

**А.Н. Филипчук, Н.В. Малышева, С.Л. Ипп, Ю.В. Сумин,
Н.Д. Дурманов**

**ПЕРВЫЙ ПИЛОТНЫЙ КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН
В КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ:
МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ
ЗАПАСА И ПОГЛОЩЕНИЯ УГЛЕРОДА БИОМАССОЙ ЛЕСОВ**

Введение. К приоритетным направлениям государственной научно-технической политики относятся в числе прочих изучение механизмов адаптации природных и антропогенных систем к климатическим изменениям, а также исследование поглотителей и источников парниковых газов (ПГ)¹. Для поиска и испытания новых технологических решений Минобрнауки России реализует пилотный проект по созданию карбоновых полигонов². Карбоновые полигоны рассматриваются как экспериментальные площадки для изучения пулов и потоков ПГ в экосистемах наземными и дистанционными методами, отработки методик, которые способствуют увеличению поглощения и сокращению эмиссий ПГ, в конечном итоге направленных на проактивное управление углеродным балансом. К настоящему времени в России начали работать восемь пилотных карбоновых полигонов в типичных зональных ненарушенных природных экосистемах и антропогенно-измененных природных комплексах³. Ожидается, что данные о накоплении и эмиссиях ПГ природными и антропогенно-измененными системами, полученные в разных природных зонах, будут востребованы для оценки эффекта от реализации климатических проектов, инициируемых в рамках частно-государственного партнерства. Помимо этого, накопленный объем данных может быть использован для верификации национальной системы учета поглотителей и накопителей ПГ, мониторинга климатических изменений. Противоречивость и ограниченность оценок динамики и прогноза поглощения углерода лесами России [Филип-

¹ Указ Президента РФ № 76 от 08.02.2021 г. «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития и климатических изменений».

² Приказ Минобрнауки №74 от 05.02.2021 г.

³ <https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/>

чук и др., 2016] и другими природными системами затрудняет признание их роли в смягчении глобальных климатических изменений [Ваганов и др., 2021].

Первый пилотный карбоновый полигон заложен на территории Национального парка (НП) «Угра» в Юхновском районе Калужской области. Координатор работ и оператор полигона – компания «КонтролТуГоу.Ру»⁴. В 2021 г. на территории полигона осуществлен комплекс научных исследований по ряду направлений. Одно из них нацелено на разработку и верификацию методов количественной оценки запасов, поглощения и эмиссий углерода лесами. Такие исследования актуальны и практически востребованы при ведении учетных работ и мониторинге источников и поглотителей ПГ, для оценки эффекта от природоохранных и хозяйственных мероприятий на динамику поступлений и потерь углерода пулами лесных экосистем.

Первые итоги работ на карбоновом полигоне в Калужской области по оценке запасов углерода в почвах и фитомассе получены по результатам обследования ключевых участков и опубликованы [Курганова и др., 2022]. В этом исследовании оценка запасов углерода проводилась на шести ключевых участках средней площадью 0,1 га каждый. Три из них заложены на вышедших из оборота землях сельхозназначения, заросших смешанным лесом с преобладанием березы средним возрастом 25–39 лет, три других – в естественных древостоях с преобладанием сосны средним возрастом 75–80 лет. Средний запас углерода в фитомассе по первым трем ключевым участкам составил $59,0 \pm 8,4$ т С/га, а средний запас углерода на других участках с преобладанием сосны – 181 ± 24 т С/га. В основе методики расчетов рекомендации МГЭИК [Руководящие принципы..., 2006] и нормативно-справочная информация Министерства природных ресурсов и экологии РФ⁵.

Цель представленного исследования: разработать и опробовать алгоритмы расчетов поступлений и потерь углерода в ходе естественного роста и развития древостоев на основе данных натурной таксации для всей территории карбонового полигона. Для реализации поставленной цели необходимо выполнить: 1) учет запасов углерода в биомассе с расширением нормативно-справочной базы для расчетов; 2) экспериментальные расчеты поступлений и потерь углерода биомассой древостоев на текущий период и

⁴ <https://carbon-polygons.ru/polygons/pervyj-karbonoviy-poligon>

⁵ Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Распоряжение Минприроды России № 20-р от 30.06.2017 г. (ред. от 20.01.2021 г. №3-р).

прогнозный, в перспективе на 20 лет. Таким образом, проводимое исследование включает две составляющие: методическую и экспериментальную.

Объект исследования – часть территории Беляевского участкового лесничества НП «Угра» Калужской области общей площадью 4134 га (рис. 1).

