0.356±0.012
Ель	1	0.468±0.034	0.387±0.019	0.381±0.019	0.375±0.020
	2	0.468±0.034	0.370±0.019	0.343±0.013	0.341±0.015
	3	0.614±0.118	0.368±0.037	0.351±0.019	0.364±0.013
Пихта	1–3	0.420±0.056	0.308±0.020	0.283±0.017	0.269±0.018
Лиственница	1	0.523±0.083	0.423±0.023	0.450±0.023	0.478±0.022
	2	0.405±0.083	0.418±0.037	0.434±0.056	0.403±0.029
	3	0.392±0.043	0.371±0.056	0.398±0.050	0.398±0.050
Кедр	1–3	0.391±0.037	0.341±0.029	0.318±0.027	0.450±0.027
Дуб высокоствольный	1–3	0.616±0.069	0.490±0.030	0.418±0.040	0.478±0.060
Дуб низкоствольный	1–3	0.795±0.052	0.541±0.066	0.563±0.154	0.636±0.178
Каменная береза	1–3	0.795±0.052	0.541±0.066	0.563±0.154	0.636±0.178
Прочие твердолиственные	1–3	0.624±0.100	0.477±0.029	0.388±0.039	0.436±0.030
Береза	1	0.461±0.080	0.409±0.060	0.408±0.052	0.422±0.044
	2	0.461±0.080	0.437±0.038	0.382±0.027	0.369±0.022
	3	0.437±0.023	0.396±0.012	0.367±0.017	0.367±0.023
Осина, тополь	1–3	0.356±0.055	0.363±0.044	0.334±0.059	0.365±0.060
Прочие мягколиственные	1–3	0.381±0.038	0.336±0.023	0.334±0.026	0.337±0.016
Кедровый стланик	1–3	0.699±0.149	0.766±0.161	0.832±0.173	0.999±0.203

Примечание. В табл. 2–5 обозначения полос: 1 – северная (северные редколесья и северная тайга); 2 – средняя (средняя тайга); 3 – южная (южная тайга и более южные географические зоны).

оценке она оказалась равной 8.1%. Это значение использовано в качестве меры неопределенности любого коэффициента табл. 3.

Для расчета суммарных неопределенностей совокупность уравнений РОБУЛ [6] была модифицирована следующим образом: 1) значения параметров уравнений заменены на значения неопределенностей (табл. 2–5); 2) разности в уравнениях заменены суммами. Замена разностей суммами определяется правилами преобразования погрешностей, согласно которым погрешности складываются как для сумм, так и для разностей случайных величин. Проведенная модификация предполагает, что неопределенности величин площадей и запасов древесины в ГУЛФ и ГЛР, времени пребывания насаждений в возрастных группах, годовых темпов деструктивных нарушений равны нулю. Добавим, что выбранная мера неопределенности (стандартная ошибка среднего) приблизительно соответствует 68%-ному доверительному интервалу. Для получения 95%-ного доверительного интервала приводимые

в статье неопределенности следует умножить на 1.65.

Оценка потерь углерода в РОБУЛ может осуществляться в двух модификациях [6]: 1) по площадям гарей и вырубок с учетом времени их зарастания; 2) по текущим величинам пройденной огнем площади и масштабам рубок. В настоящей работе применена вторая модификация в двух вариантах. Первый вариант расчета использует официальные статистические сведения по пройденной огнем покрытой лесом площади за 1988–2009 гг., имеющиеся в информационных архивах ЦЭПЛ РАН. Второй вариант базируется на массиве спутниковых данных по лесным пожарам, сформированном в Информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ Рослесхоз). ЦЭПЛ РАН совместно с Институтом космических исследований РАН участвовал в разработке, а ныне осуществляет сопровождение ИСДМ Рослесхоз [1]. Оба варианта расчета используют официальные статистические данные по площа-

Таблица 3. Коэффициенты конверсии объемного запаса насаждений в углерод мертвой древесины ($t C m^{-3}$) по группам возраста преобладающих древесных пород России [по 5]

Преобладающая порода	Полоса	Группа возраста						спелые	перестойные
		молодняки I класса возраста	молодняки II клас- са возраста	средне-возраст- ные	приспевающие	спелые	перестойные		
Сосна	1	0.078±0.006	0.106±0.009	0.110±0.009	0.105±0.009	0.094±0.008	0.058±0.005		
	2	0.067±0.005	0.096±0.008	0.114±0.009	0.112±0.009	0.098±0.008	0.064±0.005		
	3	0.063±0.005	0.089±0.007	0.117±0.010	0.118±0.010	0.108±0.009	0.076±0.006		
Ель	1	0.033±0.003	0.098±0.008	0.153±0.012	0.154±0.013	0.071±0.006	0.070±0.006		
	2	0.029±0.002	0.087±0.007	0.144±0.012	0.159±0.013	0.080±0.007	0.072±0.006		
	3	0.035±0.003	0.101±0.008	0.114±0.009	0.144±0.012	0.096±0.008	0.097±0.008		
Пихта	1-3	0.025±0.002	0.073±0.006	0.090±0.007	0.112±0.009	0.075±0.006	0.061±0.005		
	1	0.027±0.002	0.064±0.005	0.111±0.009	0.111±0.009	0.068±0.006	0.074±0.006		
	2	0.024±0.002	0.043±0.004	0.111±0.009	0.124±0.010	0.064±0.005	0.071±0.006		
Кедр	3	0.025±0.002	0.040±0.003	0.082±0.007	0.105±0.009	0.071±0.006	0.074±0.006		
	1-3	0.153±0.012	0.119±0.010	0.043±0.003	0.032±0.003	0.030±0.002	0.030±0.002		
	1-3	0.034±0.003	0.039±0.003	0.033±0.003	0.035±0.003	0.027±0.002	0.026±0.002		
Дуб высокоствольный	1-3	0.020±0.002	0.031±0.003	0.057±0.005	0.072±0.006	0.060±0.005	0.065±0.005		
	1-3	0.018±0.001	0.024±0.002	0.030±0.002	0.028±0.002	0.009±0.001	0.018±0.002		
	1-3	0.033±0.003	0.068±0.006	0.053±0.004	0.052±0.004	0.015±0.001	0.016±0.001		
Прочие твердолиствен- ные Береза	1	0.024±0.002	0.047±0.004	0.074±0.006	0.069±0.006	0.046±0.004	0.057±0.005		
	2	0.025±0.002	0.038±0.003	0.071±0.006	0.064±0.005	0.035±0.003	0.045±0.004		
	3	0.022±0.002	0.035±0.003	0.066±0.005	0.067±0.005	0.040±0.003	0.045±0.004		
Осина, тополь	1-3	0.022±0.002	0.058±0.005	0.078±0.006	0.075±0.006	0.030±0.002	0.032±0.003		
	1-3	0.020±0.002	0.056±0.005	0.058±0.005	0.058±0.005	0.033±0.003	0.035±0.003		
	1-3	0.012±0.001	0.015±0.001	0.044±0.004	0.051±0.004	0.068±0.006	0.072±0.006		

