

ОБЩЕСТВЕННО-НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



Проблемы Региональной Экологии

Журнал издается при поддержке
Института географии Российской академии наук

№1
2009 г.



В результате аппроксимации полученных поверхностей определены зависимости мощности выброса частиц хвостов от диаметра частиц и скорости воздушного потока для различных значений влажности. При влажности хвостов $w = 0,03$ зависимость имеет вид:

$$M = \frac{a + U(c + gU) + \ln d(e + i \ln d + kU)}{1 + U(b + fU) + \ln d(v + h \ln d + jU)}, \quad (2)$$

где M — мощность выброса, г/с;

U — скорость воздушного потока, м/с;
 d — диаметр частиц, мм; $a = 0.001396943$;
 $b = -0.13558033$; $c = -0.00078293$;
 $v = 0.00678654$; $e = 0.00073499$;
 $f = 0.004642507$; $g = 5.93014e-05$;
 $h = 0.000581956$; $i = -6.1707e-05$;
 $j = -0.00111808$; $k = -0.00042765$
 (достоверность аппроксимации $R^2 = 0.9878668295$).

Результаты лабораторных исследований могут быть использованы при разработке методов борьбы с пылением на хвостохранилищах КМА.

УДК 630*182.5+547.45(470.6)

ПРОГНОЗ УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА ПО МОДЕЛИ СВМ-CFS

З. М. Бакаева

аспирант Московского государственного университета
 им. М. В. Ломоносова, fatima2001@mail.ru

Д. Г. Замолотчиков

зам. директора Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов
 РАН, dzamolod@cepl.rssi.ru

В. И. Грабовский

старший научный сотрудник Центра по проблемам экологии и
 продуктивности лесов РАН, wgrabo@mail.ru

Модель углеродного бюджета СВМ-CFS, разработанная Лесной службой Канады, использована для оценки и прогноза углеродного бюджета лесов Северного Кавказа. С помощью модели проведены прогнозы 70-летней динамики запасов углерода при 3 сценариях нарушающих и управляющих воздействий.

The Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (СВМ-CFS) was used for the assessment and projection of the carbon budget in forests of the Northern Caucasia. Model based projections of 70-years carbon pools dynamics are received for 3 scenarios of disturbing and controlling factors.

Ключевые слова: моделирование, прогноз, леса, запасы углерода, бюджет углерода, фитомасса, почва, Северный Кавказ.

Введение. Математическое моделирование широко применяется в исследованиях углеродного цикла как лесных, так и прочих природных систем. Однако задача оценки углеродного эффекта принимаемых управленческих решений налагает на модель ряд жестких требований: 1) ориентация модели на описание объектов, являющихся единицами лесопользования; 2) наличие развитых средств импорта материалов инвентаризации лесов; 3) возможность детального учета различных форм лесохозяйственной деятельности и нарушений. Указанным требованиям соответствует лишь небольшое число моделей углеродного бюджета лесов, в частности, канадская СВМ-CFS.

Разработка модели СВМ-CFS стартовала при поддержке Лесной службы Канады в начале 1990-х годов [1]. Модель применялась по отношению к лесам Канады в целом [2] и отдельных провинций

[3]. Полученные результаты послужили основой для принятия решений по управлению углеродным бюджетом национальных лесов. Программное обеспечение модели CBM-CFS, снабженное детальным руководством [4], имеется в свободном доступе на веб-сайте Лесной службы Канады (<http://carbon.cfs.nrcan.gc.ca>). Ранее нами было проведено успешное испытание CBM-CFS в применении к лесам Вологодской обл. [5]. Цель настоящей работы состоит в оценке современного состояния и прогнозном анализе углеродного бюджета лесов Северного Кавказа.

Материалы и методика. При имитации динамики запаса углерода в лесном насаждении модель CBM-CFS оперирует с 14 элементарными пулами, объединяемыми в 4 составных пула: фитомассы, мертвой древесины, подстилки и почвы. Расчет динамики пула фитомассы базируется на информации по ходу роста объемных запасов древесины. Для конверсии запасов древесины во фракции фитомассы (деловая древесина, прочая древесина, листва, крупные корни, тонкие корни) используются регрессионные уравнения, параметры которых оценены по данным натурных исследований. Запас углерода фитомассы является базовым для оценки динамики пулов мертвого органического вещества (МОВ). С помощью систем коэффициентов, найденных для древесных пород с учетом природно-климатических зон, рассчитываются размеры годового отпада и отпада различных фракций фитомассы. Процессы разложения характеризуются периодом полураспада, являющимся функцией от среднегодовой температуры, древесной породы и возраста насаждения. Размер конкретного пула МОВ вычисляется по сумме запасов растительных остатков разной степени разложения. Для оценки стартовых величин пулов МОВ используется процедура ретроспективных расчетов.