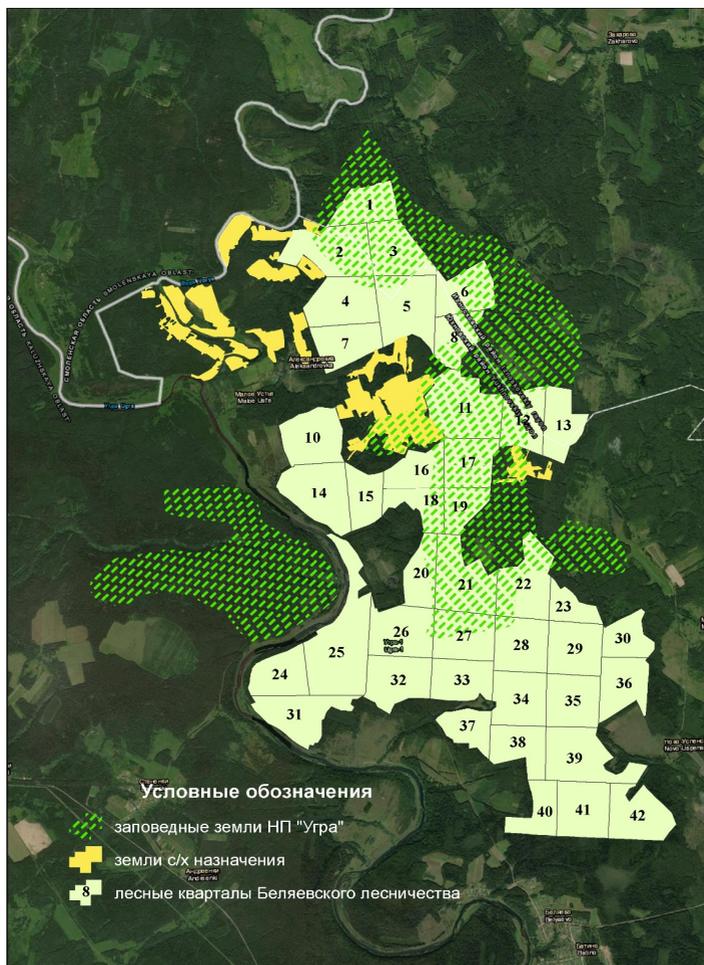


Рис. 1. Территориальное размещение объекта исследований

Fig. 1. Territorialisation of the study object

Методика исследования. Учет запасов углерода и годовичного приращения запасов в биомассе основаны на расчетных методах, исходя из объемных запасов древесины и коэффициентов, преобразующих объемные запасы в запас по массе. Для проведения расчетных работ было использовано несколько наборов конверсионных коэффициентов: преобразования объемного запаса стволов, ветвей, хвои/листвы в биомассу, содержащиеся в Методических указаниях Минприроды России⁶; разработанные авторским коллективом Института прикладного системного анализа (ИАСА); коллективом Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН); коэффициенты соотношения массы стволов и корней, рекомендованные МГЭИК, и пр. [Schepaschenko et al., 2018; Mokany, 2006; Замолодчиков и др., 2003; Методика учета..., 2017].

Исходными данными для экспериментальных расчетов служили материалы таксации 2021 г. Таксация лесов проведена глазомерно-измерительным способом по первому таксационному разряду. Исполнитель работ ООО «Аэромакс». Площадь, занятая лесными насаждениями на территории Беляевского участкового лесничества, составляет 3979,5 га, общий запас древесины – 1 101 269,2 м³. Преобладающие древесные породы: сосна, ель, береза, осина, ольха серая и черная. Высокополнотные насаждения Ib, Ia, I классов бонитета занимают 96,9% площади, среднеполнотные – 79,4%, низкополнотные – 17,4%. Средние таксационные показатели насаждений: средний возраст – 83 года, средний класс бонитета – 1,2, средняя полнота – 0,65, средний запас древесины – 277 м³/га, средний годичный прирост запасов древесины – 3,36 м³/га/год. Характеристики древесного отпада: общий запас сухостоя – 11 330,5 м³, средний запас сухостоя – 2,9 м³/га, общий запас валежника – 49 803,5 м³; средний запас валежника – 2,5 м³/га. Карбоновый полигон расположен в лесном районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части России⁷.

⁶ Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Распоряжение Минприроды России № 20-р от 30.06.2017 г. (ред. от 20.01.2021 г. № 3-р).

⁷ Приказ Минприроды России от 19.02.2019 N 105 «О внесении изменений в приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 367 от 18.08.2014 г. «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России от 04.04.2019 г. № 54291).

Исходные данные таксации древостоев определяют возможность оценки запасов, поступления и потерь углерода в трех пулах лесных экосистем, рекомендованных МГЭИК [Руководящие принципы..., 2006]: фитомасса (надземная и подземная) и древесный детрит (сухостойная и влажная древесина).