Таблица 4. Типовые средние значения углерода подстилки в старших возрастных группах лесных насаждений России [по 35].

Преобладающая порода	Полоса	Макрорегион			
		1	2	3	4
Сосна	1	13.8±2.0	3.2±1.9	8.5±4.6	2.1±0.3
	2	17.2±3.9	24.2±5.2	5.2±1.8	5.2±1.8
	3	9.0±0.7	7.7±0.4	6.6±1.3	6.6±1.3
Ель	1	15.7±2.0	15.4±7.8	15.4±7.8	15.4±7.8
	2	10.6±1.4	10.6±1.4	10.6±1.4	9.4±0.4
	3	10.9±1.6	8.9±0.8	9.9±5.4	6.5±0.3
Пихта	1–2	4.4±0.7	4.4±0.7	4.4±0.7	4.4±0.7
	3	6.2±0.7	6.2±0.7	6.2±0.7	6.2±0.7
Лиственница	1	16.5±0.2	16.5±0.2	12.8±4.3	5.9±0.9
	2	7.3±0.9	7.3±0.9	7.3±0.9	7.3±0.9
	3	5.5±0.5	5.5±0.5	5.5±0.5	5.5±0.5
Кедр	1	6.7±1.3	6.7±1.3	6.7±1.3	2.1±0.5
	2	8.6±1.8	8.6±1.8	8.6±1.8	8.6±1.8
	3	3.4±1.0	3.4±1.0	3.4±1.0	4.8±1.6
Твердолиственные Береза	1–3	5.4±0.5	5.4±0.5	5.4±0.5	4.7±0.0
	1	19.8±4.2	3.7±1.3	3.7±1.3	3.7±1.3
	2	13.6±0.1	3.3±1.0	3.3±1.0	3.3±1.0
Осина	3	6.2±1.4	6.2±1.4	2.9±1.1	6.5±0.9
	1–2	10.3±9.6	10.3±9.6	10.3±9.6	10.3±9.6
	3	4.9±3.6	4.9±3.6	2.6±0.6	2.6±0.6
Прочие мягколиственные	1–2	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4
	3	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4
Кедровый стланик	1–3	2.0±0.7	2.0±0.7	2.0±0.7	2.0±0.7

Примечание. В табл. 4 и 5 обозначения макрорегионов: 1 – Европейско-Уральская часть; 2 – Западная Сибирь; 3 – Восточная Сибирь; 4 – Дальний Восток.

Таблица 5. Типовые средние значения углерода почвы в слое 0–30 см в старших возрастных группах лесных насаждений России [по 34].

Преобладающая порода	Полоса	Макрорегион			
		1	2	3	4
Сосна	1	13.8±2.0	3.2±1.9	8.5±4.6	2.1±0.3
	2	17.2±3.9	24.2±5.2	5.2±1.8	5.2±1.8
	3	9.0±0.7	7.7±0.4	6.6±1.3	6.6±1.3
Ель	1	15.7±2.0	15.4±7.8	15.4±7.8	15.4±7.8
	2	10.6±1.4	10.6±1.4	10.6±1.4	9.4±0.4
	3	10.9±1.6	8.9±0.8	9.9±5.4	6.5±0.3
Пихта	1–2	4.4±0.7	4.4±0.7	4.4±0.7	4.4±0.7
	3	6.2±0.7	6.2±0.7	6.2±0.7	6.2±0.7
Лиственница	1	16.5±0.2	16.5±0.2	12.8±4.3	5.9±0.9
	2	7.3±0.9	7.3±0.9	7.3±0.9	7.3±0.9
	3	5.5±0.5	5.5±0.5	5.5±0.5	5.5±0.5
Кедр	1	6.7±1.3	6.7±1.3	6.7±1.3	2.1±0.5
	2	8.6±1.8	8.6±1.8	8.6±1.8	8.6±1.8
	3	3.4±1.0	3.4±1.0	3.4±1.0	4.8±1.6
Твердолиственные Береза	1–3	5.4±0.5	5.4±0.5	5.4±0.5	4.7±0.0
	1	19.8±4.2	3.7±1.3	3.7±1.3	3.7±1.3
	2	13.6±0.1	3.3±1.0	3.3±1.0	3.3±1.0
Осина	3	6.2±1.4	6.2±1.4	2.9±1.1	6.5±0.9
	1–2	10.3±9.6	10.3±9.6	10.3±9.6	10.3±9.6
	3	4.9±3.6	4.9±3.6	2.6±0.6	2.6±0.6
Прочие мягколиственные	1–2	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4
	3	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4	6.7±1.4
Кедровый стланик	1–3	2.0±0.7	2.0±0.7	2.0±0.7	2.0±0.7

дям сплошных рубок за 1988–2009 гг. из информационных архивов ЦЭПЛ РАН.

