

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-5-29



Ссылки для цитирования:

Столбовой В.С. Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 5-29. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-5-29

Cite this article as:

Stolbovoy V.S., Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2022, V. 111, pp. 5-29, DOI: 10.19047/0136-1694-2022-111-5-29

Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России

© 2022 г. В. С. Столбовой

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжевский пер, 7, стр. 2,
e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.

Поступила в редакцию 18.05.2022, после доработки 11.07.2022,
принята к публикации 27.09.2022

Резюме: Баланс углерода в лесных почвах (БУЛП) исследовался на основе геостатистической процессной модели “BIGIN” (Biosphere Greenhousegas Inventory). Потепление в базовый период времени (1990 ± 5 гг.) в бореальных лесах инициирует сдвиг БУЛП в сторону его уменьшения, т. е. усиления эмиссии CO₂. В горизонте “O” уменьшение БУЛП составляет минус 101.4 МтС¹. Потепление климата на 1.5 °C и 3 °C вызовет дальнейшее уменьшение БУЛП на 345.7 МтС и 691.4 МтС, соответственно. В умеренно теплых лесах потепление климата инициирует формирование положительного БУЛП, т. е. увеличение поглощения CO₂. В горизонте “O” почв умеренно теплых лесов потепление климата в базовый период и в дальнейшем приводит к развитию положительного БУЛП, т. е. накоплению углерода 62.4 МтС, 212.8 МтС и 425.4 МтС соответственно. Положительные изменения БУЛП в бореальных и умеренно теплых лесах в исследованном интервале температур отмечены в горизонте “A1” (7.3 МтС, 24.9 МтС и

¹ Миллион тонн углерода

49.8 МтС) и горизонте “Bh” (14.1 МтС, 48.0 МтС, 96.2 МтС). В обоих типах лесов потепление климата инициирует суммарный отрицательный БУЛП (минус 17.6 МтС). Дальнейшее потепление климата на 1.5 °С и 3.0 °С приведет к уменьшению БУЛП на минус 60.0 МтС и минус 120.0 МтС. Это составит 4%, 13% и 27% от совокупного годового выброса РФ в 2020 г. Отрицательный БУЛП не является показателем усиления CO₂ эмиссии. Окончательный вывод о CO₂ эмиссии/поглощении можно сделать только при анализе лесной экосистемы при проведении сопряженного анализа “почва–древостой”. Погрешность оценки БУЛП в органо-профиле почв в базовый период составляет ± 23.0 МтС при уровне достоверности P = 0.67 и ± 47 МтС при уровне достоверности P = 0.95. При повышении температуры на 1.5 °С погрешность составит ± 80.0 МтС и ± 160.0 МтС при уровнях достоверности P = 0.67 и P = 0.95 соответственно. Величина ошибки БУЛП при повышении температуры на 3.0 °С составит ± 160.0 МтС и ± 320.0 МтС при уровнях достоверности P = 0.67 и P = 0.95 соответственно.

Ключевые слова: парниковые газы, эмиссия CO₂, поглощение CO₂, экосистема.

Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia

© 2022 V. S. Stolbovoy

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com.*

Received 28.05.2022, Revised 11.07.2022, Accepted 27.09.2022

Abstract: The carbon balance in forest soils (CBFS) was studied on the basis of the geostatistical process model “BIGIN” (Biosphere Greenhousegas Inventory). Warming in boreal forests in the baseline period (1990 ± 5 yr.) initiates a shift in the CBFS towards its decrease, i. e. CO₂ source. In the horizon “O”, the decrease in the CBFS is minus 101.4 МтС. The warming of the climate by 1.5 °C and 3 °C will cause a further decrease in the CBFS by 345.7 МтС and 691.4 МтС, respectively. In moderately warm forests, climate warming initiates the formation of a positive CBFS, i. e. CO₂ sink. In the horizon “O” of the soils of moderately warm forests, climate warming in the baseline period and in the future leads to the development of positive CBFS, i. e. CO₂ sink of 62.4 МтС, 212.8 МтС and 425.4 МтС, respectively. Positive changes in the CBFS in boreal and moderately warm forests in the studied

range of climatic temperatures were noted in the horizon “A1” (7.3 MtC, 24.9 MtC and 49.8 MtC) and the horizon “Bh” (14.1 MtC, 48.0 MtC, 96.2 MtC). Climate warming initiates a total negative CBFS (minus 17.6 MtC). Further warming of the climate by 1.5 °C and 3.0 °C will lead to a decrease in the CBFS by minus 60.0 MtC and minus 120.0 MtC. In terms of CO₂-equivalent, this will amount to 4%, 13% and 27% of the total country annual emission in 2020. Negative CBFS is not an indicator of emission strengthening. The final conclusion about CO₂ source/sink can be made only when analyzing the forest ecosystem when conducting a coupled soil-stand analysis. The error in the estimation of the CBFS in the soil organic profile in the baseline period is ± 23.0 MtC at a confidence level of $P = 0.67$ and ± 47 MtC at a confidence level of $P = 0.95$. With an increase in temperature by 1.5 °C, the error will be ± 80.0 MtC and ± 160.0 MtC at confidence levels of $P = 0.67$ and $P = 0.95$ respectively. The magnitude of the error will be ± 160.0 MtC and ± 320.0 MtC at confidence levels $P = 0.67$ and $P = 0.95$ respectively with an increase in temperature by 3.0 °C.

Keywords: greenhouse gases, CO₂ emission, CO₂ absorbtion, ecosystem.

ВВЕДЕНИЕ

Сплошное систематическое изучение лесных почв в Российской Федерации (РФ) не проводится. Это связано с особенностями Лесного Кодекса РФ ([ЛК, 2015](#)), в котором понятие лес определяется весьма широко как “экологическая система или как природный ресурс” (Ст. 5, [ЛК РФ](#)). При этом в обеих частях приведенного понятия леса почва не упоминается, что является основанием для ее исключения из лесной инвентаризации. Вместе с тем РФ ратифицировала и приняла ряд международных правовых документов, которые требуют экосистемного (сопряженного) анализа почв и лесной растительности. Наиболее важными из них выступают: Рамочная конвенция об изменении климата (The UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), Конвенция о биологическом разнообразии (The Convention on Biological Diversity, CBD), Конвенция по борьбе с опустыниванием (The UN Convention to Combat Desertification, UNCCD). В отмеченных международных соглашениях (детали см. на сайтах Конвенций) роль почв считается ведущей. Так в конвенции по изменению климата почва признается вторым по значимости, после литосферы, глобальным резервуаром углерода, контролирующим концен-

трацию парниковых газов в атмосфере. В контексте биоразнообразия считается, что почвы содержат почти 96% генного пула планеты. Плодородие и деградация почв выступают главными составляющими конвенции по борьбе с опустыниванием.

