

В.А. Усольцев, В.Ф. Ковязин, И.С. Цепордей

**ТЕКУЩЕЕ НАКОПЛЕНИЕ УГЛЕРОДА
В ЛЕСАХ ДВУХ ЭКОРЕГИОНОВ РОССИИ**

Введение. В последние годы в мире наметился переход к низкоуглеродной экономике с целью предотвратить глобальное изменение климата. Мировые леса являются основным стабилизирующим элементом климатической системы земли, обеспечивая сток углерода в растительный покров [Pan et al., 2011; Швиденко, Щепашенко, 2014]. Россия как полноправный член Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Парижского соглашения взяла на себя обязательство к 2030 г. ограничить выбросы парниковых газов на уровне 70–75% от уровня 1990 г. при условии максимальной поглощающей способности лесов [Аналитический доклад, 2016]. Страны, являющиеся сторонами РКИК ООН, обязаны готовить и представлять национальные доклады с целью оценки уровня углеродного запаса в своих странах.

Современное глобальное потепление климата, вызванное антропогенным повышением концентраций парниковых газов в атмосфере, привело к стремительному росту числа научных исследований, посвященных оценке углеродного цикла и других климатообразующих функций лесного покрова. Существуют два общепринятых подхода к расчету древесной биомассы, включенной в углеродный цикл. Первый основан на применении аллометрических уравнений, второй – на использовании конверсионных коэффициентов биомассы (ККБ) (Biomass Expansion Factor – BEF). ККБ определяется как отношение общей биомассы древостоя (включая надземную, подземную и нижний ярус) к запасу стволовой древесины. Сопоставление названных двух методов применительно к лесам России, Словакии и Испании показало близкие результаты [Уткин и др., 1997; Konôpka et al., 2011; González-García et al., 2013].

Предлагаются ККБ в виде среднего значения для древесного вида [Макаревский, 1991; Исаев и др., 1993; Van Camp et al., 2004; Durkaya et al., 2020] или в виде зависимости от возраста древостоя [Замолотчиков и др., 1998; Lehtonen et al., 2007; Van Den Berge et al., 2021], или от запаса стволовой древесины [Guo et al., 2010; Tang et al., 2016], или от нескольких так-

сационных показателей, получаемых в процессе лесоинвентаризации [Shvidenko et al., 2007; Усольцев и др., 2008, 2011; Teobaldelli et al., 2009; González-García et al., 2013].

Опубликованные в последние годы оценки стока углерода в леса России варьируют от 100 до 600 Мт С в год [Моисеев, Алябина, 2007; Замоладчиков и др., 2007; Ваганов и др., 2005; Моисеев, Филипчук, 2009; Shvidenko et al., 2010a, 2011], что означает возможность смещений, превышающих абсолютные значения оценок [Замоладчиков и др., 2011]. Лесные пожары на территории России существенно снижают фактический сток углерода в российские леса [Goodale et al., 2002; Швиденко, Щепашенко, 2013]. Кроме того, обнаруживаются противоречивые тренды компонентного состава биомассы лесов в связи с изменением климата [Lapenis et al., 2005]. Как утверждают Р. Хафтон с соавторами [Houghton et al., 2009], представления авторов об изменениях биомассы растительного покрова планеты остаются еще во многих отношениях рудиментарными.

Оценка углеродного бюджета лесов должна быть полной и верифицированной [Nilsson et al., 2007; Швиденко, Щепашенко, 2014]. Она должна включать все классы лесных земель и всё разнообразие экосистем. Однако полный углеродный бюджет представляет типичную нечеткую систему (fuzzysystem) вследствие неполноты наших знаний и невозможности верификации результатов [Nilsson et al., 2007]. Согласно Руководству по эффективной практике землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (МГЭИК (межправительственная группа экспертов по изменению климата), 2003), национальная отчетность об изменениях углерода в запасах древесной биомассы может быть проведена дефолт-методом, т. е. по разнице между ростом и его потерями (рубки, естественный отпад и природные катаклизмы) [Charin et al., 2005; Stinson et al., 2011; Замоладчиков и др., 2011; Швиденко, Щепашенко, 2014]. В качестве альтернативы эти изменения могут быть рассчитаны по изменению запасов между двумя последовательными инвентаризациями [Гитарский и др., 2006; Замоладчиков и др., 2007; Petersson et al., 2012]. Хотя правомерность второго метода ставилась под сомнение [Моисеев, Филипчук, 2009], результаты оценок депонирования углерода лесами России по названным двум методам за период 1988-2005 гг. оказались довольно близки (93 Мт С год⁻¹ против 109 Мт С год⁻¹) [Замоладчиков и др., 2011]. Авторы отмечают, что после 2007 г. (когда была ликвидирована система Государственного учета лесного фонда – ГУЛФ), применение второго метода при оценке депонирования углерода в лесах России стало невозможно [Замоладчиков и др., 2011].

Цель и методика исследований. В нашем исследовании предпринята попытка оценить изменение углеродного пула на покрытых лесом площадях за 20–25-летний период на примере двух экорегионов России, представленных таежной и лесостепной зонами. Углерод почв и сельскохозяйственных угодий не учитывался.

В России основной административной единицей ГУЛФ до 2006 г. было государственное лесохозяйственное предприятие (лесхоз). Покрытая лесом площадь каждого лесхоза расчленялась на относительно однородные инвентаризационные единицы (выделы) площадью от 3 до 5 га в Европейской России до более чем 50 га в Сибири. Каждые 10–12 лет на этих выделах проводилась наземная таксация и определялись породный состав, средний диаметр стволов на высоте груди, высота древостоя, сумма площадей сечений, стволовый запас и класс бонитета [Lapenis et al., 2005; Shvidenko et al., 2007].

Данные инвентаризации выделов хранились в лесоустроительных предприятиях, а для ведения хозяйства в лесхозах эти данные группировались по породам, группам возраста и запасам стволов (табл. 1). Определение биомассы древостоев в задачи лесоинвентаризации не входило. После введения в действие нового Лесного кодекса в 2006 г. система лесоинвентаризации была разрушена [Швиденко, Щепаченко, 2011].

В исследовании авторов таёжная и лесостепная зоны представлены соответственно Пермским краем и Оренбургской областью (рис. 1), в которых авторы предприняли попытку оценить накопление лесной биомассы в течение периода, предшествующего разрушению системы лесоинвентаризации, т. е. с 1987 по 2007 гг. в Пермском крае (20 лет) и с 1982 по 2007 гг. в Оренбургской области (25 лет). Система ГУЛФ в Российских лесах давала заниженные оценки запасов древесины на 13% [Kinnunen et al., 2007] и по другим источникам – до 15% [Shvidenko et al., 2010b]. Поскольку оценка выполняется по разности запасов за определенный промежуток времени, это занижение не должно сказываться на точности результатов.