Расчеты бюджета углерода лесов осуществлены в дифференциации по субъектам Российской Федерации для 1988–2009 гг. при использовании официальной отчетности по пожарам и для 2002–2009 гг. при использовании данных ИСДМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многочисленными модельными исследованиями [43, 45, 46 и др.] показано, что масштабы нарушений лесного покрова (рубки, пожары, вспышки вредителей и др.) являются ключевыми факторами, определяющими величину и знак углеродного баланса лесных территорий. Такая ситуация вполне очевидна. При деструктивных нарушениях потери углерода в расчете на единицу площади многократно превышают приросты углерода на окружающих территориях, где леса продолжают существовать. К примеру, при сплошной рубке из леса вывозится такое количество углерода фитомассы, которое сможет восстановиться в данном месте примерно через 100 лет. Рассматривая эту картину в пространственном отношении, получим, что сплошная рубка приводит к потерям углерода, по величине эквивалентным приростам углерода в лесах, растущих на территории в 100 раз большей площади рубки. При деструктивных лесных пожарах, вспышках вредителей, ветроваллах и т. д. изменения углеродного цикла имеют более сложный характер. Прямые потери (эмиссии в атмосферу) здесь относительно невелики, а углерод фитомассы переходит в пул мертвой древесины, представляющий собой буфер на пути углерода в атмосферу. Эмиссии от разложения мертвой древесины на долгие годы превращают нарушенный участок в источник углерода для атмосферы. Проведение санитарных рубок либо расчисток территории при лесовосстановлении уменьшает сроки пребывания углерода в пуле мертвой древесины после нарушений.

Пребывание углерода в буферном пуле мертвой древесины усложняет картину модификации углеродного цикла лесов при нарушениях, однако не изменяет общего правила: наличие деструктивных нарушений с годовым уровнем порядка 1% и выше от общей площади лесного покрова является важнейшим фактором, контролирующим величину и знак углеродного баланса лесной территории. Отсюда вытекает значимость корректного учета масштабов нарушений при построении региональных балансов углерода лесов.

Для лесов Российской Федерации наиболее масштабные нарушения связаны с рубками и лесными пожарами. В конце 1980-х годов ежегодная площадь сплошных рубок в России составляла около 2.0×10^6 га год⁻¹ (рис. 1). Социально-экономические реформы начала 1990-х годов привели к резкому снижению площадей рубок вплоть до минимума 0.5×10^6 га год⁻¹ в 1998 г. С середины 2000-х годов наблюдалось постепенное возрастание масштабов рубок до 1.2×10^6 га год⁻¹ к 2009 г. Обсуждаемые величины характеризуют легально осуществляемые заготовки в лесах России. По различным оценкам, нелегально заготавливается 10–25% общего объема древесины [24]. Подавляющая часть нелегальных заготовок представлена маломасштабными, преимущественно выборочными рубками, осуществляемыми местным населением [21], иначе говоря, не может быть отнесена к деструктивным нарушениям лесного покрова. Отметим, что уровень недеструктивных нарушений лесного покрова, как рубок, так и пожаров, сказывается на динамике средних запасов древесины в возрастных группах лесных насаждений данного лесного региона. Поскольку расчет поглощения углерода в системе РОБУЛ базируется на этой динамике, оценка итогового баланса учитывает вклад недеструктивных нарушений.

Официальная статистическая отчетность по площадям сплошных рубок предоставляет достаточно объективную информацию, которую можно использовать в расчетах углеродного бюджета лесов. Иная ситуация складывается с пожарной статистикой. С начала 2000-х годов стали появляться работы с оценками площадей лесных пожаров в России [38, 49, 50 и др.], выполненных на основе спутниковой информации. Эти оценки в несколько раз превышали официальные статистические данные по пожарам. Такая ситуация сохраняется и поныне [36].

В этом контексте не удивительно, что площади лесных пожаров согласно статистике за 2002–2009 гг. составляют в среднем лишь 34.3% от значений согласно ИСДМ (рис. 1). Впрочем, нормативы формирования официальных статистических данных изначально не ставят целью охват всех лесных пожаров. В лесном фонде выделена зона космического мониторинга, в которой тушение лесных пожаров производится лишь при наличии угрозы объектам инфраструктуры (ранее эти территории называли неохраняемой от пожаров частью лесного фонда) [1]. Сведения о масштабах пожаров в этой зоне, ныне формируемые в ИСДМ, до сих пор не входят в официальную статистическую отчетность.

Многочисленные расхождения официальных и спутниковых сведений о масштабах лесных пожаров в России создают серьезную проблему при построении оценок углеродного баланса. В нашей предшествующей работе [6] при осуществлении расчета баланса по статистическим данным о лесных пожарах было сделано допущение, что все эти пожары являются деструктивными, то есть приводящими к гибели лесных насаждений. На самом деле низовые лесные пожары слабой и средней степени, как правило, не являются деструктивными. Однако именно такое, вроде бы заведомо неправильное, допущение позволило получить величины баланса углерода лесов России, согласующиеся с вариантом расчета по площадям гарей из учетов лесного фонда. Сведения рис. 1, а также значение доли деструктивных пожаров, согласно ИСДМ равное 0.355, подтверждают корректность сделанного допущения. Реальная площадь лесных пожаров примерно в 3 раза выше, чем статистическая оценка, однако лишь треть из них является деструктивными. Поэтому сведения официальной статистики действительно можно использовать в качестве приближенной оценки площади деструктивных лесных пожаров. Необходимость такого использования связана с задачей ретроспективной оценки углеродного баланса лесов России в тот период, когда методы спутникового мониторинга лесных пожаров еще не были разработаны.