Процедуры формирования массивов исходных данных и приемы работы с интерфейсом модели CBM-CFS детально охарактеризованы в руководстве [4]. Особенности применения CBM-CFS к материалам отечественного лесоустройства изложены в работе [5]. В нашем исследовании источником исходной информации служили данные государственного

учета лесного фонда (ГУЛФ), характеризующие площади и запасы древесных лесных насаждений по различным категориям учета. Материалы ГУЛФ представлены в виде компьютерных баз данных (БД ГУЛФ) и периодически публикуемых справочников [6]. Нами использована версия БД ГУЛФ по состоянию на 1 января 2003 г.

В модели CBM-CFS элементарным пространственным объектом является учетная единица, соответствующая совокупности лесных насаждений со сходными свойствами. Учетная единица идентифицируется набором классификаторов, из которых в обязательном порядке должен присутствовать классификатор «преобладающая порода». CBM-CFS содержит встроенные перечни биологических видов и родов преобладающих древесных пород. Прочие классификаторы устанавливаются по выбору пользователя модели.

Указанный подход к идентификации учетных единиц облегчает стыковку модели CBM-CFS с БД ГУЛФ, записи которой идентифицируются по кодам субъектов РФ, преобладающих древесных пород, возрастам рубки (спелости) и некоторым другим параметрам. Коды преобладающих пород по БД ГУЛФ были сопоставлены с биологическими родами древесных пород из списка CBM-CFS. В набор классификаторов также включили «субъект РФ» и «возраст рубки (спелости)». Таким образом, в нашем исследовании учетная единица представлена совокупностью лесных насаждений данной преобладающей породы с определенным возрастом рубки в пределах субъекта РФ. Модельные расчеты были проведены для 6 республик Северного Кавказа: Кабардино-Балкарии, Карачаево-Черкессии, Чеченской, Ингушской, Северной Осетии и Дагестана.

При характеристике возрастной структур лесных насаждений в БД ГУЛФ используются группы возраста (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые, перестойные). Интервалы возрастов, используемые при отнесении лесного насаждения к конкретной группе, задаются возрастом рубки (спелости). При этом различные группы возраста могут иметь разную продолжительность. Модель CBM-CFS оперирует с

равными по продолжительности классами возраста. Для перехода от групп к классам возраста была разработана процедура предварительной обработки БД ГУЛФ. Сначала с учетом возраста рубки (спелости) находили зависимости хода роста средних запасов от возраста лесных насаждений, затем эти зависимости использовали для распределения общих запасов в группах возраста по составляющим классам. Найденные распределения площадей и запасов древесины по классам возраста вместе с зависимостями хода роста лесных насаждений были импортированы в СВМ-CFS в виде текстовых файлов.

Динамика запасов углерода лесных территорий определяется уровнями нарушающих и контролирующих воздействий, наиболее значимые из которых представлены рубками, лесными пожарами и деятельностью по лесовосстановлению. Модель СВМ-CFS позволяет осуществлять прогнозные расчеты бюджета углерода лесов при заданных сценариях указанных воздействий. Для оценки современных масштабов воздействий были использованы официальные статистические материалы по лесному хозяйству. Прогнозные расчеты выполняли для 3 сценариев с различными уровнями лесопользования: 1) сохранение текущих масштабов; 2) увеличение в 1,5 раза; 3) увеличение в 3 раза. Допускалось, что уровень лесных пожаров для всех 3 сценариев соответствует современному, а лесовосстановление проводится на всех не покрытых лесом землях, образующихся в результате нарушений. Прогнозные расчеты проводили на период 70 лет при шаге по времени 1 год.

Модель СВМ-CFS разработана для лесов Канады, идентификация параметров процедур расчета пулов и потоков углерода осуществлена на основе канадских натуральных данных. В этой связи возникает вопрос, в какой степени модель применима к лесам Северного Кавказа, отличающимся от канадских как по видовому составу древесных пород, так и по комплексам лесорастительных условий? Для ответа были осуществлены независимые расчеты запаса углерода фитомассы в лесах Северного Кавказа с использованием конверсионного-объемного метода [7]. Кроме того, по разности годичного депонирования углерода [8]

и потерь с рубками и пожарами был оценен бюджет углерода для пула фитомассы. Детальное описание методики проведения такой оценки приведено в работе [9].