В Пермском крае среднегодовая температура воздуха составляет +1,3 °С. Среднегодовое количество осадков изменяется в направлении с юго-запада на северо-восток от 450 до 1000 мм. В Оренбургской области среднегодовая температура воздуха колеблется от +2,5 °С на севере до +4,5 °С на юге. Среднегодовое количество осадков изменяется от 450 мм на северо-западе до 350 мм на юге и юго-востоке [Ефимов, 1999]. Оренбургская область расположена в лесостепной подзоне, являющейся типичным экотонном между тайгой и степью [Коломыц, 1988, 2005; Kolomyts, 2012; Tölgyesi et al., 2017, 2018; Erdős et al., 2018]. Для него характерно

наличие конкуренции между лесной и степной растительностью, которая описывается явлением гистерезиса (триггера), или скачкообразного перехода из одного устойчивого состояния в другое [Арманд, 1989; Арманд, Ведюшкин, 1989; Ведюшкин, 1989, 1992]. В этом состоянии меняются роли тепла и влаги как лимитирующих факторов биологической продуктивности. В таежной зоне биологическая продуктивность повышается за счет увеличения теплоснабжения, а в степной – за счет увеличения влагообеспеченности. В таежной зоне рост влагообеспеченности приводит к снижению биологической продуктивности, а в степной – наоборот, к ее увеличению [Базилевич и др., 1986].

Данные Государственного учета лесного фонда в 2007 г. для Веслянского лесхоза Пермского края: первая цифра – покрытая лесом площадь, га; вторая цифра – средний запас стволовой древесины в совокупности полигонов данной группы возраста, м³/га; третья цифра – общий запас стволов, тыс. м³

Data from the State Forest Inventory in 2007 for Veslyanskiy Leskhoz of Perm Krai: the first digit - forest-covered area, ha; the second digit – the average stock of trunk wood in the set of polygons of a given age group, m³/ha; the third digit - the total stock of trunks, thousand m³

Порода	Возраст древостоя, лет*					Итого
	10(5)	30(15)	60(30)	80(40)	100(50) и более	
Сосна	55761/20,2	183266/59,7	93695/138,8	10053/168,0	40794/140,5	383569/84,7/32497,4
Ель	16802/14,0	22156/48,4	11856/130,5	4346/156,4	104273/167,1	159433/131,4/20957,4
Лиственница	–	37/100,0	–	–	244/143,4	281/137,7/38,7
Береза	14535/11,6	10277/38,1	39216/118,1	15031/200,9	9732/183,5	88791/112,6/9997,1
Осина	922/20,1	377/60,5	101/99,0	293/136,9	2694/242,1	4387/169,5/743,5
Итого	88020/17,6	216113/57,6	144868/132,5	29723/182,6	157737/162,5	636461/100,9/64234,1

Примечание. *10...100 – возраст хвойных пород, (5)...(50) – возраст мелколиственных пород.

Для оценки углероддепонирующей способности лесов Урала и прилегающих к нему регионов на основе опубликованных работ сформирована база данных о структуре биомассы лесообразующих пород. В нее вошли материалы 1357 пробных площадей, в том числе для: *Pinussylvestris* L. – 326, *Piceaobovata* Ldb. – 71, *Abiessibirica* Ldb. – 52, *Larix Sukaczewii* N. Dyl. – 176, *Pinussibirica* Du Tour. – 73, *Betulaalba* L. – 172, *Populustremula* L. – 81, *Alnusincana* (L.) Moenchi *Alnusglutinosa* (L.) Gaern. – 64, *Tiliacorida* Mill. – 215 и *Quercusrobur* L. – 127.



Рис. 1. Положение Пермского края и Оренбургской области на карте России

Fig. 1. The position of Perm Krai and Orenburg Oblast on the map of Russia

На основе сформированной базы данных для каждой древесной породы рассчитаны регрессионные модели, имеющие общий вид:

$$\ln(BEF) = f[\ln A, (\ln A)^2, \ln M], \quad (1)$$

где BEF – отношение компонентов биомассы (P_i , $t \cdot ga^{-1}$) к запасу стволовой древесины (M , $m^3 \cdot ga^{-1}$); P_i включает в себя P_S , P_F , P_B , P_R и P_U – соответственно биомассу у стволов, листьев, ветвей, корней и нижнего яруса, $t \cdot ga^{-1}$; A – возраст древостоя, лет; M – запас древесины, $m^3 \cdot ga^{-1}$. Рассчитанные модели (1) опубликованы в работах [Усольцев, 2007; табл. 4.22] и [Усольцев, 2018; табл. 2.1] и здесь не приводятся вследствие большого объема. Модели статистически значимы на уровне $p < 0,05$, их коэффициенты детерминации варьируют в диапазоне от 0,99 до 0,29.

Таблицы-матрицы, подобные табл. 1, составлены для каждого из 32 лесхозов Пермского края и 27 лесхозов Оренбургской области. Табулированием моделей (1) по запасу M и возрасту A рассчитаны величины P_i для каждого лесхоза, взвешенные по классам возраста, запасу стволовой древесины и долевого участию каждой древесной породы. Полученные значения умножали на лесопокрытую площадь в каждой ячейке таблиц-матриц и суммировали. Последовательность операций по совмещению моделей (1) с

данными ГУЛФ была показана ранее [Усольцев и др., 2008; Усольцев, 2018]. Автоматизированная версия расчетов дана в работе [Усольцев и др., 2011]. Абсолютно сухая масса всех фракций пересчитана на массу углерода по переводному коэффициенту, равному 0,5 [Matthews, 1993].

Результаты и их обсуждение. В результате проведенного совмещения моделей (1) с данными ГУЛФ установлено, что за 20 лет (с 1987 по 2007 год) в Пермском крае общий запас углерода в биомассе покрытых лесом площадей увеличился с 458,5 до 479,2 млн т или на 5%. В Оренбургской области за 25 лет (с 1982 по 2007 год) запас углерода возрос с 14,6 до 20,3 млн т или на 39%. В Пермском крае возрастание произошло за счет увеличения покрытой лесом площади и увеличения запасов приспевающих и спелых древостоев. В Оренбургской области прирост депонирования углерода произошел на 11% за счет увеличения покрытой лесом площади и на 89% – за счет увеличения запасов древесины в молодняках, представленных, главным образом, культурами на 20–30% лесопокрытой площади.

Авторы считают важным последний результат, полученный для Оренбургской области. Его специфика заключается в том, что, во-первых, регион расположен на экотоне между тайгой и степью, и, во-вторых, значительная часть его территории занята культурами, большую доля которых представлена молодняками. Известно, что в суровых условиях произрастания возможности лесоразведения значительно снижаются, когда продуктивность древостоев связана с высоким риском природных катаклизмов [Mansuy et al., 2013; Sharma et al., 2013]. Прежде чем рассматривать роль лесонасаждений в смягчении последствий изменения климата, необходима информация о взаимосвязи между продуктивностью местообитаний и рисками, связанными с пожарами и засухами. В противном случае лесоразведение может оказаться бесперспективным [Уткин, 2001; Mansuy et al., 2013; Sharma et al., 2013]. Расчеты авторов показали, что, несмотря на существующие риски стихийных бедствий в лесостепном экотоне [Kharuk et al., 2018; Erdős et al., 2018], за четверть века наблюдается значительный рост депонируемого углерода в лесном покрове двух экорегионов.