На рис. 2 представлена динамика ключевых потоков углерода в лесах России за 1988–2009 гг. Расчет потерь углерода от деструктивных лесных пожаров осуществлен по данным официальной отчетности с применением охарактеризованного выше допущения. Уточним, что поглощение представляет собой текущий прирост углерода во всех пулах лесной экосистемы (фитомасса, мертвая древесина, подстилка, слой почвы 0–30 см). В работе [11] по отношению текущему приросту углерода фитомассы использовался термин “депонирование”. Поглощение углерода лесами России в среднем за 1988–2009 гг. составляло $378 \pm 48 \times 10^6$ т С год⁻¹. Можно отметить некоторую тенденцию к увеличению поглощения углерода с $353 \pm 44 \times 10^6$ т С год⁻¹ в 1988 г. до $397 \pm 50 \times 10^6$ т С год⁻¹ в 2003 г. с последующей стабилизацией. Эту тенденцию можно связать с увеличением площади покрытых лесом земель (табл. 1), в свою очередь вызванным уменьшением масштабов лесозаготовок (рис. 1).

В отличие от поглощения, потери углерода лесами обладают выраженной межгодовой изменчивостью (рис. 2). Для начала 1990-х годов

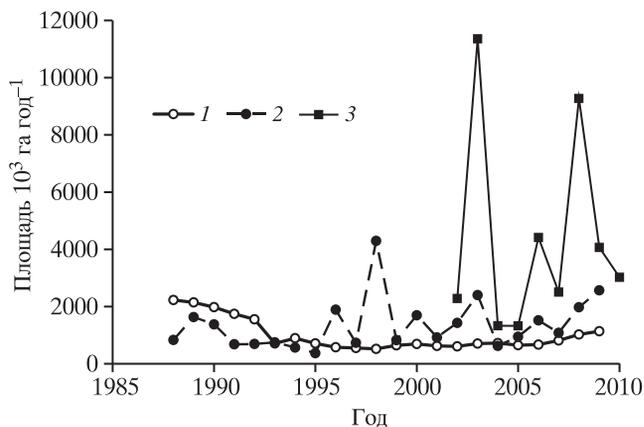


Рис. 1. Динамика ключевых нарушений в лесах Российской Федерации: 1 – площадь сплошных рубок; 2 – площадь лесных пожаров согласно лесохозяйственной статистике; 3 – площадь лесных пожаров по ИСДМ.

характерна тенденция к уменьшению потерь углерода (с $297 \pm 27 \times 10^6$ т С год⁻¹ в 1989 г. до $89 \pm 8 \times 10^6$ т С год⁻¹ в 1995 г.), затем последовала стабилизация на уровне около 150×10^6 т С год⁻¹ с ярко выраженной межгодовой изменчивостью, после 2005 г. наблюдается тенденция к росту потерь вплоть до $241 \pm 24 \times 10^6$ т С год⁻¹ в 2009 г. Причины такой динамики очевидны из рис. 1. Снижение масштабов лесозаготовок уменьшило потери углерода в начале 1990-х годов, высокая межгодовая вариабельность пожаров вызвала изменчивость значений потерь в 1996–2005 гг., рост лесозаготовок с одновременной активизацией пожаров привел к увеличению потерь углерода после 2005 г. В среднем за 1988–2009 гг. потери углерода в лесах России от деструктивных нарушений составляли $174 \pm 17 \times 10^6$ т С год⁻¹ из которых $90 \pm 8 \times 10^6$ т С год⁻¹ (52%) приходилось на сплошные рубки, а $84 \pm 9 \times 10^6$ (48%) – на лесные пожары.

Поскольку поглощение углерода лесами характеризуется относительной стабильностью, тенденции изменения и межгодовые вариации баланса углерода в основном определяются динамикой потерь углерода (рис. 2). В среднем за 1988–2009 гг. сток атмосферного углерода в леса России равен $205 \pm 64 \times 10^6$ т С год⁻¹. Напомним, что баланс углерода рассчитывается по разности поглощения и потерь. Расчет по разности увеличивает неопределенность балансовой оценки, составляющей в относительном выражении 31% при 16% для поглощения и 9% для потерь. Отличия от 0 минимальных значений стока углерода, имевших место в 1989 и 1998 гг., следует признать статистически недостоверными.

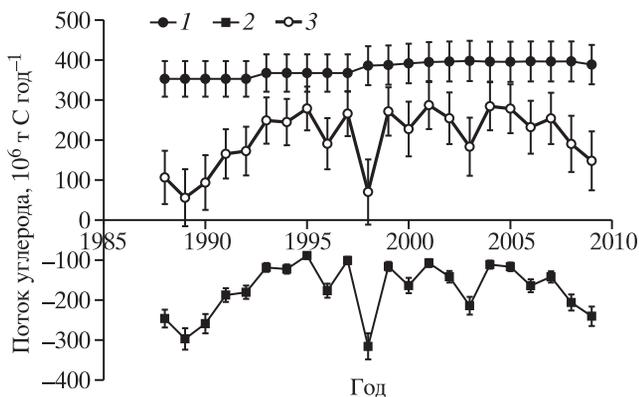


Рис. 2. Динамика поглощения (1), суммарных потерь (2) и баланса (3) углерода в лесах Российской Федерации.

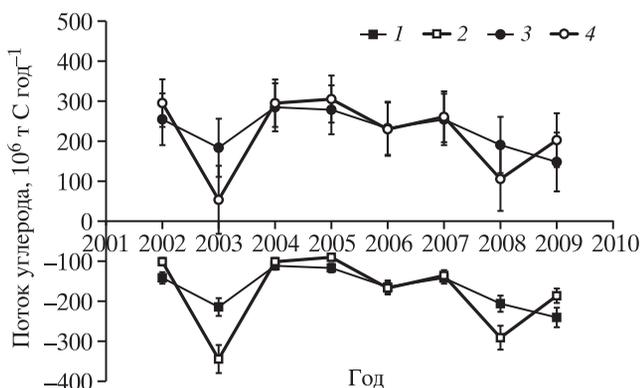


Рис. 3. Динамика суммарных потерь (1, 2) и баланса (3, 4) углерода в лесах Российской Федерации при оценке площадей пожаров по сведениям лесохозяйственной статистики (1, 3) и ИСДМ (2, 4).