Результаты и обсуждение. Согласно модельной оценке, запас углерода фитомассы на покрытых лесом землях Северного Кавказа ($1429,8 \cdot 10^3$ га) равен $96,1 \cdot 10^6$ т С. Средний для лесов Северного Кавказа запас углерода фитомассы составляет $67,2$ т С га⁻¹, что в 1,5 раза выше аналогичной величины ($43,7$ т С га⁻¹) по лесам России в целом [10]. Такое различие определяется более благоприятными по сравнению со среднероссийскими лесорастительными условиями Северного Кавказа, способствующими развитию лесных насаждений с высокими объемными запасами древесины и, следовательно, углерода фитомассы.

Размер вклада республик Северного Кавказа в запас углерода фитомассы (табл. 1) определяется площадями покрытых лесом земель. 34,8% углерода фитомассы приходится на Карачаево-Черкесию, 19,3% — на Дагестан, 17,2% — на Чеченскую респ., 12,9% — на Северную Осетию, 10,3% — на Кабардино-Балкарию и 5,5% — на Ингушетию. Средний запас углерода фитомассы максимален в Карачаево-Черкесии ($82,9$ т С га⁻¹), минимален — в Дагестане ($51,1$ т С га⁻¹). По остальным республикам средние запасы углерода фитомассы варьируют в пределах $63,3$ – $69,9$ т С га⁻¹.

Альтернативные конверсионно-объемные оценки запаса углерода фитомассы демонстрируют высокую сходимость с модельными (табл. 1), средние значения для выборок по республикам статистически не различаются (парный *t*-тест, $P = 0,16$). Сходная ситуация имеет место и с оценками бюджета углерода по пулу фитомассы. Сток углерода в фитомассу лесов Северного Кавказа для 1 года модельной имитации равен $448,4 \cdot 10^3$ т С год⁻¹, альтернативный балансовый расчет дает оценку $493,3 \cdot 10^3$ т С год⁻¹. Различия средних значений для выборок по республикам статистически незначимы (парный *t*-тест, $P = 0,22$). Результаты проведенного сравнения дают основания утверждать, что модель СВМ-CFS может успешно применяться для оценки и прогноза

Оценки запаса и бюджета углерода по пулу фитомассы в лесах Северного Кавказа, полученные по модели СВМ-CFS и методикам из работ [7, 9]

Республика	Площадь лесов, 10 ³ га	Запас углерода, 10 ⁶ т С		Бюджет углерода, 10 ³ т С год ⁻¹	
		СВМ-CFS	методика [9]	СВМ-CFS	методика [7]
Карачаево-Черкесия	403.6	33.5	34.2	94.0	106.3
Кабардино-Балкария	146.3	9.9	10.3	45.1	44.3
Чеченская	261.4	16.5	18.4	95.3	110.1
Ингушская	77.4	5.3	5.1	54.1	43.3
Северная Осетия	177.2	12.4	13.8	38.8	41.6
Дагестан	363.9	18.6	18.0	121.2	147.8
Итого	1429.8	96.1	99.8	448.4	493.3

углеродного бюджета лесов Северного Кавказа.

Модельная оценка суммарного запаса углерода в пулах МОВ лесов Северного Кавказа равна $272.8 \cdot 10^6$ т С (190.8 т С га⁻¹), что почти в 3 раза больше запаса углерода фитомассы. 61.4% ($167.5 \cdot 10^6$ т С) углерода МОВ приходится на органическое вещество почвы, 29.0% ($79.0 \cdot 10^6$ т С) и 9.6% ($26.4 \cdot 10^6$ т С) — на пулы подстилки и мертвой древесины соответственно. Средние значения углерода почвы (117.1 т С га⁻¹) и мертвой древесины (18.5 т С га⁻¹) укладываются в диапазоны варьирования оценок по различным лесным регионам России [11, 12], в то время как величина пула подстилки (55.3 т С га⁻¹) заметно превышает имеющиеся оценки [13].