Показатели углеродного пула во всех лесхозах сгруппированы по трем градам и представлены в виде карт-схем (рис. 2 и 3). Очевиден сдвиг уровней углеродного пула в Пермском крае в восточном направлении, т. е. в направлении западных предгорий Урала (рис. 2). Сдвиг уровней углеродного пула в Оренбургской области произошел в направлении с севера на юг, т. е. от южной подзоны тайги к степи (рис. 3).

Вследствие игнорирования изменений углеродного пула почв за последние четверть века, полученные результаты можно считать в качестве предварительных. Тем не менее, увеличение углеродного пула в двух экорегионах России в диапазоне от 5 до 39% сопоставимо с оценкой аналогичного показателя для лесов Финляндии на уровне 29%, рассчитанного по аналогичной методике изменения запасов стволовой древесины за период с 1922 по 2004 гг. [Liski et al., 2006].

Результаты авторов сопоставимы также с оценкой изменения углеродного пула в лесах Китая за период с 1984 по 2003 гг., которое определялось по аналогичной методике разности запасов древесины за отмеченный период. Это увеличение составило для бореальных лесов 17% и для листопадных пород зоны умеренных лесов 30% [Guo et al., 2010]. Для всех лесов Китая за тот же период названный метод оценки показал увеличение углеродного пула на 45% [Xu et al., 2007] и на 37% [Fang et al., 2007], а за период с 1988 по 1993 гг. – на 8% [Pan et al., 2004]. Для субэкваториальной зоны Китая это увеличение с 1989 по 2003 гг. составило 17% [Yang, Guan, 2008]. Для всех лесов Японии аналогичное увеличение за полвека (с 1947 по 1995 гг.) составило 68% [Fang et al., 2005].

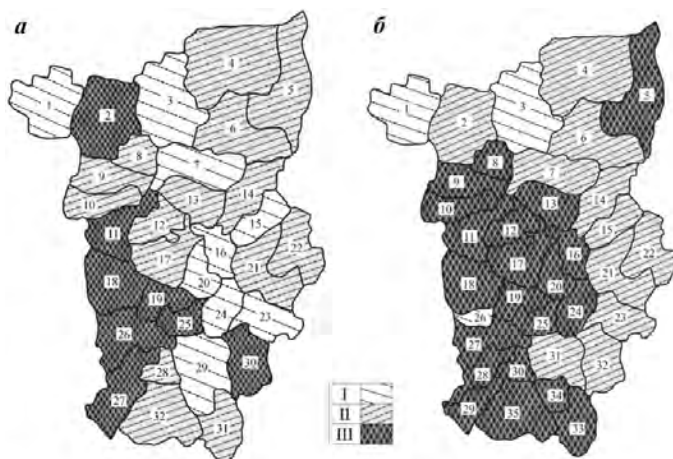


Рис. 2. Распределение запасов углерода в фитомассе насаждений Пермского края; а – 1988 г.; б – 2007 г. Градации: I – 27–40; II – 41–50; III – 51–70 т·га⁻¹. Цифрами обозначены номера лесхозов

Fig. 2. Distribution of carbon stocks in the stands of the Perm Region; а – 1988; б – 2007. Gradations: I – 27–40; II – 41–50; III – 51–70 tons·ga⁻¹. Numbers indicate numbers of forestries

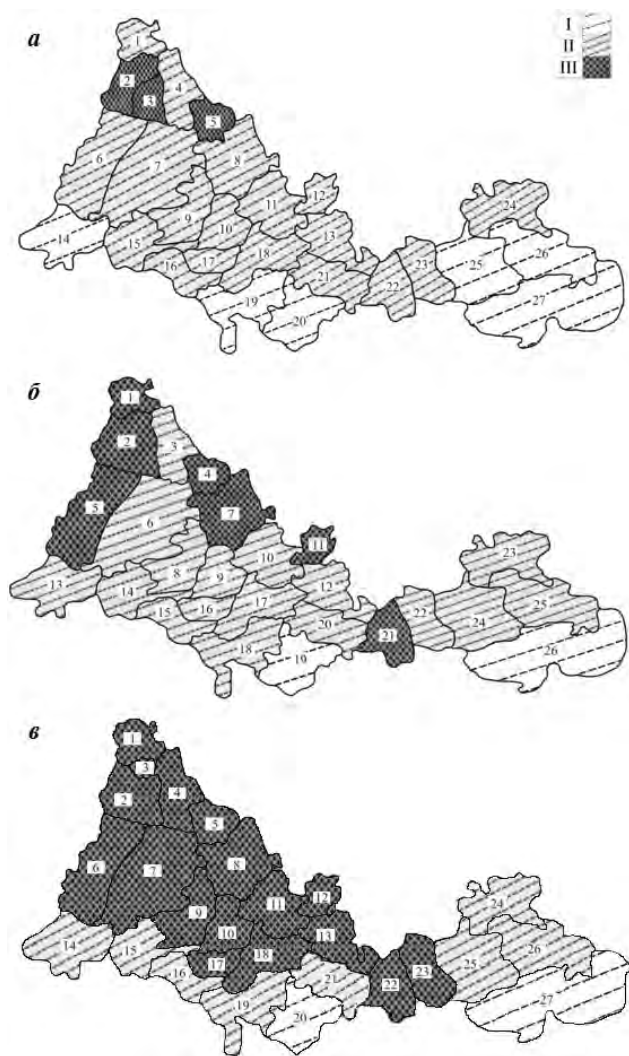


Рис. 3. Распределение запасов углерода в фитомассе насаждений Оренбургской области; а – 1982 г.; б – 1993 г.; в – 2007 г. Градации: I – 0,5–10; II – 11–37; III – 38–42 т·ога⁻¹. Цифрами обозначены номера лесхозов.

Fig. 3. Distribution of carbon stocks in phytomass of plantations of the Orenburg Region: а – 1982; б – 1993; в – 2007. Gradations: I – 0,5–10; II – 11–37; III – 38–42 t·ha⁻¹. Numbers are marked numbers of forestries

Но результаты авторов не сопоставимы с результатами, полученными для лесов России за период с 1988 по 2005 г. по дефолт-методу, т. е. с учетом приходной и расходной составляющих. Согласно расчетам по дефолт-методу, сток углерода в леса России за означенный период увеличился в три раза [Замолодчиков и др., 2011].