Рис. 3 демонстрирует сравнение результатов расчета потерь и баланса углерода в лесах России с использованием статистических и спутниковых сведений по пожарам. Очевидное сходство результатов не является удивительным. Как отмечалось выше, площади деструктивных пожаров по дистанционным данным близки к суммарным величинам пройденной огнем площади согласно официальной отчетности. Поэтому и результаты расчета потерь и баланса углерода оказываются сходными. Отметим, что оценка по спутниковым данным дает несколько большую величину потерь для лет с повышенной интенсивностью пожаров. В такие годы расхождение между спутниковыми данными и официальной отчетностью увеличивается. Согласно расчету по спутниковым сведениям о лесных пожарах, сток углерода в леса России в среднем за 2002–2009 гг. составлял $218 \pm 68 \times 10^6 \text{ т С год}^{-1}$.

Расчеты РОБУЛ, обсуждаемые в настоящей работе, проведены в дифференциации по субъектам Российской Федерации. Это дает возможность рас-

смотреть особенности пространственного распределения потерь углерода от деструктивных лесных пожаров при использовании спутниковых данных. Средние потери на единицу покрытой лесом площади преобладают в южных регионах России, от Краснодарского края и Ростовской обл. на западе до Приморского края и Амурской обл. на востоке (рис. 4, А). Такая картина, с одной стороны, связана с большей суровостью пожароопасных ситуаций в южных регионах по причине более аридного климата, с другой, с большей плотностью населения, увеличивающей вероятность возникновения пожаров. Более четкое представление об абсолютных величинах потерь углерода дает рис. 4, Б, где средние потери представлены в расчете на общую площадь субъекта РФ. Потери максимальны в южных регионах Сибири и Дальнего Востока. Потери в расчете на площадь субъекта РФ оказываются невелики в южных регионах Европейской России в связи с их низкой лесистостью.

Распределение средних величин баланса углерода в расчете на покрытую лесом площадь субъекта РФ представлено на рис. 5. Максимальные величины стока углерода в леса приурочены к средней полосе Европейской России. В этом регионе в 1960–1970-х годах имели место масштабные заготовки древесины. Леса, сформировавшиеся на месте образовавшихся вырубок, к настоящему времени находятся в возрасте максимального поглощения углерода. Леса южных частей Европейской России, Западной Сибири и Дальнего Востока являются источником углерода для атмосферы, что связано с мощным воздействием лесных пожаров. Для лесов севера Европейской России, севера и центра Сибири и Дальнего Востока характерен слабый сток углерода.

Вопросы оценки углеродного бюджета территории России в целом и лесного покрова в частности продолжают оставаться в центре внимания отечественных и зарубежных исследовательских коллективов. За последнее десятилетие было опубликовано значительное число работ [16, 19, 39, 42 и др.], в которых реализуются разнообразные методические подходы – от оценки по разности чистой первичной продукции (*NPP*) с гетеротрофным дыханием и потерями от нарушений до инверсионных расчетов по динамике атмосферных концентраций углекислого газа. Растет и количество публикаций по углеродному балансу отдельных регионов России [2, 3, 14, 44 и др.]. При всем обилии имеющейся информации сосредоточимся на сравнении наших результатов с данными двух других исследовательских коллективов, известных сериями своих работ по углеродному бюджету лесов России.