Компания «КонтролТуГоу.Ру» в ходе работ на карбоновом полигоне в 2020 г. разработала специальное программное обеспечение, которое позволяет: определять текущее содержание углерода на участке леса по созданной интегральной методике, объединяющей методики ЦЭПЛ РАН, ИААА, ВНИИЛМ [Замолодчиков и др., 2011; Schepaschenko et al., 2018; Методика учета..., 2017]; рассчитывать содержание и накопление углерода по отдельным элементам: ствол, ветви, листва/хвоя, подрост, подлесок, живой надпочвенный покров, почва и др.; конвертировать результаты расчета в эквивалент поглощенного углекислого газа; прогнозировать годичное накопление углерода в перспективе на 20 лет с представлением данной информации на графиках (рис. 2).

Расчет накопления углерода в залежи

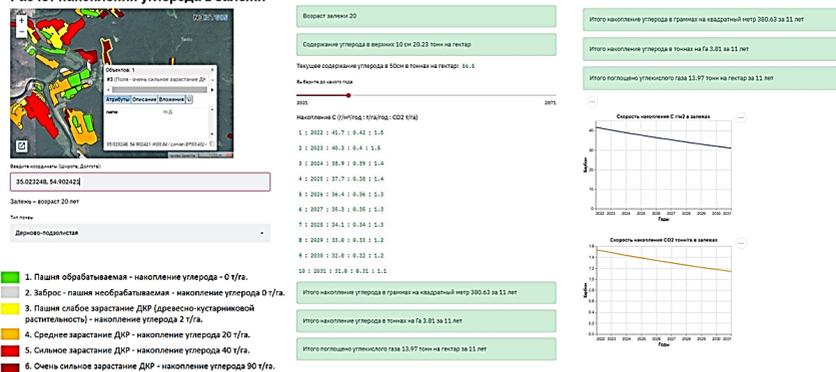


Рис. 2. Расчет накопления углерода
 Fig. 2. Carbon Storage Calculation System

Отличительной особенностью данного программного обеспечения является так называемый метод ансамблирования моделей⁸, который в итоге позволяет получить более точную оценку содержания и будущего накопления углерода в фитомассе.

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Ensemble_learning

Для оценки динамики поступлений и потерь углерода пулами биомассы – (фитомасса) и древесный детрит (отпад) – необходимо располагать показателями текущего прироста древостоя по наличному запасу и годовичного накопления отпада. На практике, в работах по лесоустройству, текущий прирост древостоев не определяют, его измеряют в ходе научных исследований и/или при повторных обследованиях постоянных пробных площадей государственной инвентаризации выборочно статистическим методом. На сегодняшний день для оценки текущего прироста используют метод математического моделирования. Этот подход известен и применяется в практике учетных работ. Систему таблиц и моделей хода роста и продуктивности насаждений (ТХР) основных лесообразующих пород Северной Евразии, разработанных А.З. Швиденко с соавторами [Швиденко и др., 2008], можно считать самой современной и полной по зональному и региональному охвату лесов. Сопоставление таксационных показателей древостоев Карбонового полигона с приведенными в ТХР для региона показало, что верифицировать значения ТХР не требуется, так как данные таксации в большинстве случаев соответствуют табличным данным, приведенным для представленных пород, возрастов и классов бонитета, пересчитанным по фактическим значениям полноты.

Разработан алгоритм, позволяющий рассчитать показатели текущего прироста запаса древесины (прирост по наличному запасу) и прироста по общей продуктивности по данным натурной таксации с учетом ТХР на текущий год и прогнозный период (20 лет). Далее, показатели текущего прироста по запасу и годовичного накопления отпада преобразованы в годовое приращение углерода в фитомассе (поглощение) и годовое поступление с отпадом в пул древесного детрита. Расчет приращения углерода в фитомассе и поступления его в пул древесного детрита выполнен по методике ВНИИЛМ [Методика учета..., 2017] с усовершенствованным набором конверсионных коэффициентов по [Schepaschenko et al., 2018]. Алгоритм расчета (уравнения 1–3) соответствует методологии МГЭИК [Руководящие принципы..., 2006].

Годичное поглощение углерода фитомассой (надземной и подземной) на выделе рассчитано по уравнению

$$C_{\text{TOTALfito}} = A_{ij} \times [(IAG_{ij} + IBG_{ij}) \times CF] \dots, \quad (1)$$

где A_{ij} – площадь выдела определенной древесной породы (i) группы возраста (j), га; IAG_{ij} – среднее годовое приращение надземной фитомассы

определенной древесной породы (i) группы возраста (j), т/га/год; IBG_{ij} – среднее годовое приращение подземной фитомассы определенной древесной породы (i) группы возраста (j), т/га/год; CF – доля углерода в сухом веществе древесины (для хвойных пород – 0,5, для лиственных – 0,47 т С/т с. в.).

Средний прирост надземной фитомассы (IAG_{ij}) определенной древесной породы (i) группы возраста (j) рассчитан по уравнению:

$$IAG_{ij} = IV_{ij} \times BCEF \dots (2),$$

где IV_{ij} – средний текущий прирост запаса стволовой древесины определенной древесной породы (i) группы возраста (j), m^3 /га/год; $BCEF$ – конверсионный коэффициент (коэффициент преобразования и разрастания биомассы) для пересчета запаса стволовой древесины в фитомассу с учетом плотности древесины, т с. в./ m^3 запаса древостоя.

Средний прирост подземной фитомассы (IBG_{ij}) определенной древесной породы (i) группы возраста (j) рассчитан по уравнению :

$$IBG_{ij} = IAG_{ij} \times R \dots, (3)$$

где IBG_{ij} – средний прирост подземной фитомассы определенной древесной породы (i) группы возраста (j), т/га/год; IAG_{ij} – средний прирост надземной фитомассы определенной древесной породы (i) группы возраста (j), т/га/год; R – отношение запаса подземной фитомассы к надземной.

Для программной реализации расчетов по таксационным описаниям Беляевского участкового лесничества подготовлена база таксационных данных и справочники: Конверсионные коэффициенты для пересчета объемных запасов древесины в фитомассу с учетом плотности древесины по фракциям (стволы, ветви, листва/хвоя) с дифференциацией по группам возраста; Коэффициенты соотношения подземной фитомассы (корней) к надземной (R); Смоделированный по ТХР текущий прирост по наличному запасу и общей продуктивности лесообразующих пород в зависимости от класса бонитета, возраста, средней высоты, среднего диаметра; Соответствие класса возраста группе возраста в зависимости от стандартного принятого возраста спелости для лесов различного целевого назначения по региону.

Результаты исследования. На начальном этапе проведен учет запасов углерода в пулах фитомассы (подземной и надземной) и древесного детрита объекта исследований на текущий год (табл. 1).

Таблица 1

Запас углерода по пулам биомассы на 2021 г.

Carbon stocks in forest biomass pools for 2021

Категория земель	Запас углерода, т С			Всего, т С	Площадь, га	Средний запас углерода, т С/га
	надземная фитомасса	подземная фитомасса	древесный детрит			
Лесопокрытые	359 823,7	80 960,3	18 155,6	458 939,7	3 980	115,3
Лесонепокрытые	1,3	0,3	0,3	1,8	14	0,1
Всего	359 825,0	80 960,6	18 155,9	458 941,6	3 994	115,4

Прогноз приращения углерода в фитомассе (поглощение) и поступления в пул древесного детрита основан на ряде допущений: лесопокрытые земли и их площадь остаются неизменными, т. е. в заданный интервал времени преобразования лесопокрытых земель в лесонепокрытые и земли других категорий не происходит. Помимо этого, неизменными остаются границы выделов, входящих в состав лесопокрытых земель, сохраняются их площади, состав пород, класс бонитета и полнота древостоев. Временная динамика обусловлена ходом естественного развития древостоев, не нарушаемого внешними факторами и лесоводственными мероприятиями. Прогноз базируется на оценке поступления углерода в пулы фитомассы за счет текущего годовичного прироста и пополнения пула мертвого органического вещества за счет отпада, т. е. по сути на модельном расчете изменения запаса растущей части древостоя и изменения запаса отпада с возрастном по мере естественного развития древостоя.

Результаты расчетов годовичного поступления углерода в пулы фитомассы (надземной и подземной) на текущий и прогнозный период (20 лет) представлены в табл. 2.

Результаты расчетов годовичного поступления углерода в пул древесного детрита (мертвого органического вещества) с естественным отпадом на текущий и прогнозный период (20 лет) представлены в табл. 3.

Сводные текущие и прогнозные (на 20-летний период) результаты расчетов поступлений углерода в пулы фитомассы и древесного детрита представлены в табл. 4.

Таблица 2

Поглощение углерода фитомассой: текущий период (2021) и прогноз (2041)
Carbon sequestration in phytomass: current year (2021) and projection (2041)

Категория земель	Поглощение углерода пулами фитомассы, тС/год		Всего, т С/год	Площадь, га	Среднее поглощение углерода фитомассой, т С/га/год
	надземной	подземной			
2021 год					
Лесопокрытые	3273,1	736,5	4009,6	3980,0	1,01
2041 год					
Лесопокрытые	2390,8	537,9	2928,7	3980,0	0,74

Таблица 3

Поступление углерода в пул древесного детрита: текущий период (2021) прогноз (2041)
Annual change in carbon stocks in dead organic matter: current year (2021) and projection (2041)

Категория земель	Накопление запасов углерода в пуле древесного детрита (отпаде), т С/год	Площадь, га	Среднее накопление углерода пулом древесного детрита, т С/га/год
2021 год			
лесопокрытые	2643,4	3 980,0	0,66
2041 год			
лесопокрытые	2269,3	3 980,0	0,57

Таблица 4

Годичное поглощение углерода фитомассой и накопление углерода в древесном детрите (отпаде): текущий период (2021 г.) и прогноз (2041 г.). Общий объем (т С/год), в среднем (т С/га/год)
Annual carbon sequestration in phytomass and annual change in carbon stocks in dead organic matter: current year (2021) and projection (2041). Total volume (t C/year), on the average (t C/ha/year)

Категория земель	Площадь, га	2021 год		2041 год	
		Поглощение углерода фитомассой			
		Всего, т С/год	Среднее, т С/га/год	Всего, т С/год	Среднее, т С/га/год
Лесопокрытые	3980,00	4009,6	1,01	2928,7	0,74
		Накопление углерода в древесном детрите (отпаде)			
		2643,4	0,66	2269,3	0,57
Итого накопление углерода в биомассе		6653,0	1,67	5198,0	1,31

Сопоставление оценок поступления углерода в фитомассу за прогнозный период свидетельствует о снижении общего объема и среднего значения поглощения за 20 лет на $\approx 37\%$ вследствие уменьшения прироста запаса спелых насаждений, увеличения отпада за счет отмирания части деревьев и распада насаждений при переходе из возрастной группы спелых в перестойные (табл. 4, рис. 3). Прогнозный средний возраст насаждений в 2041 г. составит ≈ 104 года. Нужно заметить, что ТХР составлены до возраста естественной спелости древесных пород, т. е. до начала распада. Для большинства хвойных пород – 160 лет, для мягколиственных – 80–90 лет. За этими пределами должно происходить интенсивное отмирание деревьев, и, как следствие, накопление мертвой древесины. Вероятно, в части хвойных и мягколиственных насаждений на территории Карбонового полигона будет наблюдаться именно этот процесс.



Рис. 3. Годичное поглощение углерода фитомассой и накопление углерода в древесном детрите на текущий период (2021 г.) и прогноз (2041 г.)

Fig. 3. Annual carbon sequestration in phytomass and carbon storage in wood detritus for the current year (2021) and projection (2041)

В течение 20-летнего прогнозного периода в ходе естественного развития древостоев, не нарушаемого внешним воздействием, будет происходить перераспределение запасов углерода между пулами фитомассы и мертвого органического вещества. Потери углерода в биомассе за счет изъятия древесины в силу особого режима лесопользования на ООПТ исключены. При условии, что масса органического вещества в экосистеме должна сохраняться и эмиссии от разложения не принимаются в расчет, на конец прогнозируемого периода накопление углерода в совокупности пулов должно составлять порядка 6653,0 т С/год, а не 5 198,0 т С/год (табл. 4). Полагая, что ТХР более или менее точно описывают прирост запасов древесины и за 20 лет поступление углерода в фитомассу снизится на $\approx 37\%$, примерно на такую же величину, а не на 16%, должно вырасти накопление углерода в отпаде. Наша экспертная оценка накопления запасов углерода в отпаде по состоянию на 2041 г. с учетом начавшегося интенсивного распада насаждений существенно выше, чем результат, полученный по ТХР и представленный в табл. 4 (2269,26 т С/год, при среднем 0,57 т С/га/год). По нашим экспертным оценкам прирост запасов углерода в отпаде на 2041 г. прогнозируется в размере 3724,26 т С/год, среднее значение – 0,94 т С/год/га. Упущенное по ТХР поступление углерода с отпадом в абсолютных величинах составляет 1455,0 т С/год, порядка 20% (рис. 2). Таким образом использование ТХР в расчетах годичного поступления углерода в пул древесного детрита для перестойных насаждений может приводить к определенной недооценке его величины.

В балансовых расчетах поступлений и потерь углерода в пуле древесного детрита необходимо принимать во внимание эмиссии от разложения органического вещества. Это проблемный вопрос, который требует проведения инструментальных измерений на стационарах. Однако пока недостаточно эмпирических данных и обобщения результатов таких фундаментальных исследований для того, чтобы количественно характеризовать эмиссионные потоки, принимая во внимание разнообразие лесов России и условий их произрастания. Спектр оценок темпов разложения отпада и эмиссий углерода в разных лесорастительных условиях варьирует в широких пределах. Годовой поток углерода при разложении валежника на разных стадиях в лесных экосистемах южной тайги оценен в среднем в размере 0,125 т С/га/год [Леса и болота..., 2005]. Экспериментальные работы, проведенные в условиях хвойно-широколиственных лесов Европейской части России на трех пробных площадях, показали, что эмиссии варьируют от максимума в ельнике в размере 0,12 т С/га/год до минимума в заболо-

ченном березняке – 0,0395 т С/га/год [Мониторинг потоков..., 2017]. Наиболее приемлемы в прикладном аспекте результаты, приведенные в публикациях [Ваганов, Ведрова и др., 2005; Ведрова, 2011; Швиденко и др., 2009; Швиденко, Щепашенко, 2014]. Средневзвешенный по запасу коэффициент разложения крупных древесных остатков (валежника), понимаемый как константа простой экспоненциальной модели, для страны в целом оценен в размере $0,036 \pm 0,005$ [Швиденко и др., 2009].

Выводы. Разработанные и экспериментально опробованные методы и алгоритмы количественной оценки поглощения углерода фитомассой лесов карбонового полигона с использованием данных таксации и таблиц хода роста дали приемлемые результаты на текущий период. Прогнозные оценки базируются на актуализации текущего прироста по наличному запасу в зависимости от класса бонитета, возраста, средней высоты, среднего диаметра в процессе естественного роста древостоев и реалистичны. Прогноз годичного поступления углерода в пул древесного детрита (отпада) для перестойных насаждений по ТХР приводит к его недооценке.

Для численной оценки углеродных параметров лесов необходимо усовершенствование всеобщих и региональных таблиц хода роста основных лесообразующих пород, в том числе по общей продуктивности (с учетом естественного отпада). Такую перспективу предоставляют материалы государственной инвентаризации лесов (ГИЛ). По данным ГИЛ первого цикла, завершено в 2020 г., можно построить новые модели хода роста основных лесообразующих пород для определения текущего прироста по запасу и общей продуктивности, которые могут быть постепенно верифицированы по мере получения данных повторных измерений на постоянных пробных площадях ГИЛ второго цикла.

Необходимо дальнейшее проведение фундаментальных исследований, включая инструментальные измерения, для оценки эмиссий от разложения отпада (древесного детрита) в разных лесорастительных условиях.

Благодарность. Авторы выражают благодарность ООО «КонтролТуГоу.Ру» за финансирование и поддержку исследований на карбоновом полигоне в 2021 г.

Библиографический список

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. № 4. С. 631–649.

Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Пыжжев А.И. Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. Вып. 4. С. 1096–1109. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>.

Ведрова Э.Ф. Биогенные потоки углерода в бореальных лесах Центральной Сибири // Изв. РАН. Сер.: биологическая. 2011. № 1. С. 77–89.

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

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5, № 2. e169. doi:10.31251/pos.v5i2.169

Методика учета поглощения CO₂ в лесах Российской Федерации / А.А. Мартынюк, А.Н. Филиппчук, Б.Н. Моисеев, Н.В. Малышева, В.В. Страхов [и др.]. Пушкино: ВНИИЛМ, 2017. 82 с.

Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. Саратов: Амрит, 2017. 279 с.

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>

Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, С. Нильссон, Ю.И. Булуй. М.: Федер. аг-во лесн. хоз-ва; ПАСА, 2008. 886 с. URL: <https://bookree.org/reader?file=826764&pg=3>

Филиппчук А.Н., Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Страхов В.В. Аналитический обзор методик учёта выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы // Лесохозяйственная информация: [электрон. сетевой журн.]. 2016. № 3. С. 36–85. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>

Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1(41). С. 133–147.

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

Mokany K., Raison R.J., Prokushkin A.S. Critical analysis of Root : Shoot ratios in terrestrial biomes // Glob.Chang. Biol. 2006. 12. P. 84–96. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x.

Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev, E., Martynenko, O., See L. and Kraxner F. Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests // Forests. 2018. 9: 312. DOI: 10.3390/f9060312

References

2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2007, vol 4. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html> (In Russ.)

Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Moiseev B.N. & Strakhov, V.V. Analytical overview of methodologies calculating missions and absorption of greenhouse gases by forests from the atmosphere. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2016, no. 3, pp. 36–85. (In Russ.)

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D. & Kuzyakov Ya.V. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda* [The Journal of Soils and Environment], 2022, 5(2), e169. DOI: 10.31251/pos.v5i2.169 (In Russ.)

Metodika ucheta pogloshcheniya CO₂ v lesah Rossijskoj Federacii [Procedure for Estimating CO₂ Removals in the Forests of the Russian Federation] Pushkino: VNIILM, 2017. 82 p. (In Russ.)

Mokany K., Raison R.J., Prokushkin A. S. Critical analysis of Root : Shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob.Chang. Biol.*, 2006, 12: 84–96. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x.

Monitoring of greenhouse gas fluxes in natural ecosystems. ed. by D.G. Zamolodchikov, D.V. Karelin, M.L. Gitarsky, V.G. Blinov. Saratov: Amirit, 2017. 279 p. (In Russ.)

Schepaschenko D. Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchik V., Dmitriev, E., Martynenko, O., See L. & Kraxner F. Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests. *Forests*. 2018, 9: 312. DOI: 10.3390/f9060312

Shvidenko A.Z. & Shchepashchenko D.G. Carbon budget of Russian forests. *Sibirskiy Lesnoy Zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2014, 1, pp. 69–92. (In Russ.)

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Nilsson S. Assessment of wood detritus stocks in Russian forests *Lesnaya taksatsiya i lesoustrojstvo* [Forest inventory and management], 2009, no. 1(41), pp. 133–147. (In Russ.)

Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials). A.Z. Shvidenko, D.G. Shchepaschenko, S. Nilsson, Yu.I. Buluy. M.: Federal Forestry Agency, IIASA, 2008. 886 p. URL: <https://bookree.org/reader?file=826764&pg=3> (In Russ.)

Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A. I., Shibistova O.B. Siberian forests and swamps in the global carbon cycle. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2005, no. 4, pp. 631–649. (In Russ.)

Vaganov E.A., Porfiryev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Yu., Pyzhev A.I. Assessment of the Contribution of Russian Forests to Climate Change Mitigation. *Ekonomika regiona* [Economy of regions], 2021, no. 17(4), pp. 1096–1109. URL: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4> (In Russ.)

Vedrova, E.F. Biogenic carbon fluxes in boreal forests of Central Siberia. *Izvestiya RAN:seriya biologicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: biological series], 2011, no. 1, pp. 77–89. (In Russ.)

Zamolodchikov, D.G., Grabovskii, V.I. & Kraev G.N. A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics in Russia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2011, no. 6, pp. 16–28. (In Russ.)

Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. & Chestnykh O.V. Conversion factors of stand volumes to phytomass for the main forest-forming species of Russia. *Lesnaya taksatsiya i lesoustrojstvo* [Forest inventory and management], 2003, no. 1(32), pp. 119–127. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.09.2022

Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Ипп С.Л., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д. Первый пилотный карбоновый полигон в Калужской области: методика и эксперимент по оценке запаса и поглощения углерода биомассой лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 240. С. 112–239. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.112–129

На первом пилотном карбоновом полигоне в Калужской области выполнены исследования, направленные на совершенствование и верификацию методов количественной оценки запасов, поглощения и эмиссий углерода лесами. Цель исследования – разработка методики оценки, алгоритмов расчетов поступлений и потерь углерода биомассой лесов в ходе естественного роста и развития древостоев. Экспериментальная часть исследования включает апробацию расчетов на текущий период и прогнозный, на 20 лет. Объект экспериментальных работ – часть территории Беляевского участкового лесничества Национального парка «Угра» Калужской области общей площадью 4134 га. Исходными данными для экспериментальных расчетов служили материалы таксации 2021 г., выполненной глазомерно-измерительным способом по первому таксационному разряду. Разработан алгоритм, позволяющий рассчитать показатели текущего прироста запаса древесины (прирост по наличному запасу) и прироста по общей продуктивности по данным натурной таксации древостоев на выделах и таблицам хода роста на текущий год и прогнозный период (20 лет). Показатели текущего прироста по запасу и годичного накопления отпада преобразованы в годичное поглощение углерода фитомассой и накопление углерода пулом древесного детрита (отпада). Сопоставление текущего значения и прогнозных оценок поступления углерода в фитомассу на территории объекта исследований свидетельствует о снижении общего объема и среднего значения поглощения за 20 лет на $\approx 37\%$ вследствие уменьшения прироста запаса спелых насаждений, увеличения отпада за счет отмирания части деревьев и распада насаждений при переходе из возрастной груп-

пы спелых в перестойные. В течение прогнозного периода в ходе естественного развития древостоев, не нарушаемого внешним воздействием, будет происходить перераспределение запасов углерода между пулами фитомассы и мертвого органического вещества. Прогноз годичного поступления углерода в пул древесного детрита (отпада) для перестойных насаждений по таблицам хода роста приводит к его недооценке. Для численной оценки углеродных параметров лесов необходимо усовершенствование всеобщих и региональных таблиц хода роста основных лесообразующих пород, в том числе по общей продуктивности (с учетом естественного отпада).

Ключевые слова: карбоновый полигон, текущий прирост, отпад, поглощение углерода фитомассой, поступление углерода в отпад, таблицы и модели хода роста.

Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Ipp S.L., Sumin Y.V., Durmanov N.D. The first pilot carbon polygon in the Kaluga region: methodology and experiment for assessing the stocks and carbon sequestration in forest biomass. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 240, pp.112–239 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.240.112–129

The studies to improve and verify methods for quantifying forest carbon stocks, sequestration and emissions have been carried out at the first Carbon Test Site in the Kaluga region. The study aims to develop the methods and algorithms for the estimating the carbon revenues and losses in the forest biomass due to natural stand growth. The experimental part of the study includes the testing calculations for the current period and projection, in the future, for 20 years. The object of experimental work with a total area of 4134 hectares is a part of the Belyaev forest management unit of the National Park «Ugra» in the Kaluga region. Experimental calculations were based on the forest inventory performed by the visual measurement method for the first class of inventory in 2021. An algorithm has been developed to calculate the net growth (stock increment) and mortality based on the field inventory data of tree stands and tables and models of growth and productivity of forests for the current year and the projection for 20 years. The net growth and annual mortality have been converted into annual carbon sequestration in the phytomass and annual carbon storage in the wood detritus. A comparison of the current value and projections of carbon sequestration in the phytomass shows a decrease of 37 per cent in total and average for 20-year due to a decrease in the growth of the mature stands, increased mortality due to loss of trees and disintegration of stands in the transition from the mature to the over-mature stands. Carbon stocks will be redistributed between phytomass and dead organic matter pools due to the natural growth of the stands not disturbed by external influences over the projection period. The projection of annual carbon accumulation in the dead organic matter (detritus pool) with tables and models of growth and productivity for over-mature stands underestimates it. General and regional tables of growth and mortality of stands for major forest forming species need to be improved to quantify the forest carbon.

Key words: carbon polygon, net growth, mortality of stands, carbon sequestration in phytomass, carbon accumulation in dead organic matter, tables and models of growth and productivity of forests.

ФИЛИПЧУК Андрей Николаевич – заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ), доктор сельскохозяйственных наук. Scopus Author ID 57201318444

141200, ул. Институтская, д. 15, г. Пушкино, Московская область, Россия.
E-mail: afilipchuk@yandex.ru

FILIPCHUK Andrey N. – DSc (Agriculture), Deputy Director, Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry. Scopus Author ID 57201318444

141200. Institutskaya str. 15. Pushkino, Moscow region. Russia. E-mail: afilipchuk@yandex.ru.

МАЛЫШЕВА Наталия Викторовна – заместитель заведующего отделом аналитических исследований состояния и динамики лесов Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ), кандидат географических наук.

141200, ул. Институтская д. 15, г. Пушкино Московская область, Россия;
доцент кафедры сельскохозяйственных мелиораций, лесоводства и землеустройства Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева.

127434, Тимирязевская ул., д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: natalysheva@yandex.ru.

ORCID 0000-002-4264-3157, Web of Science Researcher ID ABI-5705-2020, Scopus Author ID 57212860024

MALYSHEVA Nataliya V. – PhD (Geography), Deputy Head of the Department, Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry.

141200. Institutskaya str. 15 Pushkino. Moscow region. Russia;
Associate Professor of Agricultural Reclamation, Silviculture and Land Management Department, the Russian State Agrarian University, Moscow Timiryazev Agricultural Academy.

127434. Timiryazevskaya str. 49. Moscow. Russia. E-mail: natalysheva@yandex.ru

ORCID 0000-002-4264-3157, Web of Science Researcher ID ABI-5705-2020, Scopus Author ID 57212860024

ИПП Сергей Леонидович – управляющий директор Блока «Агро», ООО «КонтролТуГоу.Ру».

115162, ул. Шаболовка, д. 31, стр. 11, этаж 4, помещение 1-15, г. Москва, Россия. E-mail: s.ipp@ctrl2go.com

IPP Sergei L. – Managing Director of Agro Block of LLC «Ctrl2Go.Ru».

115162. Shabolovka str. 31. 11 building. 4 floor. 1-15 room. Moscow. Russia. E-mail: s.ipp@ctrl2go.com

СУМИН Юрий Валерьевич – заместитель управляющего директора Блока «Агро» ООО «КонтролТуГоу.Ру», кандидат технических наук.

115162, ул. Шаболовка, д. 31, стр. 11, этаж 4, помещение 1-15, г. Москва, Россия. E-mail: y.sumin@ctrl2go.com

SUMIN Yuri V. – PhD (Technical), Deputy Managing Director of Agro Block of LLC «Ctrl2Go.Ru».

115162. Shabolovka str. 31. 11 building. 4 floor. 1-15 room. Moscow. Russia. E-mail: y.sumin@ctrl2go.com

ДУРМАНОВ Николай Дмитриевич – специальный представитель Министерства высшего образования и науки РФ по вопросам биологической и экологической безопасности, доктор медицинских наук.

E-mail: n.durmanov@ctrl2go.com

DURMANOV Nikolai D. – DSc (Medicine), Special Representative of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Biological and Environmental Safety.

Moscow. Russia. E-mail: n.durmanov@ctrl2go.com