Как уже упоминалось выше, полный углеродный бюджет лесов представляет нечеткую систему вследствие неполноты наших знаний и невозможности верификации результатов [Nilsson et al., 2007; Shvidenko et al., 2010b]. Если верификация эмпирических моделей биомассы (или ККБ) в принципе возможна при использовании независимых выборок [Lau et al., 2019], то верификация данных ГУЛФ в принципе невозможна, хотя попытки их коррекции предпринимались [Алексеев, Марков, 2003].

Поэтому вопрос верификации изложенных результатов накопления углерода в двух экорегионах России может касаться лишь корректности предложенного авторами расчетного алгоритма. Если один и тот же результат получают при использовании двух совершенно разных методов, то вывод о корректности обоих методов более близок к реальности, чем вывод о некорректности обоих. Был случай, когда при оценке чистой биомной продукции лесов России были применены три метода, каждый из которых обладал своими недостатками. Тем не менее, полученные результаты были близки (615, 662 и 554 Тг С год⁻¹) [Dolman et al., 2012].

По одним и тем же данным ГУЛФ России по состоянию на 2007 г. были выполнены расчеты углеродного пула в Уральском регионе на площади 62 млн га, как по изложенному выше методу, так и по методу, разработанному в Международном институте прикладного системного анализа (IIASA, Австрия). Оказалось, что результаты, полученные по двум разным методам, различаются всего на 3% [Shvidenko et al., 2010b]. Это дает основание считать, что полученные значения депонирования углерода в двух экорегионах России близки к реальности, хотя остается неопределенность, связанная с качеством данных ГУЛФ и депонированием углерода в почвах.

Выводы

1. Из двух наиболее распространенных методов оценки депонирования углерода – по аллометрическим уравнениям и конверсионным коэффициентам – для лесов России в силу специфики ГУЛФ применим только второй из них.
2. Метод оценки депонирования углерода за некоторый календарный период по разности запасов стволовой древесины обладает недостатками,

связанными с неточными оценками запасов при лесоинвентаризации. Однако дефолт-метод может давать существенное завышение оценок депонируемого углерода.

3. Выполненные авторами оценки депонирования углерода в лесах двух экорегионов России за период 20–25 лет показали, что в зоне тайги его величина существенно меньше (5%) по сравнению с зоной лесостепи (39%). В таежной зоне возрастание депонирования углерода произошло за счет увеличения покрытой лесом площади и увеличения запасов приспевающих и спелых древостоев. В лесостепной зоне прирост депонирования углерода произошел на 11% за счет увеличения покрытой лесом площади и на 89% – за счет увеличения запасов древесины в молодняках, представленных, главным образом, культурами на 20-30% лесопокрытой площади. Основное увеличение депонирования углерода в лесостепной зоне произошло вследствие высокой доли молодняков в начале анализируемого периода, обладающих повышенным приростом по отношению к спелым древостоям.

Библиографический список

Алексеев В.А., Марков М.В. Статистические данные о лесном фонде и изменение продуктивности лесов России во второй половине XX века. СПб.: Санкт-Петербургский лесной экологический центр, 2003. 272 с.

Аналитический доклад «Риски реализации Парижского климатического соглашения для экономики и национальной безопасности России». М.: Институт проблем естественных монополий, 2016. 114 с.

Арманд А.Д. Гомеостазис экосистем // Экосистемы в критических состояниях. М.: Наука, 1989. С. 10-23.

Арманд А.Д., Ведюшкин М.А. Триггерные геосистемы. М.: Ин-т географии АН СССР, 1989. 51 с.

Базилевич Н.И., Гребенчиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.

Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онуцин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. 2005. № 2. С. 631–649.

Ведюшкин М.А. Гистерезис в конкурентных системах // Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Ин-т географии АН СССР, 1989. С. 215-225.

Ведюшкин М.А. Моделирование пространственных переходов между фитоценозами // Математическое моделирование популяций растений и фитоценозов. М.: Наука, 1992. С. 24–30.

Гитарский М.Л., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Карабань Р.Т. Эмиссия и поглощение парниковых газов в лесах России в связи с выполнением обязательств по климатической конвенции ООН // Лесоведение. 2006. № 6. С. 34–44.

Ефимов А.И. Климат // Географический атлас Оренбургской области. М.: Изд-во ДИК, 1999. С. 32-35.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.

Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–34.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. № 3. С. 84–93.

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. 51–66.

Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность: атлас-монография. М.: Наука, 2005. 389 с.

Коломыц Э.Г. Экотон как объект физико-географического исследования // Известия АН СССР. Серия географическая. 1988. № 5. С. 24–36.

Макаревский М.Ф. Запасы и баланс органического углерода в лесных и болотных биогеоценозах Карелии // Экология. 1991. № 3. С. 3–10.

Моисеев Б.Н., Алябина И.О. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 1–12.

Моисеев Б.Н., Филиппук А.Н. Методика МГЭИК для расчета годичного депонирования углерода и оценка ее применимости для лесов России // Лесное хозяйство. 2009. № 4. С. 11–13.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>

Усольцев В.А. Депонирование углерода лесами Уральского региона России (по состоянию Государственного учета лесного фонда на 2007 год). Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2018. 265 с. DOI: 10.1111/gcb.14904. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162319276.pdf>

Усольцев В.А., Воронов М.П., Часовских В.П. Чистая первичная продукция лесов Урала: методы и результаты автоматизированной оценки // Экология. 2011. № 5. С. 334–343. DOI: 10.1134/S1067413611050122.

Усольцев В.А., Терехов Г.Г., Канунникова О.В. Депонирование углерода лесами Уральского федерального округа // Сибирский экологический журнал. 2008. № 3. С. 371–380. DOI: 10.1134/S1995425508030028].

Уткин А.И. О возможной динамике лесной растительности в экотонах Северной Евразии при глобальном потеплении // Классификация и динамика лесов Дальнего Востока: матер. Междунар. конф. Владивосток, 2001. С. 125–127.

Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Нефедьев В.В., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И., Гамбург С.П. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов // Лесоведение. 1997. № 5. С. 51–66.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 1913. № 5. С. 50–61.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Что мы знаем о лесах России сегодня? // Лесная таксация и лесоустройство. 2011. № 1-2. С. 153–172.

Chapin F.S., Woodwell G.M., Randerson J.T., Rastetter E.B., Lovett G.M., Baldocchi D.D., Clark D.A., Harmon M.E., Schimel D.S., Valentini R., Wirth C., Aber J.D., Cole J.J., Goulden M.L., Harden J.W., Heimann M., Howarth R.W., Matson P.A., McGuire A.D., Melillo J.M., Mooney H.A., Neff J.C., Houghton R.A., Pace M.L., Ryan M.G., Running S.W., Sala O.E., Schlesinger W.H., Schulze E.-D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology and methodology // *Ecosystems*. 2005. Vol. 9. P. 1041–1050. DOI: 10.1007/s10021-005-0105-7.

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 methods // *Biogeosciences*. 2012. Vol. 9. P. 5323–5340. DOI: 10.5194/bg-9-5323-2012.