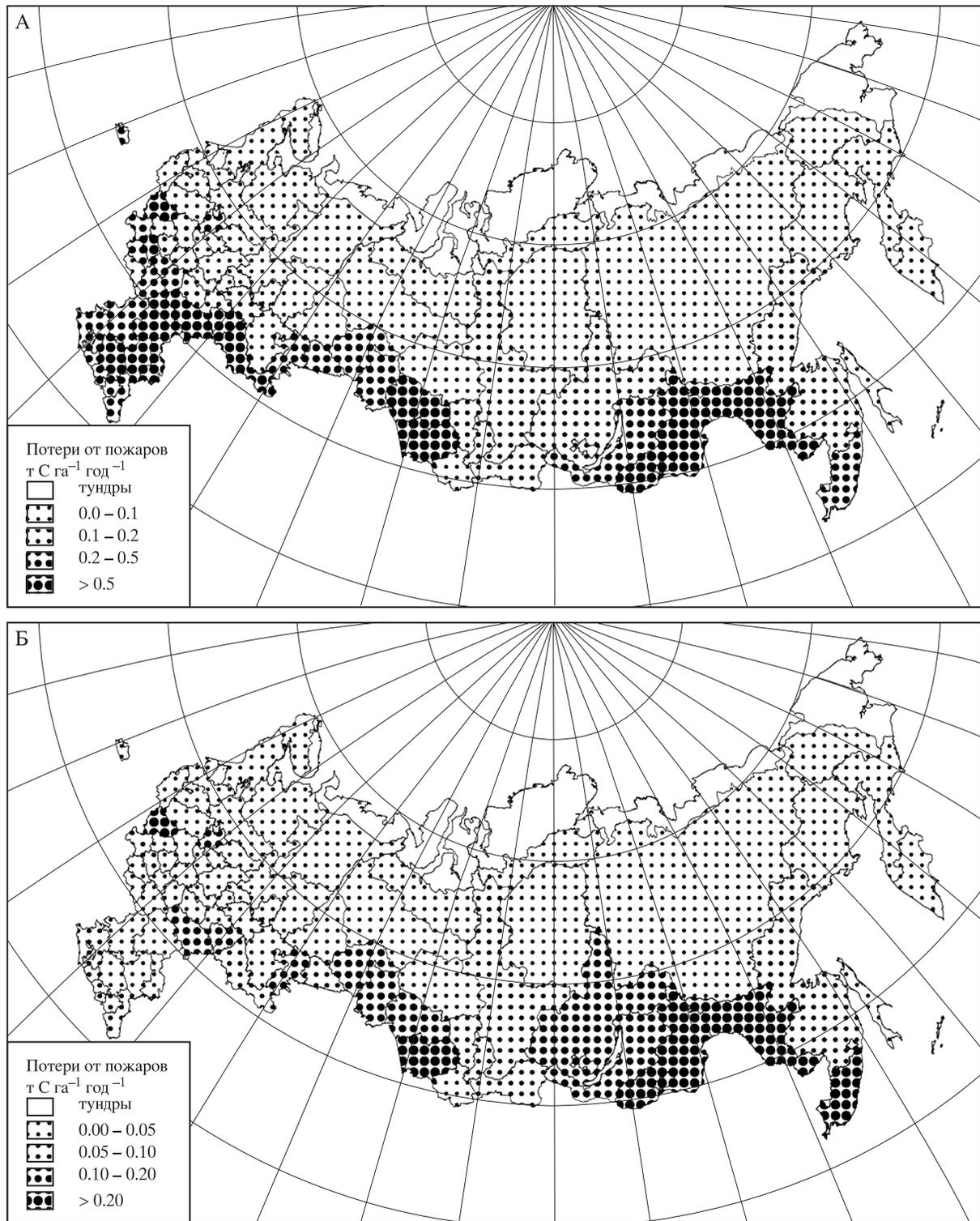


Рис. 4. Распределение средних величин потерь углерода от деструктивных лесных пожаров за 2002–2009 гг. в расчете на покрытую лесом (А) и общую (Б) площадь субъекта Российской Федерации.

В ранних работах коллектива Международного института прикладного системного анализа (IIASA, Австрия) сток углерода в леса России оценивался в $210 \pm 30 \times 10^6$ т С год⁻¹ [47], 268 ± 94 и $272 \pm 68 \times 10^6$ т С год⁻¹ [48], что перекрывается

в границах неопределенности с результатами нашей работы. Дальнейшие усилия коллектива сначала привели к увеличению оценки *NPP* за счет учета вклада тонких корней [37], а затем и величины стока углерода в леса России, составившей

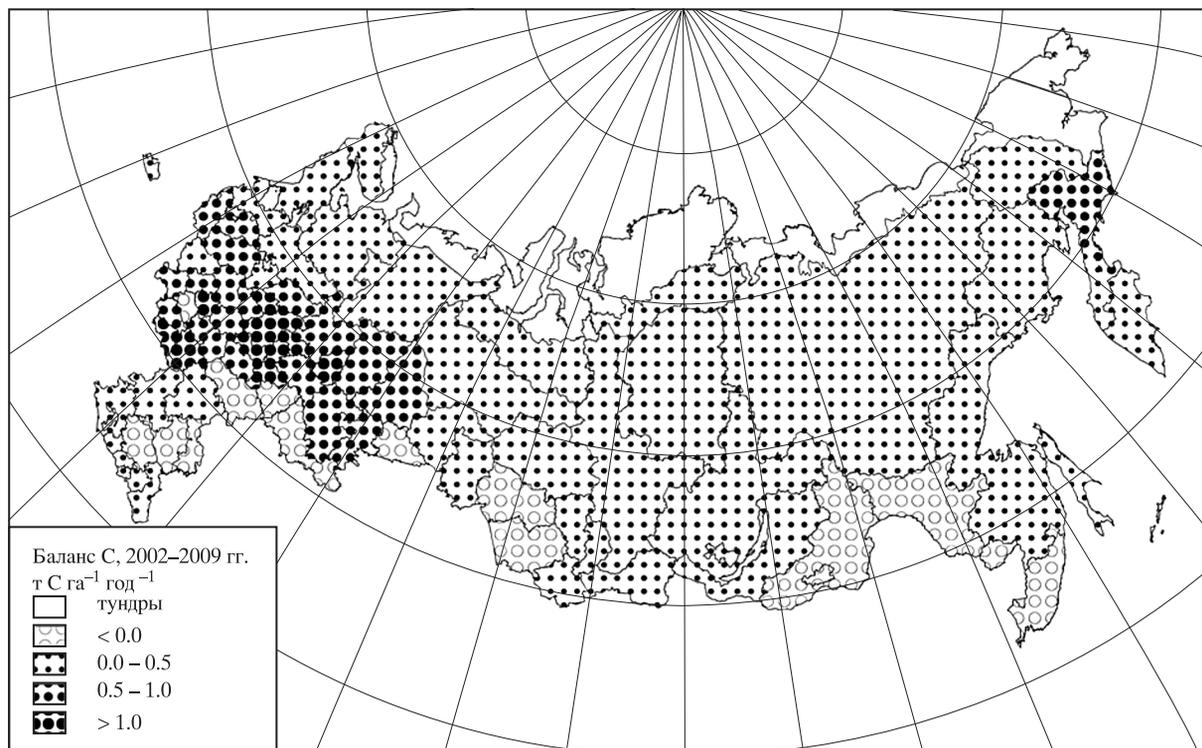


Рис. 5. Распределение средних величин баланса углерода лесов за 2002–2009 гг. в расчете на покрытую лесом площадь субъекта Российской Федерации.