Модель СВМ-CFS представляет собой инструмент не только оценки, но и прогноза изменений запасов углерода в лесах. Рассмотрим прогнозную динамику средних запасов углерода в фитомассе и МОВ. При сохранении текущего уровня нарушающих воздействий (сценарий 1) средние запасы углерода фитомассы возрастают во всех республиках Северного Кавказа, обеспечивая тем самым сток атмосферного углерода. В Северной Осетии, Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии запасы углерода фитомассы стабилизируются через 30–40 лет, а их увеличение к 70-му году прогнозного периода составляет около 10%. В Чечне и Дагестане темпы роста замедляются к 50-году прогнозного периода, а увеличение углерода фитомассы к 70-му году

составляет около 20%. В Ингушетии заметный рост фитомассы имеет место в течение всего прогнозного периода, что выражается в итоговом увеличении запаса углерода на 40%. Вариации прогнозных оценок связаны с различиями в современной возрастной структуре лесных насаждений: республики с большей долей молодых лесных насаждений обладают значительным потенциалом увеличения запаса углерода фитомассы.

Пулы МОВ, как и фитомассы, увеличиваются при сохранении текущего уровня нарушающих воздействий. Некоторое замедление темпов роста во второй половине прогнозного периода отмечается лишь для Северной Осетии и Кабардино-Балкарии. К концу периода пулы МОВ увеличиваются на 2–4%, в maximume на 9% (Ингушетия). Изменение пулов МОВ за прогнозный период, равное в среднем для лесов Северного Кавказа 8.1 т С га⁻¹, уступает приросту запаса углерода фитомассы (10.4 т С га⁻¹).

Прогнозный расчет приводит к выводу, что леса Северного Кавказа при сохранении текущего уровня нарушающих воздействий будут оставаться стоком атмосферного углерода в течение достаточно долгого времени. Для объяснения этой ситуации необходимо обратиться к ретроспективной динамике лесопользования как главного нарушающего фактора. В 2000-е годы суммарный объем лесозаготовок в лесах Северного Кавказа составлял около $200 \cdot 10^3$ м³ год⁻¹, причем 86,8% древесины заготавливалось при

Прогноз бюджета углерода по пулам фитомассы и мертвого органического вещества (МОВ) лесов Северного Кавказа при различных сценариях нарушающих воздействий

Республика	Годы прогноза	Бюджет углерода, 10^3 т С год ⁻¹					
		сценарий 1		сценарий 2		сценарий 3	
		фитомасса	МОВ	фитомасса	МОВ	фитомасса	МОВ
Карачаево-Черкессия	1–20	77.6	58.8	73.8	59.3	67.5	59.3
	20–40	38.5	55.3	34.9	55.1	28.4	53.9
	40–60	17.1	48.8	17.7	47.8	15.6	44.6
Кабардино-Балкария	1–20	39.4	58.8	36.3	59.3	23.0	15.3
	20–40	15.9	55.3	13.6	55.1	4.3	6.9
	40–60	3.9	48.8	2.3	47.8	-4.3	2.6
Чеченская	1–20	75.6	58.8	66.8	59.3	25.8	23.3
	20–40	51.3	55.3	37.2	55.1	-2.9	2.6
	40–60	32.7	48.8	13.4	47.8	-27.6	-12.4
Ингушская	1–20	49.3	58.8	48.8	59.3	49.0	17.5
	20–40	30.8	55.3	30.9	55.1	30.5	22.2
	40–60	26.9	48.8	27.1	47.8	27.0	23.5
Северная Осетия	1–20	31.0	58.8	27.9	59.3	25.4	5.2
	20–40	12.4	55.3	11.5	55.1	4.8	1.2
	40–60	-0.3	48.8	-0.4	47.8	-3.2	-4.8
Дагестан	1–20	95.2	58.8	84.2	59.3	53.6	33.7
	20–40	87.9	55.3	89.4	55.1	86.5	27.5
	40–60	38.0	48.8	27.8	47.8	34.0	28.4
Итого	1–20	368.0	352.7	337.8	355.6	244.2	154.3
	20–40	236.7	331.5	217.5	330.7	151.7	114.5
	40–60	118.3	293.1	87.9	286.8	41.5	81.9

рубках промежуточного пользования (прореживания, рубки обновления и переформирования, выборочные санитарные рубки). Ныне только 30.5% площади лесов Северного Кавказа относится к эксплуатационным, остальная часть представлена охраняемыми и защитными лесными насаждениями. В недавнем прошлом лесопользование на Северном Кавказе было намного масштабнее: в 1950-х годах заготавливалось по $1500 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$, в 1960-х — по $1100 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$ [14]. На вырубках того времени к настоящему моменту сформировались активно растущие средневозрастные лесные насаждения. Низкий уровень потерь углерода при современном лесопользовании заметно меньше темпов пополнения пулов фитомассы и

МОВ, что и приводит к стоку углерода из атмосферы.

Для оценки, в какой степени будущая динамика лесопользования может воздействовать на бюджет углерода лесов Северного Кавказа, прогнозные расчеты были проведены еще для двух сценариев. При сценарии 2 уровень лесопользования повышается в 1.5 раза, что соответствует современной расчетной лесосеке в лесах Северного Кавказа (около $300 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$). Сценарий 3 предусматривает 3-х кратное повышение лесопользования, что близко к уровню 1980-х годов ($300 \cdot 10^3 \text{ м}^3 \text{ год}^{-1}$).

При всех рассмотренных сценариях (табл. 2) леса Северного Кавказа являются стоком углерода в пулы фитомассы и МОВ. Сценарий 2 (расчетная

лесосека) приводит к незначительному сокращению поглощения углерода по сравнению со сценарием 1 (текущий уровень лесопользования). Сценарий 3 (уровень 1980-х годов) уменьшает сток углерода в пул фитомассы в 1.5–2 раза, в пулы МОВ — в 2–3 раза. Для отдельных республик прогнозные изменения существенно различаются по характеру. Например, в Ингушетии вариации уровня лесопользования почти не отражаются на прогнозных значениях углеродного бюджета (за исключением пула МОВ при сценарии 3). В то же время, при сценарии 3 леса таких республик, как Кабардино-Балкария, Чечня, Северная Осетия становятся источником атмосферного углерода с 40-го года прогнозного периода.

Заключение. Российская Федерация официально объявила об использовании

лесоуправления для выполнения своих обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в рамках Киотского протокола [15] Новая редакция Лесного кодекса [16] передала субъектам Российской Федерации полномочия по управлению лесами. Сохранение и увеличение запасов лесного углерода, вероятно, станет вскоре одним из важных приоритетов деятельности региональных органов управления лесами. Успешному решению этой задачи может способствовать прогнозная оценка углеродного бюджета лесов при различных сценариях управляющих и нарушающих воздействий, пример которой дает приложение модели CBM-CFS к лесам Северного Кавказа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (08–04–01619).

Библиографический список

1. Kurz W. A., Apps M. J. Contribution of northern forests to the global carbon cycle: Canada as a case study // *Water, Air, and Soil Pollution*. — 1993. — V. 70. — P. 163–176.
2. Kurz W. A., Apps M. J. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector // *Ecological Applications*. — 1999. — V.9. — № 2. — P. 526–547.
3. Banfield G. E., Bhatti J. S., Jiang H., Apps M. J. Variability in regional scale estimates of carbon stocks in boreal forest ecosystems: results from west-central Alberta // *Forest Ecology and Management*. — 2002. — V. 169. — P. 15–27.
4. Kull S., Kurz W. A., Rampley G., Banfield G. E., Schivatcheva R. K., Apps M. J. Operational-scale carbon budget model of the Canadian forest sector (CBM-CFS3) version 1.0: user's guide. — Edmonton: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. Northern Forestry Centre, 2006. — 320 p.
5. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н., Курц В. А. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области по канадской модели CBM-CFS // *Лесоведение*. — 2008. — № 6. — С. 3–12.
6. Лесной фонд России. Справочник. — М.: ВНИИЛМ, 2003. — 640 с.
7. Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // *Лесная таксация и лесостроительство*. — 2003. — Вып. 1(32). — С. 119–127.
8. Исаев А. С., Коровин Г. Н., Уткин А. И., Пряжников А. А., Замолодчиков Д. Г. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // *Лесоведение*. — 1993. — № 5. — С. 3–10.
9. Бакаева З. М., Замолодчиков Д. Г. Оценка бюджета углерода лесов Ингушетии по данным актуализации учета лесного фонда // *Лесоведение*. — 2008. — № 3. — С. 66–70.
10. 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.
11. Кудеяров В. Н., Заварзин Г. А., Благодатский С. А. и др. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. — М.: Наука, 2007. — 315 с.
12. 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.
13. Честных О. В., Лыжин В. А., Кокшарова А. В. Запасы углерода в подстилке лесов России // *Лесоведение*. — 2007. — № 6. — С. 114–121.
14. Лесопользование в Российской Федерации в 1946–1992 гг. — М.: ФСЛХ, 1996. — 313 с.
15. Национальный доклад Российской Федерации об установленном количестве выбросов. — М., 2007. — 40 с.
16. Лесной кодекс Российской Федерации. — М.: Эксмо, 2007. — 92 с.