Durkaya B., Durkaya A., Kaptan S. BEF-BCEF calculations for Turkey's important coniferous species // *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*. 2020. Vol. 22 (3). P. 1053–1060. DOI: 10.24011/barofd.806310.

Erdős L., Ambarlı D., Anenkhonov O.A., Bátorı Z., Cserhalmi D., Kiss M., Kröel-Dulay G., Liu H., Magnes M., Molnár Z., Naqinezhad A., Semenishchenkov Y.A., Tölgyesi C., Török P. The edge of two worlds: A new review and synthesis on Eurasian forest-steppes // *Applied Vegetation Science*. 2018. Vol. 21(3). P. 345–362. DOI: 10.1111/avsc.12382.

Fang J.Y., Guo Z.D., Piao S.L., Chen A.P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000 // *Science in China Series D: Earth Sciences*. 2007. Vol. 50 (9). P. 1341–1350.

Fang J.Y., Oikawa T., Kato T., Mo W., Wang Z.H. Biomass carbon accumulation by Japan's forests from 1947–1995 // *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. Vol. 19. GB2004. DOI:10.1029/2004GB002253.

González-García M., Hevia A., Majada J., Barrio-Anta M. Aboveground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain // *Biomass and Bioenergy*. 2013. Vol. 54. P. 147–157. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.03.019.

Goodale C.L., Apps M.J., Birdsey R.A., Field C.B., Heath L.S., Houghton R.A., Jenkins J.C., Kohlmaier G.H., Kurz W., Liu S.R., Nabuurs G.-J., Nilsson S., Shvidenko A. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere // *Ecological Applications*. 2002. Vol. 12. P. 891–899. DOI: 10.2307/3060997.

Guo Z.D., Fang J.Y., Pan Y.D., Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods // *Forest Ecology Management*. 2010. Vol. 259. P. 1225–1231. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.047.

Houghton R.A., Hall F., Goetz S.J. The importance of biomass in the global carbon cycle // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 114. G00E03. DOI: 10.1029/2009JG000935.

IPCC. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan, 2003.

Kharuk V.I., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Shushpanov A.S. Comparative reaction of larch (*Larix sibirica* Ledeb.) radial increment on climate change in the forest-steppe and highlands of Southern Siberia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11 (4). P. 388–395. DOI: 10.1134/S1995425518040042.

Kinnunen J., Maltamo M., Päivinen R. Standing volume estimates of forests in Russia: how accurate is the published data? // *Forestry*. 2007. Vol. 80 (1). P. 53–64. DOI: 10.1093/forestry/cpl042.

Kolomyts E.G. Forest ecosystems and global climate changes: Experience of predictive modeling. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing. GmBH& Co, 2012. 310 p.

Konôpka B., Pajtík J., Šebeň V., Lukac M. Belowground biomass functions and expansion factors in high elevation Norway spruce // *Forestry*. 2011. Vol. 84 (1). P. 41–48. DOI:10.1093/forestry/cpq042.

Lapenis A., Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Aiyyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Global Change Biology*. 2005. Vol. 11. P. 1–13. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001069.x.

Lau A., Calders K., Bartholomeus H., Martius C., Raumonon P., Herold M., Vicari M., Sukhdeo H., Singh J., Goodman R.C. Tree biomass equations from terrestrial LiDAR: A case study in Guyana // *Forests*. 2019. Vol. 10, 527. DOI: 10.3390/f10060527.

Lehtonen A., Cienciala E., Tatarinov F., Mäkipää R. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic // *Annals of Forest Science*. 2007. Vol. 64(2). P. 133–140. DOI: 10.1051/forest:2006097.

Liski J., Lehtonen A., Palosuo T., Peltoniemi M., Eggers T., Muukkonen P., Mäkipää R. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil // *Annals of Forest Science*. 2006. Vol. 63. P. 687–697. DOI: 10.1051/forest:2006049.

Mansuy N., Gauthier S., Bergeron Y. Afforestation opportunities when stand productivity is driven by a high risk of natural disturbance: a review of the open lichen woodland in the eastern boreal forest of Canada // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2013. Vol. 18. P. 245–264. DOI: 10.1007/s11027-012-9362-x.

Matthews G. The carbon content of trees // *Forestry Commission. Technical Paper 4*. Edinburgh, 1993. 21 p.

Nilsson S., Shvidenko A., Jonas M., McCallum I., Thomson A., Balzter H. Uncertainties of a regional terrestrial biota full carbon account: A systems analysis // *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. 2007. Vol. 7. P. 425–441. DOI: 10.1007/s11267-006-9119-1.

Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon

sink in the world's forests // *Science*. 2011. Vol. 333. P. 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609.

Pan Y.D., Luo T.X., Birdsey R., Hom J., Melillo J. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation // *Climatic Change*. 2004. Vol. 67. P. 211–236.

Petersson H., Holm S., Ståhl G., Alger D., Fridman J., Lehtonen A., Lundström A., Mäkipää R. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study // *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 270. P. 78–84. DOI:10.1016/j.foreco.2012.01.004.

Sharma T., Kurz W.A., Stinson G., Pellatt M.G., Li Q. A 100-year conservation experiment: Impacts on forest carbon stocks and fluxes // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 310. P. 242–255. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.048.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Boulouï Y. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // *Ecological Modelling*. 2007. Vol. 204. P. 163–179. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.040.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Maksyutov S. Impact of terrestrial ecosystems of Russia on the global carbon cycle from 2003-2008: An attempt of synthesis // *Proceedings of the International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010, Tomsk, 2010a*. P. 48–52.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Mc Callum I., Santoro M., Schmillius C. Use of remote sensing products in a terrestrial ecosystems verified full carbon account: Experiences from Russia // *Proceedings of I Conference "Earth Observation for Land-Atmosphere interaction Science"*, Frascat, Italy, 3-5 November 2010. ESA SP-688, 2011. CD ROM. 8 p.

Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I., Nilsson S. Can the uncertainty of full carbon accounting of forest ecosystems be made acceptable to policymakers? // *Climatic Change*. 2010b. Vol. 103. P. 137–157. DOI 10.1007/s10584-010-9918-2.

Stinson G., Kurz W., Smyth C., Neilson E., Dymond C., Metsaranta J., Boisvenue C., Rampley G.J., Li Q., White T.M., Blain D. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008 // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. P. 2227–2244. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x.

Tang X., Fehrmann L., Guan F., Forrester D.I., Guisasola R., Kleinn C. Inventory-based estimation of forest biomass in Shitai County, China: A comparison of five methods // *Annals of Forest Research*. 2016. Vol. 59 (1). P. 1–12. DOI: 10.15287/afr.2016.574.

Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. Generalized functions of bio-mass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index // *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257. P. 1004–1013. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.11.002.