$692 \pm 175 \times 10^6$ т С год⁻¹ [39]. Это значение формируется из разности NPP (2610×10^6 т С год⁻¹) с гетеротрофным дыханием (1637×10^6 т С год⁻¹) и суммой потерь от различных нарушений (281×10^6 т С год⁻¹). Согласно авторской оценке по методу Монте-Карло, неопределенность величины NPP равна 5%, гетеротрофного дыхания – 10%. Альтернативная оценка неопределенности с помощью статистических распределений [40] на той же информационной базе ИАСА дала более высокие значения: 14% для NPP , 24% для гетеротрофного дыхания и 100% (!) для баланса углерода. С учетом обсуждавшегося выше эффекта возрастания неопределенности для величины, оцениваемой по разности двух случайных величин, альтернативная оценка неопределенности выглядит достаточно убедительной.

Вторая серия представлена работами коллектива Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ВНИИЛМ) [18, 20, 31, 32]. Согласно этим публикациям, сток углерода в леса России составляет $440\text{--}500 \times 10^6$ т С год⁻¹, оценки неопределенности не приводятся. Расчеты в цитируемых работах базируются на материалах ГУЛФ и ГЛР, что облегчает анализ расхождений с нашими результатами. Основой оценки поглощения

углерода лесами является величина чистой продукции лесных экосистем (NEP), которая вычисляется по среднему ежегодному приросту запасов стволовой древесины. В материалах ГУЛФ и ГЛР средний прирост рассчитывается суммированием средних приростов насаждений по классам возраста, при этом средний прирост класса возраста определяется делением запаса насаждений этого класса на средний возраст [11]. Помимо среднего прироста, в лесоводстве используется понятие текущего прироста, который равен изменению запаса древесины между последовательными возрастными лесными насаждениями. В справочниках по таблицам хода роста лесных насаждений [4] обычно приводятся величины как среднего, так и текущего приростов. Для любого лесного насаждения характерно уменьшение текущего прироста в старших возрастах, поскольку запас древесины асимптотически приближается к стабильной величине. При этом величина среднего прироста (то есть отношения запаса древесины к возрасту) снижается медленнее, чем текущего. К примеру, в возрасте 100 лет средний прирост выше текущего в 1.3 раза у сосны II класса бонитета и в 1.9 раза у березы того же класса бонитета [4]. Согласно материалам ГЛР по состоянию на 01.01.2009, средний возраст лесов России составлял 98 лет. Это

тот возраст, в котором средний прирост заметно превышает текущий для большинства категорий лесов России. Использованный в настоящей работе подход к расчету поглощения углерода по динамике его запасов в возрастных группах лесных насаждений аналогичен оценке текущего прироста. Следовательно, завышение оценок поглощения углерода лесами в работах [18, 20, 31, 32] по сравнению с нашими следует признать вполне закономерным. Добавим, что использование в балансовых расчетах бюджета углерода оценки поглощения, основанной на среднем приросте, фактически приводит к нарушению закона сохранения массы.

Заключение. За два последних десятилетия леса России удалили из атмосферы и законсервировали в виде органического вещества не менее 4.3×10^9 т С. Усиление лесных стоков углерода в середине 1990-х годов, главным образом, связано с уменьшением уровня лесозаготовок. В последние несколько лет наблюдается постепенный рост объема лесозаготовок, а также усиление пожарного воздействия на леса, связанное как с климатическими изменениями, так и не вполне успешными реформами системы охраны лесов от пожаров. Эти тенденции вызывают определенные опасения в отношении перспектив сохранения стока атмосферного углерода в лесах России. Отказ Российской Федерации от взятия обязательств по второму периоду Киотского протокола снизил интерес органов государственного управления к осуществлению мер по снижению эмиссий и усилению стоков парниковых газов. Однако эта пауза является временной, поскольку продолжается международный процесс по выработке климатического соглашения на период после 2020 г. Сохранение абсорбции углерода лесами может обеспечить более комфортные условия участия России в новом соглашении. Наиболее перспективной формой деятельности по поддержанию стока углерода в лесах России следует признать активизацию профилактики и борьбы с лесными пожарами, в первую очередь в южных регионах Сибири и Дальнего Востока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е.* Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (ИСДМ Рослесхоз) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов.* Т. 7. № 2. М.: ООО "ДоМира", 2010. С. 419–429.
2. *Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б.* Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // *Сибирский экологический журнал.* 2005. № 2. С. 631–649.
3. *Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П.* Исследование методов и разработка информационной системы определения и картирования депонируемого лесами углерода в среде Natural. Екатеринбург: УГЛТУ, 2010. 160 с.
4. *Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г.* Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
5. *Замолодчиков Д.Г.* Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // *Лесоведение.* 2009. № 4. С. 3–15.
6. *Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н.* Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // *Лесоведение.* 2011. № 6. С. 16–28.
7. *Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н.* Региональная оценка бюджета углерода лесов (РО-БУЛ). Версия 1.1. М.: ЦЭПЛ РАН, 2011. www.cepl.rssi.ru/regional.htm.
8. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л.* Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // *Лесоведение.* 2007. № 6. С. 23–34.
9. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Честных О.В., Сонген Б.* Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: КМК, 2005. 200 с.
10. *Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В.* Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // *Лесная таксация и лесоустройство.* 2003. Вып. 1(32). С. 119–127.
11. *Инструкция о порядке ведения государственного учета лесного фонда.* М.: ВНИИЦлесресурс, 1997. 66 с.
12. *Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П., Уткин А.И., Голуб А.А., Замолодчиков Д.Г., Прыжников А.А.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр экологической политики, 1995. 156 с.
13. *Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Прыжников А.А., Замолодчиков Д.Г.* Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // *Лесоведение.* 1993. № 5. С. 3–10.
14. *Кашанов Р.Ш., Кулагин А.А.* Опыт оценки стока атмосферного углерода в Башкортостане (РБ) // Из-

- вестия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. Т. 10. № 2. С. 298–302.
15. *Коровин Г.Н., Корзухин М.Д., Бутусов О.Б., Голованов А.С.* Долгосрочное прогнозирование динамики породно-возрастной структуры лесов // Лесоведение. 2011. № 6. С. 94–109.
 16. *Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
 17. Лесной кодекс Российской Федерации. М.: Эксмо, 2007. 92 с.
 18. *Моисеев Б.Н.* Баланс органического углерода в лесах и растительном покрове России // Лесное хозяйство. 2007. № 2. С. 13–16.
 19. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомех России // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 1–12.
 20. *Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н.* Методика МГЭИК для расчета годичного депонирования углерода и оценка ее применимости для лесов России // Лесное хозяйство. 2009. № 4. С. 11–13.
 21. *Морозов А.* Краткий обзор незаконных рубок леса в России (формы и методы незаконных рубок). М.: Гринпис России, 2000. 24 с.
 22. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2009 гг. Москва, 2011. Часть 1. 386 с.
 23. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2010 гг. Москва, 2012. Часть 1. 386 с.
 24. *Птичкинов А., Курицын А.* Системы отслеживания происхождения древесины в России: опыт лесопромышленных компаний и органов управления лесами. Аналитический отчет. М.: WWF России, 2011. 116 с.
 25. *Усольцев В.А.* Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.
 26. *Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Пряжников А.А.* Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.
 27. *Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В.* Органический углерод лиственных лесов России // Хвойные бореальной зоны. Теоретический и научно-практический журнал. 2003. Вып. 1. С. 66–76.
 28. *Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В.* Углеродные пулы фитомассы, почв и депонирование углерода в еловых лесах России // Хвойные бореальной зоны. Теоретический и научно-практический журнал. 2004. Вып. 2. С. 21–30.
 29. *Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н.* Пулы углерода фитомассы и почв в лесном фонде республики Саха (Якутия) // География и природные ресурсы. 2005. № 1. С. 95–103.
 30. *Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В.* Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
 31. *Федоров Б.Г., Моисеев Б.Н., Синяк Ю.В.* Поглощающая способность лесов России и выбросы углекислого газа энергетическими объектами // Проблемы прогнозирования. 2011. № 3. С. 127–142.
 32. *Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н.* Вклад лесов России в углеродный баланс планеты // Лесохозяйственная информация. 2003. № 1. С. 27–34.
 33. *Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
 34. *Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н.* Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // Лесоведение. 1999. № 2. С. 13–21.
 35. *Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В.* Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
 36. *Швиденко А.З., Щенащенко Д.Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
 37. *Швиденко А.З., Щенащенко Д.Г., Ваганов Е.А., Нильссон С.* Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 6. С. 1–5.
 38. *Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A.* Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // Climatic Change. 2002. V. 55. P. 197–211.
 39. *Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Beletti Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D.* An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion method // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 5323–5340. doi:10.5194/bg-9-5323-2012.
 40. *Gusti M., Jonas M.* Terrestrial full carbon account for Russia: revised uncertainty estimates and their role in a bottom-up/top-down accounting exercise // Climatic Change. 2010. V. 103. P. 159–174. doi 10.1007/s10584-010-9911-9.

41. Kolchugina T.P., Vinson T.S. Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union // *Can. J. Forest Res.* 1993. V. 23. № 1. P. 81–88.
42. Kurganova I.N., Kudayarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus*. 2010. V. 62B. P. 497–505.
43. Kurz W.A., Stinson G., Rampley G. Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances? // *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2008. V. 363. P. 2261–2269. doi:10.1098/rstb.2007.2198.
44. Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I., Peylin P., Rodenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schmullius C. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and dynamic global vegetation models // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. № 1. P. 351–365.
45. Scheller R.M., Hua D., Bolstad P.V., Birdsey R.A., Mladenoff D.J. The effects of forest harvest intensity in combination with wind disturbance on carbon dynamics in Lake States Mesic Forests // *Ecological Modelling*. 2011. V. 222. P. 144–153. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.09.009.
46. Shanin V.N., Komarov A.S., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S. Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes // *Ecological Modelling*. 2011. V. 222. P. 2262–2275. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.11.009.
47. Shvidenko A., Nilsson S. Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961–1998: an assessment based on long-term forest inventory data // *Climatic change*. 2002. V. 55. P. 5–37.
48. Shvidenko A., Nilsson S. A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // *Tellus*. 2003. V. 55B. P. 391–415.
49. Soja A.J., Sukhinin A., Cahoon Jr. D.R., Shugart H.H., Stackhous Jr. P.W. AVHRR-derived fire frequency, distribution, and area burned in Siberia // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. V. 25. P. 1939–1951.
50. Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S., Hewson J.H., Soja A.J., Csiszar I.A., Hyer E.J., Loboda T., Conrad S.G., Romasko V.I., Pavlichenko E.A., Miskiv S.I., Slinkina O.A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 93. P. 546–564.

The Impacts from Fires and Clear-cuts in Carbon Balance of Russian Forests

D. G. Zamolodchikov, V. I. Grabowsky, P. P. Shulyak, O. V. Chestnykh

The regional assessment of forest carbon budget (ROBUL) system is expanded with the procedures of uncertainty calculations. The forest carbon balance of Russian Federation for 1988–2009 is assessed. The fire impact on forest carbon budget is estimated using both: official statistics and remote sensing data. For the study period the average carbon sink from the atmosphere to Russian forests was $205 \pm 65 \cdot 10^6 \text{ t C yr}^{-1}$ on average, varying from $56 \pm 71 \cdot 10^6 \text{ t C yr}^{-1}$ in 1998 to $287 \pm 60 \cdot 10^6 \text{ t C yr}^{-1}$ in 2001. Interannual variations of carbon sink are controlled by the dynamics of carbon losses due to the forest fires. The distribution of the fire-induced carbon losses in Russian regions is examined using remote sensing data.

Russian forests, carbon balance, forest reserves dynamics, phytomass, dead wood, litter, soil, clear-cuts, forest fires, uncertainty, remote sensing.