Полное соблюдение отмеченных выше Конвенций в отношении лесных почв страны до недавнего времени было невозможно. Это связано с фрагментарностью доступных почвенных данных в лесном фонде, который составляет почти 66% от общей площади страны ([Государственный доклад..., 2013](#)). Кроме того, до недавнего времени, основным легальным (т. е. официально утвержденным) почвенным документом РФ служила Классификация и диагностика почв СССР ([Классификация..., 1977](#)), которая включает только сельскохозяйственные почвы, составляющие около 12% территории страны.

В 2014 г. принят новый почвенный геоинформационный ресурс – Единый государственный реестр почвенных ресурсов России ([ЕГРПР, 2014](#)), который изменил ситуацию с изученностью почвенного покрова страны. ЕГРПР содержит полную, унифицированную, цифровую информацию обо всех почвах страны, их свойствах и пространственном размещении. Таким образом, ЕГРПР сделал возможным представить обобщенный взгляд на почвы лесного фонда РФ в цифровом формате ([Столбовой, 2018](#)).

В 1985–1995 гг. в России получено большое количество новых фактографических данных по характеристике компонентов углеродного цикла в лесных экосистемах, например, запасам годовой чистой первичной продукции, опад биомассы растительности ([Nilsson et al., 2000](#)), резервуарам почвенного органического вещества ([Stolbovoi, 2000](#); [2002](#); [2006](#)), гетеротрофному дыханию ([Stolbovoi, 2003](#)), речному транспорту углерода ([Романкевич и др., 2001](#)) и т. д. Эти сведения относятся к базовому периоду 1990 ± 5 гг. и транслированы в современные пространственно-распределенные базы данных ГИС ([Stolbovoi et al., 2002](#); [Столбовой и др., 2004](#)). В дополнение к статичным показателям углеродного цикла отмеченные данные позволяют оценить динамику параметров углеродного цикла в связи с наблюдаемыми и прогнозируемыми изменениями климата.

Целью настоящей статьи является оценить влияние потеп-

ления климата на изменение баланса углерода в лесных почвах РФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование построено на основе геостатистической процессной модели “BIGIN” (**B**iosphere **G**reenhouse**g**as **I**nventory). Модель разработана автором и использована для подсчета полного углеродного бюджета России ([Nilsson et al., 2000](#)). На базе модели выполнен анализ баланса углерода в почвах Северной Евразии ([Stolbovoy et al., 2014](#)). Одна из версий анализа опубликована в Национальном докладе ([2019](#)). Вместе с тем необходимо отметить относительно ограниченное использование модели “BIGIN” в РФ. Это связано с лимитированной востребованностью биосферных моделей углеродного цикла в стране, которые до недавнего времени имели исключительно научно-познавательное значение. Практическая востребованность сформировалась в последние годы в связи с увеличением внимания к глобальному изменению климата, принятию мер трансграничного регулирования перемещения углеводородов в ЕС, к рынку углеродных квот и др.

Процессная концепция модели BIGIN оперирует базовыми представлениями биогеохимического цикла углерода в наземных экосистемах ([Базилевич, 1993](#); [Глазовская, 2009](#); [Бобкова и др., 2014](#); [Stevenson, 1994](#)). Согласно принятым представлениям, значительная часть ежегодно поступающего растительного опада окисляется, что приводит к высвобождению связанного фотосинтезом CO_2 и его возвращению в атмосферу. Оставшаяся часть опада подвергается процессам микробного метаболизма, который сопровождается процессами цикличного обмена питательными элементами между почвенным органическим веществом и микробной биомассой. Этот обмен приводит к микробно-опосредованной полимеризации органических соединений (производство фенолов) и образованию гумуса. Разложение как каталитическая реакция окисления-восстановления приводит к образованию ряда органических кислот, имеющих общую карбоксильную группу (COOH). Последняя легко диссоциирует протон (H^+) и инициирует процессы выветривания пород. При этом карбоксилат-анион (COO^-) образует растворимые комплексы с катионами металлов, выделяю-

щимися при выветривании. Этот процесс приводит к образованию растворенных органических веществ, которые мигрируют в глубокие слои почв, а также транспортируются в гидросферу и литосферу. Речной сток включает около 15% наземного ежегодного оборота углерода и является единственным источником питательных веществ для океана ([Романкевич и др., 2001](#)). Некоторое количество водорастворимого углерода поглощается породами vadозной зоны ([Kramer, 1994](#)), а также проникает в глубинные слои литосферы, обеспечивая образование ископаемых нефти и газа ([Thurman, 1985](#)).

Перечисленные выше процессы цикла углерода приводят к формированию органо-профиля почв, который представляет собой определенную последовательность генетически связанных горизонтов аккумуляции и трансформации органического вещества. В ЕГРПР ([2014](#)) основные органо-генетические горизонты почв включают: поверхностный органический – O (подстилки, торфа), гумусово-аккумулятивный – A₁ и гумусово-иллювиальный – Bh. Различные почвы характеризуются специфическим набором органо-генетических горизонтов. Так органогенные (торфяные) почвы имеют только O горизонт, Al-Fe-гумусовые (подзолы) почвы имеют горизонт подстилки O и иллювиально-гумусовый горизонт Bh, гумусово-аккумулятивные (черноземы) почвы имеют горизонт подстилки O в нативных условиях и гумусово-аккумулятивный горизонт A₁, текстурно-дифференцированные (подзолистые) почвы имеют горизонты O, A₁ и Bh.

Исходя из рассмотренных выше особенностей биосферного цикла углерода и связанных с ним педогенетических метаболизм органического вещества, суммарный БУПЛ в органо-профиле почвы (dS) можно описать уравнением:

$$dS = dO + dA_1 + dBh, \quad (1)$$

где O, A₁, Bh – основные органо-генетические горизонты почв; d – баланс между статьями поступления и расхода органического углерода.

Частные балансы углерода в отдельных органо-генетических горизонтах почв описываются следующими уравне-

ниями:

$$dO = DetA - (DecA + Trans + Mig), \quad (2)$$

где dO – баланс углерода в горизонте O; $DetA$ – поверхностное поступление растительного детрита; $DecA$ – поверхностное разложение растительного детрита $DetA$; $Trans$ – поверхностный сток органического вещества; Mig – внутрипочвенная миграция водорастворимого углерода.

$$dA_1 = DetU + Hum - (DecU + Min), \quad (3)$$

где dA_1 – баланс углерода в горизонте A_1 ; $DetU$ – поступление корневого растительного детрита; Hum – гумификация корневого растительного детрита $DetU$; $DecU$ – минерализация корневого растительного детрита $DetU$; Min – минерализация гумуса почв.

$$dBh = Mig - (DeepLeak + Uro), \quad (4)$$

где dBh – баланс углерода в горизонте Bh; Mig – как определено выше; $DeepLeak$ – сток водорастворимого углерода в глубокие слои литосферы; URO – подземный сток водорастворимого углерода в гидросферу.

В работе применен геостатистический метод расчета БУПЛ, который построен на ГИС анализе независимых пространственно-распределенных баз данных потоков углерода, перечисленных в уравнениях 2–4. В количественном выражении рассматриваемые потоки выступают атрибутами ГИС баз данных почв, растительности, речного стока ([Столбовой и др., 2004](#); [Stolbovoi et al., 2002](#)). Перечисленные базы данных транслировались в “grid” формат с разрешением 1×1 км. Расчеты выполнялись в среде ArcInfo.9 ESRI.

Применение ГИС подходов служит значительному улучшению качества моделей. Поскольку в этом случае используются не точечные наблюдения с сильно варьирующими пространственно-временными показателями, а “сглаженные” пространства признаков. Другим преимуществом выступает возможность нивелирования неравномерности распределения точек наблюдений по терри-

тории. ГИС подход позволяет оперировать пространствами показателей, для которых важно не положение точки наблюдений в пространстве, а ее принадлежность последнему. В этом случае географическое пространство признака представляет собой мозаику полигонов с равномерным по площади распределением значений признака.

Как отмечено выше, в работе использован ряд цифровых баз данных, источники которых и методы создания детально рассмотрены ранее ([Nilsson et al., 2000](#); [Stolbovoi et al., 2002](#); [Столбовой и др., 2004](#)). Для удобства демонстрации разнообразие почв и их характеристик агрегированы на таксономическом уровне отделов почв. Последние выделяются на основании сходства основных элементов строения профилей почв и единства создающих их главных процессов почвообразования ([Фридланд, 1982](#)).

Цифровая база данных лесной растительности включает 48 пространственно-распределенных выделов легенды карты растительности ([Stolbovoi et al., 2002](#)). Кроме того, было выполнено агрегирование отмеченных выделов по преобладающим породам древостоев.

База данных миграции водорастворимого органического вещества получена на основе справочных данных гидрохимического состава рек, организованных по 28 бассейнам первого порядка. Речные бассейны выделены на основе цифровой модели рельефа ([Stolbovoi et al., 2002](#)). Внутрипочвенная миграция обобщает опубликованные данные лизиметрических исследований, которые ассоциированы с полигонами классов гранулометрического состава почв и особенностями органо-профилей почв.

Лесные почвы РФ

Разнообразие лесных почв сформировано наложением перечисленных выше цифровых баз данных лесной растительности и почв ([Stolbovoi et al., 2002](#)). Из данных таблицы 1 следует, что общая площадь почвенного фонда страны равна 1 629.5 млн га. Разница с площадью территории страны (1 709.8 млн га – без территории Крыма) составляет 80.1 млн га и приходится на площади непочвенных образований, таких как внутренние водоемы, ледники и выходы плотных пород. Площадь почв под лесной расти-

тельностью равна 763.5 млн га, что составляет 99.2% от официально приводимой площади лесопокрытых территорий страны ([Государственный доклад..., 2013](#)).

Из данных таблицы 1 видно, что почвы под лесной растительностью характеризуются значительным разнообразием и представлены 12 из 15 отделов почв, выявленных в РФ. Отсутствующие два из отделов почв получили распространение за пределами лесной зоны это: 1) криоземы, характерные для мерзлотных областей тундры и 2) малогумусовые аккумулятивно-карбонатные почвы, получившие развитие в зоне полупустынь. Третий, отсутствующий отдел, представлен органогенными почвами. Эти почвы получили широкое развитие в таежной зоне и имеют мощность торфяного горизонта, превышающую 30 см. Для почв характерны сильно выраженные гидроморфизм и анаэробные условия, которые не способствуют развитию лесной растительности ([Зайдельман, 1981](#)).

В целом площадь распространения отделов почв под лесами следует таковой в почвенном фонде страны. Первое по распространению место занимают Al-Fe-гумусовые подзолы и подбуры (216.7 млн га). На втором месте находятся текстурно-дифференцированные подзолистые почвы (173.1 млн га). Далее идут метаморфические буроземные и буротаежные почвы (164.8 млн га). Следует отметить, что этот порядок нарушается почвами отдела глееземы. Это указывает на то, что характерные для глееземов гидроморфизм и анаэробные условия, как отмечено выше, выступают факторами, лимитирующими развитие лесной растительности.

Эдафическая избирательность лесных ценозов хорошо иллюстрируется относительной долей, занимаемой конкретными почвами под лесной растительностью. Приведенные данные (табл. 1) обнаруживают, что наиболее благоприятными эдафическими условиями для формирования древостоев являются дерново-орган-аккумулятивные почвы (доля лесных почв составляет 80%), которые развиваются под травными лесами и аккумулируют значительное количество биофильных элементов в гумусовом горизонте.

Таблица 1. Лесные почвы в почвенном фонде РФ ([Столбовой, 2018](#))

Table 1. Forest soils in the RF soil pool ([Stolbovoy, 2018](#))

Отдел почв		Площадь почв (млн. га)		Доля почв под лесом, %
Название	Характеристика	Россия	Леса	
Al-Fe-гумусовые	Интенсивная миграция фульвокислотно-алюможелезистых соединений – подзолы, подбуры.	366.7	216.7	59.1
Текстурно-дифференцированные	Дифференциация профиля почв по содержанию илистых частиц – подзолистые почвы.	272.6	173.1	63.5
Глееземы	Признаки интенсивного оглеения, выраженные в сизых, голубых и грязных цветах окраски, – глеевые.	241.6	62.4	25.8
Метаморфические	Выраженный гумусовый горизонт, подстилаемый метаморфическим оглиненным горизонтом, – буроземы, буротаежные.	222.6	164.8	74.0
Гумусово-аккумулятивные	Хорошо выраженный гумусовый горизонт черного цвета – черноземы, каштановые.	160.0	24.0	15.0
Органогенные	Накопление слабо разложенных растительных остатков – торфяные.	116.2	0.0	0.0
Дерновые органо-аккумулятивные	Значительное содержание органического вещества при обилии живых корней и одернованности – дерново-подзолистые, дерновые.	95.9	76.7	80.0
Аллювиальные	Слоистое (скрытослоистое) сложение, погребенные гумусовые горизонты.	55.8	21.8	39.1
Маломощные слаборазвитые	Маломощный, с низким содержанием органического вещества, гумусовый горизонт.	40.0	8.4	21.0

Отдел почв		Площадь почв (млн. га)		Доля почв под лесом, %
Название	Характеристика	Россия	Леса	
Вулканические	Преобладают аллофаны и аморфные продукты выветривания вулканических пеплов. Наличие погребенных почвенных профилей и высокая гумусированность.	16.0	9.9	61.9
Щелочные глинисто-дифференцированные	Процессы дифференциации протекают в условиях щелочной среды без поверхностного переувлажнения – солонцы.	14.8	1.8	12.2
Криоземы	Залегают на мерзлоте, интенсивные криотурбации, нарушение целостности, фрагментация и перемешивание генетических горизонтов.	10.8	0.0	0.0
Литоземы	Крайняя уплотненность и слитость в сухом состоянии. Растрескивание и набухание во влажном состоянии, перемешивание, поверхности скольжения – слитые.	7.6	3.8	50.0
Малогумусовые аккумулятивно-карбонатные	Низкое содержание органического вещества и значительная аккумуляция вторичных карбонатов – бурые пустынно-степные.	7.3	0.0	0.0
Галоморфные	Накопление легкорастворимых солей из засоленных грунтовых воды, либо остаточного содержания в соленосных породах – солончаки.	1.4	0.2	14.3
Итого		1629.5	763.5	46.9

Таковыми же благоприятными свойствами для развития лесной растительности обладают почвы отдела метаморфические – буроземы и буротаежные (доля лесных почв составляет 74%). Отмеченные почвы являются относительно молодыми и обладают значительными запасами легко выветривающихся минералов, определяющих их естественное плодородие. Благоприятными эдафическими свойствами характеризуются текстурно-дифференцированные подзолистые почвы (доля составляет 63.5%) и вулканические почвы (доля составляет 61.9%).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические изменения в РФ

Анализ трансформации землепользования в исследование не включен. Поэтому динамика БУЛП определяется исключительно изменением климатических условий.

В 5-ом национальном докладе РФ ([The Fifth..., 2010](#)) отмечено, что в течение 1976–2006 гг. среднее потепление в России составило 1.33 °C. Это увеличение почти в два раза больше, чем глобальное среднее (0.74 °C) за тот же период времени. При этом показано, что наибольшее увеличение минимальной и максимальной суточных температур наблюдалось в холодных регионах страны.

В перспективе, по данным Всемирной метеорологической организации ([UN World Meteorological Organization...](#)), ожидается дальнейшее потепление климата, которое в XXI в. достигнет 1.5–3.0 °C.

Годовое количество осадков за 30-летний период 1976–2006 гг. на всей территории увеличивалось на 7.2 мм каждые 10 лет. Влияние увлажнения на баланс углерода в нашем исследовании не рассматривается.

Связь баланса углерода лесных почв с климатическими данными

Приведенные выше изменения климата относятся к 30-летнему периоду. Как отмечалось выше, анализируемые нами данные БУЛП включают 10-летний базовый временной интервал (1990 ± 5 гг.). Используя коэффициент линейного тренда измене-

ния температуры во времени ($^{\circ}\text{C}/\text{время}$), можно рассчитать, что потепление за 10 лет составило около 0.44°C (далее 0.4°C). При этом средняя величина снижения БУЛП была минус 17.6 МтС (табл. 2). Таким образом, можно определить, что потепление климата на 1°C будет соответствовать уменьшению БУЛП почти на минус 44 МтС . Аналогичным образом может быть рассчитана динамика изменений БУЛП при потеплении климата в России на 1.5°C и 3.0°C (табл. 2).

Обсуждение

Наиболее значимые по величине изменения БУЛП отмечаются для верхнего органогенного горизонта “О” (табл. 2), который представлен слабо разложившимся, часто оторфованным, опадом (бореальные леса), либо гумусированным и перегнойным лесным и травяным опадом (умеренно теплые леса). Очевидно, что поверхностные лесные подстилки наиболее активно взаимодействуют с нижними слоями атмосферы и являются наиболее чувствительными к их температурным параметрам во всех природно-растительных зонах страны. Изменения БУЛП в бореальных и умеренно теплых лесах носят разнонаправленный характер (табл. 2). Потепление в бореальных лесах инициирует сдвиг БУЛП в сторону его уменьшения, т. е. наблюдается уменьшение массы подстилки за счет усиления ее минерализации. В умеренно теплых лесах потепление климата инициирует формирование положительного БУЛП, т. е. отмечается накопление лесной подстилки.

В органогенном горизонте лесных почв в ряду зон бореальных лесов: лесотундра и северная тайга, средняя и южная тайга наблюдается постепенное снижение БУЛП в базовом временном периоде: минус 43.5 МтС ; минус 32.1 МтС ; минус 24.9 МтС , соответственно. Снижение отрицательного БУЛП в южных зонах согласуется с отмеченным выше более значительным потеплением климата в северных широтах. В базовом периоде общее уменьшение БУЛП в бореальных лесах составляет минус 101.4 МтС . В условиях дальнейшего потепления климата на 1.5°C и 3°C уменьшение БУЛП в горизонте “О” составит 345.7 МтС и 691.4 МтС соответственно.

Таблица 2. Влияние потепления климата на баланс углерода лесных почв РФ
Table 2. Influence of climate warming on carbon balance in the RF forest soil

Природно-растительная зона Морфогенетический горизонт	Тундра	Лесотундра и северная тайга	Средняя тайга	Южная тайга	Итого	Умеренные леса	Степи	Полупустыни и пустыни	Итого	Сумма
Климатические особенности леса	Бореальные					Умеренно-теплые				
Базовый период: 1990 ± 5 гг. Потепление: 0.4 °C										
Органогенный, (O)	-0.9	-43.5	-32.1	-24.9	-101.4	17.5	43.8	1.1	62.4	-39.0
Гумусово-аккумулятивный, (A ₁)	0	0.7	4	1.6	6.3	0.5	0.5	0	1	7.3
Гумусово-иллювиальный, (Bh)	-0.2	-2	11.9	3.5	13.2	-0.4	1.3	0	0.9	14.1
Итого по органо-профилю, (O +A ₁ + Bh)	-1.1	-44.8	-16.2	-19.8	-81.9	17.6	45.6	1.1	64.3	-17.6
Потепление: 1.5 °C										
Органогенный, (O)	-3.1	-148.3	-109.4	-84.9	-345.7	59.7	149.3	3.8	212.8	-133.0
Гумусово-аккумулятивный, (A ₁)	0.0	2.4	13.6	5.5	21.5	1.7	1.7	0.0	3.4	24.9
Гумусово-иллювиальный, (Bh)	-0.7	-6.8	40.6	11.9	45	-1.4	4.4	0.0	3	48.1
Итого по органо-профилю, (O +A ₁ + Bh)	-3.8	-152.7	-55.2	-67.5	-279.2	60.0	155.5	3.8	219.3	-60.0
Потепление: 3.0 °C										
Органогенный, (O)	-6.1	-296.6	-218.9	-169.8	-691.4	119.3	298.6	7.5	425.4	-265.9
Гумусово-аккумулятивный, (A ₁)	0.0	4.8	27.3	10.9	43	3.4	3.4	0.0	6.8	49.8
Гумусово-иллювиальный, (Bh)	-1.4	-13.6	81.1	23.9	90	-2.7	8.9	0.0	6.2	96.1
Итого по органо-профилю, (O +A ₁ + Bh)	-7.5	-305.5	-110.5	-135.0	-558.5	120.0	310.9	7.5	438.4	-120.0

Как отмеченное уменьшение ПУЛП повлияет на общие запасы углерода в лесной подстилке бореальных лесов РФ? Общие запасы углерода в верхнем 30-сантиметровом слое почв бореальных лесов РФ составляют около 45.51 ГтС² (Столбовой, 2018). Доля лесной подстилки в последних равна около 15–20%, т. е. составляет почти 7–9 ГтС или в среднем около 8 ГтС (8 000 МтС). Отмеченное выше уменьшение запасов углерода будет около 1%, 4% и 9% при потеплении на 0.4 °C, 1.5 °C и 3 °C соответственно.

В органогенном горизонте почв умеренно теплых лесов потепление климата в базовый период и в дальнейшем приведет к развитию положительного БУЛП, т. е. накоплению углерода 62.4 МтС, 212.8 МтС и 425.4 МтС соответственно (табл. 2). Можно предполагать, что положительный БУЛП в зоне умеренно теплых лесов связан с увеличением продуктивности лесных ценозов в условиях повышенного увлажнения за счет накопления снега и др.

Суммарное изменение БУЛП в органогенном горизонте лесов РФ носит отрицательный характер (минус 39.0 МтС) и прогнозируется при дальнейшем потеплении климата на 1.5 °C и 3 °C (минус 133.0 МтС и минус 265.9 МтС соответственно).

Потепление климата сопровождается положительным сдвигом БУЛП в бореальном и умеренно теплом лесах и увеличением содержания углерода в гумусово-аккумулятивном горизонте “A₁”. В базовом периоде времени (1990 ± 5 гг.) отмеченное увеличение составило 7.3 МтС. При потеплении на 1.5 °C и 3.0 °C положительный БУЛП в горизонте A₁ увеличится почти до 25 МтС и 50 МтС соответственно.

Потепление климата также инициирует положительный сдвиг БУЛП в иллювиально-гумусовом горизонте “Bh” в бореальных и умеренно теплых лесах, что связано с увеличением трансформирующейся массы органического вещества и формированием дополнительных объемов водорастворимых метаболитов. Суммарно в базовом временном периоде и при дальнейшем потеплении (1.5 °C и 3.0 °C) БУЛП в горизонте “Bh” увеличился на 14.1 МтС, 48.1 МтС и 96.1 МтС соответственно.

Следует подчеркнуть, что изменения БУЛП отмечаются во

² Гт – гигатонна

всех морфогенетических горизонтах (O, A₁ и Bh) почв, но различаются как по своей интенсивности, так и по направленности (табл. 2). Этот вывод представляется важным не только для анализа протекающих в почве процессов трансформации и перераспределения органического вещества, но также для понимания внутренней сложности формирования потоков углеродного обмена.

Из данных таблицы 2 следует, что потепление климата в базовый период времени инициировало суммарный отрицательный БУЛП (минус 17.6 МтС). Это свидетельствует о том, что потепление вызывает усиление минерализации органического вещества почв, которая превышает его поступление в почвы. Аналогичная тенденция отмечается и при увеличении потепления на 1.5 °C и 3.0 °C (минус 60.0 МтС и минус 120.0 МтС соответственно).

Неопределенность подсчетов БУЛП является следствием большого количества причин, таких как полнота учета потоков углерода, объективные различия оценки интенсивности потоков в условиях их значительной пространственно-временной изменчивости, использовании различных картографических данных и др. ([Stolbovoi, 2000](#)). Особенности проведенных нами исследований выступают: широкий географический анализ, включающий 48 типов древостоев, 12 отделов почв, покрывающих почти 763.5 млн га почвенного фонда РФ (табл. 1), использование в анализе разнообразных геоинформационных баз данных, характеризующих потоки углеродного обмена в газообразной, жидкой и твердой фазах, использование модели полного углеродного цикла “BIGIN” (уравнения 1–4) лесных экосистем, а также расчеты, выполненные на основе цифровых ГИС-технологий. Применение перечисленного комплекса методов и ГИС баз данных для исследования БУЛП является достаточно уникальным и трудно осуществимым другими исследованиями, включая наиболее продвинутые работы по исследованию бюджета углерода лесов РФ ([Швиденко и др., 2014](#)), а также моделирования (например, [Комаров и др., 2012](#)). Вместе с тем ниже приведено сопоставление, которое позволяет оценить смысловое соответствие полученных нами результатов с данными других исследований в части сопоставления: 1) тенденций изменений БУЛП – CO₂ эмиссия/поглощение (sink/source); 2) полноты разнообразия потоков углерода.