Tölgyesi C., Bragina T.M., Valkó O., Deák B., Kelemen A., Gallé R., Bátorfi Z. Micro-environment–vegetation interactions in the sandy forest-steppe of Naurzum Nature Reserve, Kazakhstan // Abil E.A., Bragina T.M. (eds.). *Biological diversity of Asian steppe*. Kostanay: Kostanay State Pedagogical Institute, Kazakhstan, 2017. P. 190–194.

Tölgyesi C., Valkó O., Deák B., Kelemen A., Bragina T.M., Gallé R., Erdős L., Bátoria Z. Tree–herb co-existence and community assembly in natural forest-steppe transitions // *Plant Ecology & Diversity*. 2018. Vol. 11 (4). P. 465–477. DOI:10.1080/17550874.2018.1544674.

Van Camp N., VandeWalle I., Mertens J., de Neve S., Samson R., Lust N., Lemeur R., Boeckx P., Lootens P., Beheydt D., Mestdagh I., Sleutel S., Verbeeck H., Van Cleemput O., Hofman G., Carliere L. Inventory-based carbon stock of Flemish forests: A comparison of European biomass expansion factors // *Annals of Forest Science*. 2004. Vol. 61(7). P. 677–682. DOI: 10.1051/forest:2004066.

Van Den Berge S., Vangansbeke P., Calders K., Vanneste T., Baeten L., Verbeeck H., Parvathi S., Moorthy K., Verheyen K. Biomass expansion factors for hedgerow-grown trees derived from terrestrial LiDAR // *BioEnergy Research* (Preprint). 2021. DOI: 10.1007/s12155-021-10250-y.

Xu X.L., Cao M.K., Li K.R. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China // *Progress in Geography*. 2007. Vol. 26 (6). P. 1–10 (in Chinese).

Yang K., Guan D. Changes in forest biomass carbon stock in the Pearl River Delta between 1989 and 2003 // *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2008. Vol. 20 (12). P. 1439-1444. DOI: 10.1016/s1001-0742(08)62546-2.

References

Alekseev V.A., Markov M.V. Statistical data on the forest fund and changes in forest productivity in Russia in the second half of the twentieth century. St. Petersburg: Saint-Petersburg Forest Ecological Center, 2003. 272 p. (In Russ.)

Analytical report. Risks of the implementation of the Paris Climate Agreement for the economy and national security of Russia. Moscow: Institute of the Problems of Natural Monopolies, 2016. 114 p. (In Russ.)

Armand A.D. Homeostasis of ecosystems // *Ecosystems in critical states*. Moscow: Nauka Publ., 1989, pp. 10–23.

Armand A.D., Vedyushkin M.A. Trigger geosystems. Moscow: Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences, 1989. 51p.

Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A. Geographical regularities of the structure and functioning of ecosystems. Moscow: Nauka Publ., 1986. 297 p. (In Russ.)

Chapin F.S., Woodwell G.M., Randerson J.T., Rastetter E.B., Lovett G.M., Baldocchi D.D., Clark D.A., Harmon M.E., Schimel D.S., Valentini R., Wirth C., Aber J.D., Cole J.J., Goulden M.L., Harden J.W., Heimann M., Howarth R.W., Matson P.A., McGuire A.D., Melillo J.M., Mooney H.A., Neff J.C., Houghton R.A., Pace M.L., Ryan M.G., Running S.W., Sala O.E., Schlesinger W.H., Schulze E.-D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology and methodology. *Ecosystems*, 2005, vol. 9., pp. 1041–1050. DOI: 10.1007/s10021-005-0105-7.

Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Belelli 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 methods. *Biogeosciences*. 2012, vol. 9, pp. 5323–5340. DOI:10.5194/bg-9-5323-2012.

Durkaya B., Durkaya A., Kaptan S. BEF-BCEF calculations for Turkey's impotent coniferous species. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 2020, vol. 22 (3), pp. 1053–1060. DOI: 10.24011/barofd.806310.

Efimov A.I. Climate. *Geographical atlas of the Orenburg Region*. Moscow: DIKPubl., 1999. pp. 32–35. (In Russ.)

Erdős L., Ambarlı D., Anenkhonov O.A., Bátori Z., Cserhalmi D., Kiss M., Kröel-Dulay G., Liu H., Magnes M., Molnár Z., Naqinezhad A., Semenishchenko Y.A., Tölgyesi C., Török P. The edge of two worlds: A new review and synthesis on Eurasian forest-steppes. *Applied Vegetation Science*, 2018. vol. 21(3), pp. 345–362. DOI: 10.1111/avsc.12382.

Fang J.Y., Guo Z.D., Piao S.L., Chen A.P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, vol. 50 (9), pp. 1341–1350.

Fang J.Y., Oikawa T., Kato T., Mo W., Wang Z.H. Biomass carbon accumulation by Japan's forests from 1947–1995 // *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. Vol. 19. GB2004. DOI:10.1029/2004GB002253.

Gitarisky M.L., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Karaban R.T. Emission and absorption of greenhouse gases in the forests of Russia in connection with the fulfillment of obligations under the UN Climate Convention. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 2006, no. 6, pp. 34–44. (In Russ.)

González-García M., Hevia A., Majada J., Barrio-Anta M. Aboveground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and Bioenergy*, 2013, vol. 54., pp. 147–157. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.03.019.

Goodale C.L., Apps M.J., Birdsey R.A., Field C.B., Heath L.S., Houghton R.A., Jenkins J.C., Kohlmaier G.H., Kurz W., Liu S.R., Nabuurs G.-J., Nilsson S., Shvidenko A. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*,. 2002, vol. 12, pp. 891–899. DOI: 10.2307/3060997.

Guo Z.D., Fang J.Y., Pan Y.D., Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, 2010, vol. 259, pp. 1225–1231. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.047.

Houghton R.A., Hall F., Goetz S.J. The importance of biomass in the global carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 114. G00E03. DOI: 10.1029/2009JG000935.

IPCC. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan, 2003.

Isaev A.S., Korovin G.N., Utkin A.I., Pryazhnikov A.A., Zamolodchikov D.G. Estimation of carbon pool and its annual deposition in phytomass of forest ecosystems in Russia. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 1993, no. 5, pp. 3–10. (In Russ.)

Kharuk V.I., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Shushpanov A.S. Comparative reaction of larch (*Larix sibirica* Ledeb.) radial increment on climate change in the

forest-steppe and highlands of Southern Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11 (4), pp. 388–395. DOI: 10.1134/S1995425518040042.

Kinnunen J., Maltamo M., Päivinen R. Standing volume estimates of forests in Russia: how accurate is the published data? // *Forestry*. 2007. Vol. 80 (1). P. 53-64. DOI: 10.1093/forestry/cpl042.

Kolomyts E.G. Boreal ecotone and geographic zonality: atlas-monograph. Moscow: Nauka Publ., 2005. 389 p. (In Russ.)

Kolomyts E.G. Ecotone as an object of physical and geographical research. *Izvestia of Academy of Sciences of SSSR. Series Geograph*, 1988, no. 5, pp. 24–36. (In Russ.)

Kolomyts E.G. Forest ecosystems and global climate changes: Experience of predictive modeling. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing. GmBH& Co, 2012. 310 p.

Konôpka B., Pajtik J., Šebeň V., Lukac M. Belowground biomass functions and expansion factors in high elevation Norway spruce // *Forestry*. 2011. Vol. 84 (1). P. 41-48. DOI:10.1093/forestry/cpq042.

Lapenis A., Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Aiyyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Global Change Biology*. 2005. Vol. 11. P. 1–13. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001069.x.

Lau A., Calders K., Bartholomeus H., Martius C., Raunonen P., Herold M., Vicari M., Sukhdeo H., Singh J., Goodman R.C. Tree biomass equations from terrestrial LiDAR: A case study in Guyana // *Forests*. 2019. Vol. 10, 527. DOI: 10.3390/f10060527.

Lehtonen A., Cienciala E., Tatarinov F., Mäkipää R. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic // *Annals of Forest Science*. 2007. Vol. 64(2). P. 133-140. DOI: 10.1051/forest:2006097.

Liski J., Lehtonen A., Palosuo T., Peltoniemi M., Eggers T., Muukkonen P., Mäkipää R. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil // *Annals of Forest Science*. 2006. Vol. 63. P. 687–697. DOI: 10.1051/forest:2006049.

Makarevskiy M.F. Carbon storage and balance in forest and peatland ecosystems of Karelia. *The Soviet Journal of Ecology*, 1991, vol. 22 (3), pp. 3–10. (In Russ.)

Mansuy N., Gauthier S., Bergeron Y. Afforestation opportunities when stand productivity is driven by a high risk of natural disturbance: a review of the open lichen woodland in the eastern boreal forest of Canada // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2013. Vol. 18. P. 245–264. DOI: 10.1007/s11027-012-9362-x.

Matthews G. The carbon content of trees // Forestry Commission. Technical Paper 4. Edinburgh, 1993. 21 p.

Moiseev B.N., Alyabina I.O. Assessment and mapping of components of carbon and nitrogen balances in major biomes of Russia. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The geographical series*, 2007, no. 5, pp. 1–12. (In Russ.)

Moiseev B.N., Filipchuk A.N. The IPCC methodology for calculating annual carbon deposition and assessing its applicability for Russian forests. *Lesnoe Khozyaistvo*, 2009, no. 4, pp. 11–13. (In Russ.)

Nilsson S., Shvidenko A., Jonas M., McCallum I., Thomson A., Balzter H. Uncertainties of a regional terrestrial biota full carbon account: A systems analysis // *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*. 2007. Vol. 7. P. 425–441. DOI: 10.1007/s11267-006-9119-1.

Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. Vol. 333. P. 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609.

Pan Y.D., Luo T.X., Birdsey R., Hom J., Melillo J. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation // *Climatic Change*. 2004. Vol. 67. P. 211–236.

Petersson H., Holm S., Ståhl G., Alger D., Fridman J., Lehtonen A., Lundström A., Mäkipää R. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study // *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 270. P. 78–84. DOI:10.1016/j.foreco.2012.01.004.

Sharma T., Kurz W.A., Stinson G., Pellatt M.G., Li Q. A 100-year conservation experiment: Impacts on forest carbon stocks and fluxes // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 310. P. 242–255. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.048.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Maksyutov S. Impact of terrestrial ecosystems of Russia on the global carbon cycle from 2003-2008: An attempt of synthesis. *Proceedings of the International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010*. Tomsk, 2010a, pp. 48–52.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Mc Callum I., Santoro M., Schmillius C. Use of remote sensing products in a terrestrial ecosystems verified full carbon account: Experiences from Russia. *Proceedings of I Conference «Earth Observation for Land-Atmosphere interaction Science»*, Frascat, Italy, 3–5 November 2010. ESA SP-688, 2011. CD ROM. 8 p.

Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I., Nilsson S. Can the uncertainty of full carbon accounting of forest ecosystems be made acceptable to policymakers? *Climatic Change*, 2010b, vol. 103, pp. 137–157. DOI 10.1007/s10584-010-9918-2.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Bouloui Y. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests. *Ecological Modelling*, 2007, vol. 204, pp. 163–179. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.040.

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Carbon budget of Russian forests // *Siberian Journal of Forest Science*, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.)

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Climate changes and wildfires in Russia. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 2013, no. 5, pp. 50–61. (In Russ)

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. What do we know about Russian forests today? *Forest Inventory and Forest Planning*, 2011, no 1–2, pp. 153–172. (In Russ.)

Stinson G., Kurz W., Smyth C., Neilson E., Dymond C., Metsaranta J., Boisvenue C., Rampley G.J., Li Q., White T.M., Blain D. An inventory-based analysis of Canada's

managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biology*, 2011, vol. 17, pp. 2227–2244. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x.

Tang X., Fehrmann L., Guan F., Forrester D.I., Guisasola R., Klein C. Inventory-based estimation of forest biomass in Shitai County, China: A comparison of five methods. *Annals of Forest Research*, 2016, vol. 59 (1), pp. 1–12. DOI: 10.15287/afr.2016.574.

Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M., Usoltsev V.A. Generalized functions of bio-mass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 257, pp. 1004–1013. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.11.002.

Tölgyesi C., Bragina T.M., Valkó O., Deák B., Kelemen A., Gallé R., Bátori Z. Micro-environment–vegetation interactions in the sandy forest-steppe of Naurzum Nature Reserve, Kazakhstan. *Abil E.A., Bragina T.M. (eds.). Biological diversity of Asian steppe*. Kostanay: Kostanay State Pedagogical Institute, Kazakhstan, 2017, pp. 190–194.

Tölgyesi C., Valkó O., Deák B., Kelemen A., Bragina T.M., Gallé R., Erdős L., Bátori Z. Tree–herb co-existence and community assembly in natural forest-steppe transitions. *Plant Ecology & Diversity*, 2018, vol. 11 (4), pp. 465–477. DOI:10.1080/17550874.2018.1544674.

Usoltsev V.A. Biological productivity of Northern Eurasia's forests: methods, the database, and its applications. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 636 p. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/3281>. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Carbon sequestration by forests of the Ural region of Russia (on the base of Forest State Inventory data 2007). Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2018. 265p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162319276.pdf>. DOI: 10.1111/gcb.14904. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Terekhov G.G., Kanunnikova O.V. Carbon deposition in forests of the Ural Federal District. *Contemporary Problems of Ecology*, 2008, vol. 1 (3), pp. 295–303. DOI: 10.1134/S1995425508030028]. (In Russ.)

Usoltsev V.A., Voronov M.P., Chasovskikh V.P. Net primary production of Ural forests: Methods and results of automated estimating. *Russian Journal of Ecology*, 2011, vol. 42 (5), pp. 362–370. DOI: 10.1134/S1067413611050122. (In Russ.)