1) Обзор публикаций по рассматриваемой теме показывает, что большинство исследований ([Бобкова др., 2014](#); [Кудяров, 2000](#)) обнаруживают отрицательный БУЛП, что согласуется с полученными нами результатами, т. е. доминирование CO_2 эмиссии (source). Этот вывод также поддерживается особенностями цикла углерода “элювиальных” лесов, в которых прирост биомассы древостоев обеспечивается дополнительным поступлением биофильных элементов при минерализации лесной подстилки ([Пономарева и др., 1972](#)).

В работе Замолодчикова с соавторами ([Замолодчиков и др., 2007](#)) оценивалось среднегодовое изменение запасов углерода в почвах лесов РФ за период 1990 по 2004 гг. В результате наблюдался разнонаправленный (положительный и отрицательный) БУЛП с положительным средним значением 9.6 МтС в год (CO_2 поглощение, sink). Вместе с тем следует подчеркнуть, что полученная авторами величина находится в пределах ошибки подсчетов и не может быть верифицирована с учетом площади лесов и 10%-ным варьированием определения органического вещества в почвах.

2) Все перечисленные исследования не учитывали водную (внутреннюю и поверхностную) миграцию органического вещества, т. е. основываются на неполном перечне потоков углерода и БУЛП. Напомним, что игнорирование водной миграции углерода привело к появлению глобальной проблемы недостающего углеродного пула “Missing Sink”, которая была решена применением метода оценки полного углеродного бюджета ([Nilsson et al., 2000; 2003](#)). В дополнение отметим, что по нашим подсчетам (табл. 2), аккумуляция растворенного органического вещества, в рассматриваемом диапазоне изменений климатических температур, в горизонте Bh весьма значительна и достигает 14 МтС, 48 МтС и 96 МтС в год (табл. 2).

Рассматривая БУЛП, необходимо оценить его возможный вклад в совокупный годовой выброс парниковых газов РФ. По последним данным, последний составляет почти 1.5 ГтС CO_2 -эквивалентов ([Список стран..., 2020](#)). Для перевода баланса углерода в метрических тоннах углерода в единицы CO_2 -эквивалентов используют коэффициент пересчета 3.67. Таким образом, БУЛП

при потеплении климата в базовый и последующие периоды потепления на 1.5 °C и 3.0 °C составит минус 65 МтС-СО₂-экв., минус 220 МтС-СО₂-экв. и минус 440 МтС-СО₂-экв. соответственно. Рассчитанная доля БУЛП от совокупного годового выброса 2020 г. будет равна 4, 13 и 27% соответственно.

Оценивая роль почв в цикле углерода лесных экосистем РФ, необходимо отметить, что интенсификация процесса минерализации почвенного органического вещества (отрицательный БУЛП) приводит, как отмечено выше, к высвобождению дополнительных объемов доступных для древостоев биофильных питательных элементов, т. е. играет роль “удобрительного” эффекта, стимулирующего продукционный процесс фотосинтеза древостоев. Иными словами, отрицательный БУЛП не является показателем усиления СО₂ эмиссии лесными экосистемами РФ. Окончательный вывод можно получить только на основе сопряженного анализа “почва-древостой”. При этом очевидно, что почвы выступают одним из главнейших регуляторов динамики углерода и являются значительным корректирующими фактором оценки поглотительной способности лесных экосистем.

Оценка неопределенности

Ошибка результатов расчетов имеет решающее значение для любых прогнозов и особенно, сделанных на основе математических моделей. В наших расчетах предполагается, что стандартная ошибка оценки БУЛП в органо-профиле суммирует ошибки подсчета балансов углерода морфогенетических горизонтов почв, что описывается уравнением:

$$s(\Sigma) = \sqrt{s_O^2 + s_{A1}^2 + s_{Bh}^2},$$

где s_O, s_{A1}, s_{Bh} – стандартные ошибки подсчета баланса углерода в морфогенетических горизонтах O, A₁ и Bh соответственно.

Расчеты показывают, что общая погрешность оценки БУЛП в базовый период составляет ± 23.0 МтС при уровне достоверности $P = 0.67$. Погрешность расчетов при уровне достоверности $P = 0.95$ будет вдвое больше, соответственно, ± 47 МтС. Величина

ошибки БУЛП для отмеченных уровней достоверности, при повышении температуры на 1.5 °C составит ± 80.0 МтС и ± 160.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно. Величина ошибки БУЛП при повышении температуры на 3.0 °C составит ± 160.0 МтС и ± 320.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно.

ВЫВОДЫ

Продемонстрирована возможность исследования влияния потепления климата на БУЛП на основе геостатистической процессной модели “BIGIN” (**B**iosphere **G**reenhousegas **I**nventory), разработанной для подсчета полного углеродного бюджета России.

Изменения БУЛП в бореальных и умеренно теплых лесах носят разнонаправленный характер. Потепление в бореальных лесах инициирует сдвиг БУЛП в сторону его уменьшения, т. е. наблюдается уменьшение массы лесной подстилки за счет усиления ее минерализации. В умеренно теплых лесах потепление климата инициирует формирование положительного БУЛП, т. е. отмечается накопление лесной подстилки.

В горизонте “О” почв бореальных лесов суммарное уменьшение БУЛП составляет минус 101.4 МтС. В условиях дальнейшего потепления климата на 1.5 °C и 3 °C суммарное уменьшение БУЛП в горизонте “О” составит 345.7 МтС и 691.4 МтС соответственно.

В горизонте “О” почв умеренно теплых лесов потепление климата в базовый период и в дальнейшем приводит к развитию суммарного положительного БУЛП, т. е. накоплению углерода 62.4 МтС, 212.8 МтС и 425.4 МтС соответственно.

Показано, что потепление климата на 0.4 °C в базовый период времени (1990 $\pm$ 5 гг.) инициировало общий отрицательный БУЛП РФ (минус 17.6 МтС). Отрицательный БУЛП также отмечается при дальнейшем потеплении климата на 1.5 °C и 3.0 °C, что составит минус 60.0 МтС и минус 120.0 МтС или минус 65 МтС-СО₂-экв., минус 220 МтС-СО₂-экв. и минус 440 МтС-СО₂-экв. соответственно. Рассчитанная доля общего БУЛП от совокупного годового выброса 2020 г. будет равна 4%, 13% и 27% соответственно.

Наиболее значимые изменения БУЛП отмечаются для верхнего органогенного горизонта “О”. Эти изменения носят отрицательный характер для базового периода времени – минус 39.0 МтС. Отрицательный БУЛП в горизонте “О” отмечается и при увеличении потепления на 1.5 °C и 3.0 °C (минус 133 и минус 265.9 МтС соответственно).

В почвах бореальных и умеренно теплых лесов интенсификация углеродного цикла при потеплении климата сопровождается увеличением содержания углерода в гумусово-аккумулятивном горизонте “А₁”. В базовом периоде времени отмеченное увеличение составило 7.3 МтС. При потеплении на 1.5 °C и 3.0 °C содержание углерода в горизонте А₁ составило почти 24.9 МтС и 49.8 МтС.

Потепление климата также инициирует активизацию иллювиально-гумусового процесса. Суммарно в базовом временном периоде и дальнейшем потеплении климата (1.5 °C и 3.0 °C) БУЛП в горизонте “Bh” увеличился на 14.1 МтС, 48.1 МтС и 96.1 МтС соответственно.

Отрицательный БУЛП не является показателем усиления CO₂ эмиссии лесами РФ как экосистемами. Минерализация лесной подстилки способствует высвобождению биофильных элементов и выполняет роль “удобряющего” фактора, способствующего приросту растительной биомассы. Окончательный вывод об объеме CO₂ эмиссии лесами РФ можно получить только при анализе лесной экосистемы при проведении сопряженного анализа “почва-древостой”.

Погрешность оценки БУЛП в базовый период времени составляет ± 23.0 МтС при уровне достоверности $P = 0.67$. Погрешность расчетов при уровне достоверности $P = 0.95$ будет вдвое больше, соответственно, ± 47 МтС. Величина ошибки БУЛП, для отмеченных уровней достоверности при повышении температуры на 1.5 °C составит ± 80.0 МтС и ± 160.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно. Величина ошибки БУЛП при повышении температуры на 3.0 °C составит ± 160.0 МтС и ± 320.0 МтС при уровнях достоверности $P = 0.67$ и $P = 0.95$ соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В.* Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
3. *Глазовская М.А.* Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: изд-во “Лиبرком”, 2009. 336 с.
4. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 г. URL: <http://www.ecogosedoklad.ru/>.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
6. *Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация заболоченных почв Нечерноземной зоны РСФСР. М.: Изд-во Колос, 1981. 168 с.
7. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л.* Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–34.
8. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Изд-во Колос, 1977. 224 с.
9. *Комаров А.С., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Безрукова М.Г., Чертов О.Г.* Моделирование динамики органического вещества и элементов почвенного питания в минеральной почве и лесной подстилке // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. № 1. С. 162–176. URL: [http://www.matbio.org/2012/Komarov2012\(7_162\)](http://www.matbio.org/2012/Komarov2012(7_162)).
10. *Кудеяров В.Н.* Вклад почвы в баланс CO₂ атмосферы // Докл. РАН. 2000. Т. 375. № 2. С. 275–277.
11. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 21.07.2014) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2015). URL: <http://leskod.ru>.
12. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / *Эдельгериев Р.С.-Х.* (ред.). Том 2. М.: ООО “Издательство МВА”, 2019. 476 с.
13. *Пономарева В.В., Плотникова Н.С.* Закономерности миграции и аккумуляции элементов в подзолистых почвах (лизиметрические измерения) // Биогеохимические процессы в подзолистых почвах. Л.: Наука. Ленингр. Отделение, 1972. С. 6–65.
14. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в Арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.

15. Список стран по эмиссии CO₂. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список стран по эмиссии CO₂](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_эмиссии_CO2).
16. Столбовой В.С. Единый государственный реестр лесных почв России // Известия РАН: серия Географическая. 2018. № 6. С. 102–109.
17. Столбовой В.С., Нильсон С., Швиденко А.З., МакКаллум И. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. Часть 3. Биогеохимические потоки углерода // Экология. 2004. № 3. С. 179–184.
18. Фридланд В.М. Основные принципы и элементы базовой классификации почв, и программа работ по ее созданию. М.: ВАСХНИЛ, 1982. 151 с.
19. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
20. Kramer J.R. Old sediment carbon in global budgets. In: Soil responses to climate change. NATO ASI Series. Series I: Global Environment Change. Rounsevell M.D.A., P.J. Loveland (Eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014. Vol. 23. P. 169–186.
21. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia. Interim Report IR-00-021. Austria: Laxenburg, 2000. 180 p.
22. Nilsson S., Jonas M., Stolbovoi V., Shvidenko A., Obersteiner M., McCallum I. The Missing “Missing Sink” // Forestry Chronicle. 2003. Vol. 79. P. 1071–1074.
23. Stevenson F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley & Sons, 1994. 281 p.
24. Stolbovoi V. Soil Carbon in the Forests of Russia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. Vol. 11. P. 203–222.
25. Stolbovoi V. Carbon Pools in Tundra Soils of Russia: Improving Data Reliability. In: Global Climate Change and Cold Regions Ecosystems. Lal R., Kimble J.M., Stewart B.A. (Eds). Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. P. 39–58.
26. Stolbovoi V., McCallum I. Land resources of Russia. CD-ROM. IIASA. Moscow, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, 2002. URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm.
27. Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // Climatic Change. 2002. Vol. 55. Iss. 1–2. P. 131–156.
28. Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia. In: Soil Carbon. Progress in Soil Science. A.E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.). 2014. P. 381–391. DOI [10.1007/978-3-319-04084-4_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38).
29. The Fifth National Communication of Russian Federation: 2010. URL: http://unfccc.int/resource/docs/natc/rus_nc5_resubmit.pdf.

30. Thurman E.M. Humic substances in groundwater. In: Humic substances in Soil, Sediment and Water: Geochemistry, Izolation and Characterization. Alken G.R., Mcknight D.M., Wershaw R.L., Maccarthy P. (Eds). New York: John Wiley & Sons, 1985. P. 87–104.
31. UN World Meteorological Organization. URL:
<https://public.wmo.int/en/our-mandate>.

REFERENCES

1. Bazilevich N.I., *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* (Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia), Moscow: Nauka, 1993, 293 p.
2. Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V., *Dinamika sodержaniya ugleroda organicheskogo veshchestva v srednetaezhnykh el'nikakh na avtomorfnykh pochvah* (Dynamics of carbon content of organic matter in middle taiga spruce forests on automorphic soils), St. Petersburg: Nauka, 2014, 270 p.
3. Glazovskaya M.A., *Pedolitogenez i kontinental'nye tsikly ugleroda* (Pedolithogenesis and continental carbon cycles), Moscow: izd-vo "Librkom", 336 p.
4. Gosudarstvennyy doklad o sostojanii i ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2013 godu (State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2013), URL: <http://www.ecogosdoklad.ru/>.
5. *Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* (Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0), Moscow: Pochvennyi institut im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 768 p.
6. Zaidel'man F.R., *Melioratsiya zabolochennykh pochv Nechernozemnoi zony RSFSR* (Reclamation of waterlogged soils of the Nonchernozem zone of the RSFSR), Moscow: Izd-vo Kolos, 1981, 168 p.
7. Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Gitarskii M.L., Byudzhet ugleroda upravlyaemykh lesov Rossiiskoi Federatsii (Carbon budget of managed forests in the Russian Federation), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 23–34.
8. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* (Classification and diagnostics of soils of the USSR), Moscow: Izd-vo Kolos, 1977, 224 p.
9. Komarov A.S., Khoras'kina Yu.S., Bykhovets S.S., Bezrukova M.G., Chertov O.G., Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva i elementov pochvennogo pitaniya v mineral'noi pochve i lesnoi podstilke (Modeling the dynamics of organic matter and soil nutrition elements in mineral soil and forest litter), *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*,

2012, Vol. 7, No. 1, pp. 162–176, URL:

[http://www.matbio.org/2012/Komarov2012\(7_162\).](http://www.matbio.org/2012/Komarov2012(7_162).)

10. Kudayarov V.N., Vklad pochvy v balans CO₂ atmosfery (Contribution of soil to atmospheric CO₂ balance), *Dokl. RAN*, Vol. 375, No. 2, pp. 275–277.

11. *Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 04.12.2006 N 200-FZ (red. ot 21.07.2014)(s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2015)* (Forest Code of the Russian Federation of December 4, 2006 N 200-FZ (as amended on July 21, 2014) (as amended and supplemented, effective from March 1, 2015)), URL: <http://leskod.ru>.

12. Edel'geriev R.S.-Kh. (Ed.), *Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)"* (National report "Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)"), Vol. 2, Moscow: OOO "Izdatel'stvo MVA", 2019, 476 p.

13. Ponomareva V.V., Plotnikova N.S., Zakonomernosti migratsii i akkumulyatsii elementov v podzolistykh pochvakh (lizimetricheskie izmereniya) (Patterns of migration and accumulation of elements in podzolic soils (lysimetric measurements), In: *Biogeokhimicheskie protsessy v podzolistykh pochvakh* (Biogeochemical processes in podzolic soils), Leningrad: Nauka. Leningr. Otdelengie, 1972, pp. 6–65.

14. Romankevich E.A., Vetrov A.A., *Tsikl ugleroda v Arkticheskikh moryakh Rossii* (The carbon cycle in the Arctic seas of Russia), Moscow: Nauka, 2001, 302 p.

15. *List of countries by CO₂ emission*, URL:

https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_эмиссии_CO2.

16. Stolbovoi V.S., Edinyi gosudarstvennyi reestr lesnykh pochv Rossii (Unified State Register of Forest Soils of Russia.), *Izvestiya RAN, seriya Geograficheskaya*, 2018, No. 6, pp. 102–109.

17. Stolbovoi V.S., Nil'son S., Shvidenko A.Z., MakKallum I., Opyt agregirovannoi otsenki osnovnykh pokazatelei bioproduktsionnogo protsessa i uglerodnogo byudzheta nazemnykh ekosistem Rossii. Chast' 3. Biogeokhimicheskie potoki ugleroda (Aggregated assessment of the main indicators of the bioproduction process and the carbon budget of terrestrial ecosystems in Russia. Part 3. Biogeochemical carbon fluxes), *Ekologiya*, 2004, No. 3, pp. 179–184.

18. Fridland V.M., *Osnovnye printsipy i elementy bazovoi klassifikatsii pochv, i programma rabot po ee sozdaniyu* (Basic principles and elements of the basic classification of soils, and a work program for its creation), Moscow: VASKhNIL, 1982, 151 p.

19. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Uglerodnyi byudzhets lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.
20. Kramer J.R., Old sediment carbon in global budgets, In: *Soil responses to climate change. NATO ASI Series. Series I: Global Environment Change*, Rounsevell M.D.A., P.J. Loveland (Eds), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, Vol. 23, pp. 169–186.
21. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M., *Full carbon account for Russia*, Interim Report IR-00-021, Austria: Laxenburg, 2000, 180 p.
22. Nilsson S., Jonas M., Stolbovoi V., Shvidenko A., Obersteiner M., McCallum I., The Missing “Missing Sink”, *Forestry Chronicle*, 2003, Vol. 79, pp. 1071–1074.
23. Stevenson F.J., *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*, New York: John Wiley & Sons, 1994, 281 p.
24. Stolbovoi V., Soil Carbon in the Forests of Russia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, Vol. 11, pp. 203–222.
25. Stolbovoi V., Carbon Pools in Tundra Soils of Russia: Improving Data Reliability, In: *Global Climate Change and Cold Regions Ecosystems*, Lal R., Kimble J.M., Stewart B.A. (Eds), Boca Raton: CRC Press LLC, 2000, pp. 39–58.
26. Stolbovoi V., McCallum I., *Land resources of Russia. CD-ROM. IIASA*. Moscow, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, 2002, URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm.
27. Stolbovoi V., Carbon in Russian soils, *Climatic Change*, 2002, Vol. 55, Iss. 1–2, pp. 131–156.
28. Stolbovoy V., Ivanov A., Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia, In: *Soil Carbon. Progress in Soil Science*, A.E. Hartemink, K. McSweeney (Eds), 2014, pp. 381–391, DOI [10.1007/978-3-319-04084-4_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38).
29. The Fifth National Communication of Russian Federation: 2010, URL: http://unfccc.int/resource/docs/natc/rus_nc5_resubmit.pdf.
30. Thurman E.M., Humic substances in groundwater, In: *Humic substances in Soil, Sediment and Water: Geochemistry, Izolation and Characterization*, Alken G.R., Mcknight D.M., Wershaw R.L., Maccarthy P. (Eds), New York: John Wiley & Sons, 1985, pp. 87–104.
31. UN World Meteorological Organization. URL: <https://public.wmo.int/en/our-mandate>.