Utkin A.I. On the possible dynamics of forest vegetation in the ecotones of Northern Eurasia under global warming. *Classification and dynamics of forests of the Far East: Proceedings of the International conference*. Vladivostok: Institute of Biology & Soil Sciences Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 2001, pp. 125–127.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Nefedev V.V., Gulbe T.A.I., Gulbe Ya.I., Gamburg S.P. Determination of stand carbon stock in sample plots: comparison of allometric and conversion-volumetric methods. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 1997, no. 5, pp. 51–66. (In Russ.)

Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and swamps of

Siberia in the global carbon cycle. *Contemporary Problems of Ecology*, 2008, vol. 1 (2), pp. 168–182. DOI: 10.1134/S1995425508020021. (In Russ.)

Van Camp N., VandeWalle I., Mertens J., de Neve S., Samson R., Lust N., Lemeur R., Boeckx P., Lootens P., Beheydt D., Mesdagh I., Sleutel S., Verbeeck H., Van Cleemput O., Hofman G., Carliere L. Inventory-based carbon stock of Flemish forests: A comparison of European biomass expansion factors. *Annals of Forest Science*, 2004, vol. 61(7), pp. 677–682. DOI: 10.1051/forest:2004066.

Van Den Berge S., Vangansbeke P., Calders K., Vanneste T., Baeten L., Verbeeck H., Parvathi S., Moorthy K., Verheyen K. Biomass expansion factors for hedgerow-grown trees derived from terrestrial LiDAR. *BioEnergy Research* (Preprint), 2021. DOI: 10.1007/s12155-021-10250-y.

Vedyushkin M.A. Hysteresis in competitive systems. *Factors and mechanisms of stability of geosystems*. Moscow: Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences, 1989, pp. 215–225. (In Russ.)

Vedyushkin M.A. Modeling of spatial transitions between phytocenoses. *Mathematical modeling of plant populations and phytocenoses*. Moscow: Nauka Publ., 1992, pp. 24–30.

Xu X.L., Cao M.K., Li K.R. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China. *Progress in Geography*, 2007, vol. 26 (6), pp. 1–10 (in Chinese)

Yang K., Guan D. Changes in forest biomass carbon stock in the Pearl River Delta between 1989 and 2003. *Journal of Environmental Sciences* (China), 2008, vol. 20 (12), pp. 1439–1444. DOI: 10.1016/s1001-0742(08)62546-2.

Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. Dynamics of Carbon Budget in Forests of Russia for Last Twenty Years. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 2011, no. 6, [1. 16–28. (In Russ.)

Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Gytarsky M.L. Carbon budget of managed forests of the Russian Federation. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 2007, no. 6, pp. 23–34.

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Korovin G.N. Determination of carbon reserves by conversion-volumetric coefficients related to age of stands. *Lesovedenie (Russian Journal of Forest Science)*, 1998, no. 3, pp. 84–93.

Материал поступил в редакцию 05.08.2021

Усольцев В.А., Ковязин В.Ф., Цепордей И.С. Текущее накопление углерода в лесах двух экорегионов России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 237. С. 75–96. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.75-96

В связи с глобальным потеплением климата оценка углеродного цикла в лесных экосистемах приобрела особое значение. Один из методов определения депонированного в лесах углерода основан на использовании конверсионных коэффициентов биомассы (ККБ) и данных Государственного учета лесного

фонда (ГУЛФ). Путем объединения моделей ККБ с данными ГУЛФ в двух экорегионах России – таежном и лесостепном – было установлено, что за 20–25-летний период накопление органического углерода в таежной зоне значительно меньше (5%) по сравнению с лесостепной зоной (39%). Несмотря на существующие риски стихийных бедствий в лесостепном экотоне, за четверть века наблюдается значительный рост депонированного углерода. Это произошло вследствие высокой доли молодняков в начале анализируемого периода, обладающих повышенным приростом по отношению к спелым древостоям. Сопоставимые результаты были получены одним и тем же методом в разных экорегионах планеты: от 8% за 5 лет в Китае до 68% за 50 лет в Японии. Сравнение результатов, полученных предложенным методом и методом IIASA (Австрия), показало минимальное расхождение (3%), что дает основание считать полученные оценки депонирования углерода близкими к реальности. Однако сохраняется неопределенность, связанная с качеством данных ГУЛФ и депонированием углерода в почве.

Ключевые слова: депонирование углерода, леса России, тайга, лесостепь, конверсионный коэффициент биомассы, данные лесной инвентаризации.

Usoltsev V.A., Kovyazin V.F., Tsepordey I.S. Current carbon storage in forests of two ecoregions of Russia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2021, iss. 237, pp. 75–96 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.237.75-96

Due to the global warming of the climate, the assessment of the carbon cycle in forest ecosystems has become particularly important. One method for determining deposited carbon is based on the use of biomass expansion factors (BEF) and State Forest Inventory (SFI) data. By combining BEF models with SFI data in two ecoregions of Russia – taiga and forest-steppe – it was found that over a 20–25-year period, accumulating the carbon deposition in the taiga zone is significantly less (5%) compared to the forest-steppe zone (39%). Despite the existing risks of natural disasters in the forest-steppe ecotone, there is a significant increase in carbon deposition over a quarter of a century. This was due to the high proportion of young stands at the beginning of the analyzed period, which have increased growth in relation to old stands. Comparable results were obtained by the same method in different ecoregions of the planet (from 8% in 5 years in China to 68% in 50 years in Japan). A comparison of the results obtained by the proposed method and the IIASA (Austria) method showed a minimal discrepancy (3%), which gives reason to consider the above estimates of carbon deposition close to reality. However, uncertainties remain related to the quality of the SFI data and the carbon deposition in the soil.

Key words: carbon deposition, Russian forests, taiga, forest-steppe, expansion factors, forest inventory data.

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – заслуженный лесовод России, профессор кафедры лесоводства Института леса и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, доктор сельскохозяйственных наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

USOLTSEV Vladimir A. – DSc (Agriculture), professor of the Department of Forestry, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

620100. Sibirskiy Trakt. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

КОВЯЗИН Василий Федорович – профессор Санкт-Петербургского Горного университета, доктор биологических наук.

199106, 21-я линия В.О., д. 2, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vfkedr@mail.ru

KOVIAZIN Vasily F. – DSc (Biology), Professor, Saint-Petersburg Mining University.

199106. 21 line V.O. 2. St. Petersburg. Russia. E-mail: vfkedr@mail.ru

ЦЕПОРДЕЙ Иван Степанович – научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, кандидат сельскохозяйственных наук.

620144, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru

TSEPORDEY Ivan S. – PhD (Agriculture), scientist at Botanical Garden of Ural Branch of RAS.

620144. 8 Marta str. 202a. Yekaterinburg. Russia. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru