DOI 10.31509/2658-607x-202252-106
УДК 630*23

ВСЕГДА ЛИ ИСКУССТВЕННОЕ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ МОЖЕТ БЫТЬ ЛЕСОКЛИМАТИЧЕСКИМ ПРОЕКТОМ?

© 2022 г.

В. Н. Шанин [1,2,3]*, П. В. Фролов [1,3], В. Н. Коротков [3]

[1] *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Пущинский научный центр биологических исследований РАН». Российская Федерация, 142290, Московская обл., Пущино, ул. Институтская, д. 2, корп. 2.*

[2] *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов Российской академии наук. Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14.*

[3] *Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля. Российская Федерация, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20б.*

*E-mail: shaninvn@gmail.com

Поступила в редакцию: 23.05.2022
После рецензирования: 15.06.2022
Принята к печати: 20.06.2022

В настоящее время большую популярность приобретают лесоклиматические проекты, направленные на усиление углерод-депонирующей функции лесных экосистем. К числу основных требований к таким проектам относятся дополнительность, постоянство и отсутствие утечки. Соблюдение данных требований обеспечивает выполнение проектом задач, на которые он ориентирован. Одним из инструментов для проверки соответствия лесоклиматических проектов указанным выше принципам может выступать прогнозное моделирование. Целью исследования являлась оценка перспектив аккумуляции углерода при реализации проектов по лесовосстановлению на территории Красноярского края и Иркутской области. Проведена оценка баланса углерода на территории проектов искусственного лесовосстановления при базовой линии (естественное возобновление *Betula* spp. и *Populus tremula* L.) и при реализации лесоклиматического проекта (создание культур *Pinus sylvestris* L.) с прогнозом на 100 лет. Полученные прогнозы показывают, что при реализации проекта достигнутый уровень выбросов выше, а уровень поглощения — ниже по сравнению с базовой линией, что противоречит принципу дополнительности, и, следовательно, искусственное лесовосстановление не может рассматриваться как лесоклиматический проект. Среди разных вариантов лесных культур наибольшая эффективность в накоплении углерода спрогнозирована для смешанных культур *Pinus sylvestris* с примесью 2–3 единиц мелколиственных видов (*Betula* spp. и *Populus tremula*). Однако осуществление проектов по искусственному лесовосстановлению может иметь существенное значение для воспроизводства ценных лесных ресурсов. В данном случае необходимо принимать во внимание способ использования полученной древесной фитомассы, поскольку от этого будет зависеть продолжительность периода консервации углерода.

Ключевые слова: *лесные климатические проекты, лесовосстановление, смешанные культуры, бюджет углерода, парниковые газы, прогнозное моделирование*

21 января 2020 года в рамках Всемирного экономического форума в Давосе (Швейцария) была запущена инициатива по посадке на Земле одного триллиона деревьев (https://www.1t.org/), в частности, в период объявленного ООН Десятилетия восстановления экосистем (2021–2030 годы). Данная инициатива интересна среди прочего с точки зрения ее эффективности для компенсации негативных последствий деятельности человека (Lippke et al., 2021). Также в настоящее время широко обсуждается введение Европейской Комиссией в рамках борьбы с изменением климата трансграничного углеродного налога. Одним из путей компенсации выбросов парниковых газов являются действия, направленные на повышение способности экосистем к связыванию углерода. В связи с этим в настоящее время большую популярность приобретают лесоклиматические проекты, направленные на усиление углерод-депонирующей функции лесных экосистем.

Ещё в марте 2019 года в ходе Красноярского экономического форума между Федеральным агентством лесного хозяйства РФ (Рослесхоз), АО «РУСАЛ Менеджмент» и Правительством Красноярского края было подписано соглашение о реализации добровольных проектов в области поглощения парниковых газов, которое предусматривает среди прочих мер посадку на территории края 500 тыс. деревьев на площади 120 га. В июне 2019 г. аналогичное соглашение о реализации добровольных проектов в области поглощения парниковых газов было заключено между Федеральным агентством лесного хозяйства РФ (Рослесхоз), АО «РУСАЛ Менеджмент» и Правительством Иркутской области. В рамках соответствующего проекта по лесовосстановлению в Иркутской области в 2019 г. было высажено 500 тыс. деревьев на площади 125 га. Таким образом, в рамках проектов по восстановлению лесов в Красноярском крае и Иркутской области был высажен 1 миллион деревьев на общей площади более 245 га. В 2020 г. работы по лесовосстановлению в Иркутской области были продолжены: на площади 28 га было высажено 112 тыс. сеянцев *Pinus sylvestris*. Общей чертой лесовосстановительных работ в Красноярском крае и Иркутской области является создание монокультур *Pinus sylvestris* на месте гарей и вырубок.

К числу основных требований к лесоклиматическим проектам относятся дополнительность, постоянство и отсутствие утечки (The Greenhouse Gas Protocol..., 2006; Verified Carbon Standard, 2022). Принцип дополнительности требует, чтобы при реализации лесоклиматического проекта происходило бы поглощение большего количества углерода, чем без его реализации (второй вариант рассматривается как

базовая линия), т. е. проект должен продемонстрировать, что дополнительное связывание углерода не произошло бы без разработки проекта. Единицы сокращения выбросов в результате выполнения проекта рассчитываются как разница между результатами проектной деятельности и базовой линией. Таким образом, принцип дополнительности предполагает обоснование мер дополнительного воздействия, направленного на увеличение поглощения парниковых газов при реализации проекта. Принцип постоянства требует, чтобы результаты проекта по удалению парниковых газов сохранялись длительное время (до 100 лет). Под утечкой из лесоклиматических проектов понимается ситуация, когда сокращение выбросов парниковых газов в одном месте приводит к непреднамеренному увеличению их выбросов в другом месте, что может нивелировать преимущества проекта.

Одним из инструментов для проверки соответствия лесоклиматических проектов указанным выше принципам может выступать прогнозное моделирование. Соответственно, целью данного исследования является оценка перспектив аккумуляции углерода при реализации проектов по лесовосстановлению на территории Красноярского края и Иркутской области. Рассматривается динамика основных экосистемных пулов углерода при высадке монокультур *Pinus sylvestris*, естественном зарастании мелколиственными древостоями, сформированными *Betula* spp. (поскольку в моделях установлены одинаковые параметры для *Betula pubescens* Ehrh. и *Betula pendula* Roth, мы не уточняем вид в описании имитационных сценариев) и *Populus tremula* (рассматривается в качестве базовой линии) и при высадке смешанных культур *Pinus sylvestris* с мелколиственными *Betula* spp. и *Populus tremula*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Краткое описание задействованных моделей

Для прогнозных оценок использовалась комбинация модели динамики древостоя EFIMOD 2 (Komarov et al., 2003), модели динамики органического вещества почвы Romul_Hum (Komarov et al., 2017a; Chertov et al., 2017a, 2017b) и модели почвенного климата SCLISS (Bykhovets, Komarov, 2002).

Модель динамики древостоя EFIMOD 2 сочетает в себе балансовый и популяционный подходы к моделированию динамики древостоев. Модель состоит из подмодели роста отдельного дерева и модели древостоя с дискретным описанием пространства. Древостой в EFIMOD 2 рассматривается как совокупность отдельных деревьев, имеющих точное положение в про-

странстве. Рост древостоя имитируется на участке, разделённом на ячейки размером 0.5 × 0.5 м, исходя из допущения, что в одной ячейке может находиться не более одного дерева. Координаты деревьев позволяют вести дискретный учёт конкуренции между соседними деревьями за ресурсы (свет и доступный азот почвы). Оригинальная версия модели ранее была усовершенствована за счёт добавления новых версий подмоделей конкуренции за ресурсы почвы (Shanin et al., 2015), конкуренции за свет (Shanin et al., 2020) и новой процедуры расчёта продукции биомассы (Шанин и др., 2019) и её распределения по органам (Komarov et al., 2017b).

Модель динамики органического вещества почвы Romul_Hum является новой версией широко известной модели ROMUL (Chertov et al., 2001, 2010; Lehtonen et al., 2016), которая неоднократно тестировалась, калибровалась и применялась для широкого диапазона почвенных и климатических условий. Новая версия дополнительно вычисляет вклад почвенной фауны в процесс гумусообразования (формирование устойчивого органического вещества) при сохранении прежней структуры и значений основных параметров. В модели вычисляются скорости минерализации и гумификации неограниченного количества когорт наземного и подземного опада разного качества под влиянием всей почвенной биоты с оценкой пулов C и N в органогенных (L, F, H) и органо-минеральных горизонтах (лабильный и стабильный гумус). Определяющими факторами динамики в модели служат гидротермические условия, гранулометрический состав почвы и химические свойства опада и почвы (отношение C : N).

Модель SCLISS (*Soil CLImate Statistical Simulator*) предназначена для оценки средних месячных значений температуры и влажности почвы (лесной подстилки и минеральной почвы) в разных типах леса на основе стандартных метеорологических наблюдений: температуры воздуха, количества осадков и, при наличии данных, температуры почвы под травяным покровом, измеряемой на метеорологических станциях. Модель SCLISS играет важную роль при работе с моделью Romul_Hum для определения динамики органического вещества почв. Так как коэффициенты скоростей разложения органического вещества в модели Romul_Hum зависят от температуры и влажности лесной подстилки и минеральной почвы, то для работы с данной моделью необходимо в качестве входных сценариев иметь файлы со среднемесячными температурами и влажностями лесной подстилки и минеральной почвы. Расчёт климатических параметров в модели SCLISS

производится для лесной подстилки в целом, без деления на подгоризонты, а также для минеральной части профиля в целом.

Краткая характеристика анализируемых проектов лесовосстановления

В качестве исходных данных для расчётов послужили проекты искусственного лесовосстановления на каждый участок, в которых приведена информация о его состоянии, способах подготовки почвы, технологии посадки, схеме размещения лесных культур, а также об используемом посадочном материале.

Проекты по лесовосстановлению в Красноярском крае реализованы в мае 2019 года на территории Дзержинского участкового лесничества (3 участка) и Шеломковского участкового лесничества (1 участок) Дзержинского лесничества. Всего в ходе лесовосстановительных работ было высажено более 500 тыс. 2-летних сеянцев *Pinus sylvestris* высотой 20–25 см на площади 120 га. Участки лесовосстановления представляли собой гарь 2017 года. Почвы — свежие суглинистые. Участки имели среднюю степень задернения, которая препятствовала естественному возобновлению. Посадки сеянцев проведены под меч Колесова по предварительно нарезанным бороздам, размещённым равномерно через 4.00 м с севера на юг, с шагом посадки 0.60 м. На 1 га высаживалось по 4167 сеянцев. Участки на территории Дзержинского участкового лесничества ранее представляли собой мелколиственно-сосновые и сосново-мелколиственные насаждения (класс бонитета — 3, полнота — 0.4–0.6, возраст — 30–45 лет), на территории Шеломковского участкового лесничества — сосновые и мелколиственно-сосновые насаждения (класс бонитета — 3, полнота — 0.4–0.6, возраст — 55–65 лет). Все участки были пройдены низовым пожаром.

Проекты по лесовосстановлению в Иркутской области (Боханский район) реализованы в основном осенью 2019 года на территории Кировской дачи и техучастка № 9, которые входят в состав Кировского лесничества (общая площадь 125 га), а также осенью 2020 года на территории Оёкской дачи Гороховского участкового лесничества Иркутского центрального лесничества (28 га). Всего в ходе лесовосстановительных работ в 2019 г. было высажено 500 тыс. 2-летних сеянцев *Pinus sylvestris* высотой 20–25 см. Участки лесовосстановления представляли собой гари 2014 и 2016 гг., а также вырубки 2013 и 2018 гг. Гари и вырубки частично заросли *Betula* spp. и *Populus tremula*, подрост которых был предварительно сведён перед посадкой сеянцев *Pinus sylvestris*. Почвы — свежие суглинистые серые лесные. Участки

имели среднюю степень задернения, которая препятствовала естественному возобновлению. Посадки сеянцев проведены под меч Колесова по предварительно нарезанным бороздам, размещённым равномерно через 4.00 м с севера на юг, с шагом посадки 0.62 м. На 1 га высаживалось по 4000 сеянцев *Pinus sylvestris*. Исходные древостои на данном участке были представлены преимущественно мелколиственно-сосновыми и мелколиственными насаждениями с участием *Larix sibirica* Ledeb. (класс бонитета — 3, полнота — 0.5–0.6), на территории Оёкской дачи — преимущественно чистыми сосновыми и мелколиственно-сосновыми насаждениями (класс бонитета — 3, полнота — 0.5–0.7). Возраст разных участков леса варьировал от 30 до 120 лет.

Подготовка входных данных для моделей EFIMOD 2, Romul_Hum и SCLISS

Входные данные для модели SCLISS. Используемая в данной работе версия модели SCLISS позволяет учитывать влияние характеристик древостоя (видовой состав и полнота) на структуру водного баланса (Грабарник и др., 2019б).

Исходный сценарий метеорологических условий был получен на основе данных с географически ближайших метеостанций, извлечённых из массивов данных (Булыгина и др., 2021; Ильин и др., 2021; Шерстюков, 2021), подготовленных во Всероссийском НИИ гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД) Росгидромета, и доступных на сайте указанного учреждения (www.meteo.ru). Использовались следующие параметры (табл. 1, стр. 7): средняя месячная температура воздуха (°C); месячная сумма осадков (мм); средняя месячная температура почвы на глубине 20 см под поверхностью — косимой травой на метеорологической станции (°C). Также в качестве входных данных использовалась географическая широта (в градусах). В силу наличия большого количества артефактов в данных по осадкам для метеостанции 30815 («Хамар-Дабан»), эти данные были взяты аналогичными станции 30710 («Иркутск»).

При конструировании климатического сценария для имитации стационарного климата в качестве базового был выбран период с 1989 по 2012 гг. Средние значения доступных метеорологических данных для более раннего периода существенно отличаются от актуальных, а значения для более позднего периода, как правило, отсутствуют в открытом доступе. Из полученных выборок были удалены записи за все годы, содержащие пропуски для одного или более показателя за один или более месяц, т. е. были оставлены только записи за годы, которые содер-

жат полную информацию. Далее для каждого модельного объекта были сгенерированы стационарные климатические сценарии посредством выборки случайным образом данных за полные годы (с целью сохранения как внутригодичной автокорреляции параметров, так и корреляции между параметрами) до достижения 100-летней продолжительности (с месячным шагом). Полученные сценарии были проверены на отсутствие трендов как путём визуального контроля диаграмм показателей, так и с помощью аппроксимации показателей линейной функцией (проверялось отсутствие значимых различий коэффициента наклона линейной функции от 0). Величина антропогенного поступления азота с атмосферными осадками для всех объектов была принятой равной 3.6 кг га$^{-1}$ год$^{-1}$ (Jia et al., 2016).

Таблица 1. Характеристики климатических сценариев для модельных объектов

Регион	Красноярский край			Иркутская область			Иркутская область		
Географическая широта, градусов	56.0			52.3			53.4		
Код и название метеостанции	29580, «Солянка»			30710, «Иркутск»			30815, «Хамар-Дабан»		
Почва	Серая суглинистая			Серая легкосуглинистая			Дерново-подзолистая среднесуглинистая		
Среднемесячные значения температуры воздуха (T_a) и почвы (T_s) и месячные суммы осадков (P). Показатели усреднены за период 1989–2012 гг.									
Показатели по месяцам	T_a	T_s	P	T_a	T_s	P	T_a	T_s	P
январь	−18.7	−3.8	20	−17.7	−7.4	15	−13.7	−6.0	15
февраль	−14.4	−4.3	16	−13.6	−6.8	8	−12.4	−5.6	8
март	−7.3	−2.9	18	−6.4	−3.9	10	−7.4	−3.6	10
апрель	1.2	0.3	31	3.0	1.1	23	−0.8	1.4	23
май	9.6	5.8	46	10.2	7.6	34	5.2	6.3	34
июнь	16.1	13.4	60	15.7	14.0	68	11.9	11.7	68
июль	18.6	17.6	78	18.3	17.7	112	13.3	15.8	112
август	15.4	15.8	68	16.1	16.8	105	11.4	15.0	105
сентябрь	8.5	10.2	61	9.2	11.3	50	5.2	9.6	50
октябрь	1.6	4.0	38	2.2	4.2	22	−2.1	3.0	22
ноябрь	−8.0	0.2	35	−8.3	−1.2	21	−11.6	−3.4	21
декабрь	−15.3	−1.7	31	−15.9	−5.6	16	−13.3	−6.8	16
Среднее (для температур) / сумма (для осадков) за год	0.6	4.6	502	1.1	4.0	484	−1.2	3.1	484

Необходимые для работы модели почвенно-гидрологические константы (влажность устойчивого завядания (об. %), наименьшая полевая влагоёмкость (об. %) и полная влагоёмкость (об. %) минеральной почвы) были оценены на основе литературных источников (Зинченко, 2018) и данных о гранулометрическом составе почвы. Величины видоспецифичных коэффициентов модели SCLISS, описывающих влияние неоднородности полога на почвенно-климатические условия, были оценены ранее (Грабарник и др., 2019а, 2019б).

Входные данные для модели Romul_Hum. Помимо получаемых из модели SCLISS среднемесячных значений температуры и влажности подстилки и минеральной почвы, модель Romul_Hum использует в качестве входных данных характеристики разных когорт опада: концентрации углерода, азота и зольных элементов (% от сухой массы). Каждая когорта представляет собой опад определённого органа (ствола, ветвей, листвы или хвои, скелетных и тонких корней) определённого вида дерева. Химические свойства разных когорт опада, наряду с почвенно-климатическими условиями, влияют на скорость их трансформации. Химические свойства разных когорт опада (табл. 2) были оценены

Таблица 2. Характеристики фракций растительного опада

Параметр	Фракция опада	*Pinus sylvestris*	*Betula* spp.	*Populus tremula*
Содержание углерода, % сухой массы	Стволовая древесина	47.40	49.40	49.40
	Ветви	46.80	50.80	50.80
	Хвоя / листва	44.70	51.20	51.20
	Скелетные корни	46.60	50.80	50.80
	Тонкие корни	46.30	48.70	48.70
Содержание азота, % сухой массы	Стволовая древесина	0.14	0.21	0.27
	Ветви	0.32	0.64	0.63
	Хвоя / листва	0.70	1.33	1.36
	Скелетные корни	0.22	0.60	0.54
	Тонкие корни	0.37	0.75	0.80
Зольность, % сухой массы	Стволовая древесина	0.44	0.74	0.78
	Ветви	0.81	1.89	1.96
	Хвоя / листва	2.43	4.04	3.97
	Скелетные корни	0.76	2.42	2.22
	Тонкие корни	2.06	2.00	2.06

по литературным данным; эти оценки приведены в предшествующих работах (Шанин и др., 2019; Shanin et al., 2021; Ahtikoski et al., 2022). В силу отсутствия данных, опад травяно-кустарничкового яруса был оценён косвенно, исходя из предположения о линейной зависимости между биомассой растений травяно-кустарничкового яруса (и, соответственно, количеством опада) и сомкнутостью древесного полога. Масса опада при полной сомкнутости была принята за 0, а в полностью открытых местообитаниях — равной 0.22 кг м$^{-2}$ год$^{-1}$ (Богородская, Иванова, 2011; Грозовская и др., 2015). Отметим, что пока данная оценка является приближённой и нуждается в дальнейшей корректировке и, возможно, проверке с помощью процессных имитационных моделей (Frolov et al., 2020a, 2020b).

Для каждого объекта исследования начальные характеристики пулов органического вещества почвы и азота были оценены по данным монографии (Моделирование динамики ..., 2007) с корректировкой по Единому государственному реестру почвенных ресурсов России (http://egrpr.soil.msu.ru/index.php), исходя из двух имеющихся параметров: типа лесорастительных условий по классификации Воробьёва-Погребняка (С3 для всех объектов) и доминанта древостоя (*Pinus sylvestris* для сценариев с выращиванием культур или смесь *Populus tremula* с *Betula* spp. для сценариев с естественным зарастанием). Далее была выполнена корректировка значений на основе результатов химического анализа почв для выбранных объектов. Отбор образцов почв проведён с помощью пробоотборника на глубину 30 см с разделением на почвенные горизонты. Дополнительно были отобраны образцы почвы на определение объёмного веса. Отбор образцов, оценка содержания углерода в почве и определение запаса углерода в органическом веществе почвы были выполнены согласно методике (Методические указания..., 2017). Определение содержания органического вещества почвы было проведено в лаборатории Института глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля с использованием метода Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91). Запас углерода на единицу площади был рассчитан для слоя 0–30 см с учётом объёмного веса почвы и принимая во внимание, что содержание углерода в гумусе составляет 58% (Воробьёва и др., 2006). Начальные значения для разных пулов приведены в таблице 3 (стр. 10).

Валидация модели для модельных участков выполнена по региональным таблицам хода роста (Усольцев, 2001, 2002, 2007, 2010, 2013, 2016; Швиденко и др., 2008). Проводили имитационный эксперимент с использованием метода Монте-Карло (Komarov et al.,

Таблица 3. Начальные запасы углерода и азота (кг м$^{-2}$) в пулах органогенных и органо-минеральных горизонтов почвы. Коды модельных участков присвоены в соответствии с кодами ближайшей метеостанции (табл. 1). 10С — культуры *Pinus sylvestris*, 5Б5Ос — естественное зарастание мелколиственным древостоем

Регион	Красноярский край		Иркутская область			
Модельный участок	29580		30710		30815	
Состав древостоя (по густоте)	10С	5Б5Ос	10С	5Б5Ос	10С	5Б5Ос
Углерод подстилки	0.12	0.34	0.00	0.37	0.00	0.38
Азот подстилки	0.0040	0.011	0.00	0.012	0.00	0.012
Углерод лабильного гумуса	1.41	1.62	3.00	3.00	2.22	3.00
Азот лабильного гумуса	0.16	0.18	0.25	0.25	0.15	0.21
Углерод стабильного гумуса	3.29	3.78	7.00	7.00	5.18	7.00
Азот стабильного гумуса	0.37	0.42	0.58	0.58	0.36	0.49

2003) для оценки эффекта неопределённости входных параметров 20%-м варьированием значений начальных параметров по запасам органического вещества почвы (модель равномерного распределения). Валидация модели проводилась по методике, изложенной в работе Piñeiro et al. (2008). Значения среднего диаметра, средней высоты и густоты для древостоев определённого возраста, рассчитанные с помощью модели, соотносили с таблицами хода роста. Для этого пары значений в координатах «смоделированное — фактическое» были аппроксимированы прямой вида $y = s \times x$. Для оценки соответствия между результатами моделирования и данными из таблиц хода роста использовали коэффициент детерминации R^2, который характеризует случайные отклонения и коэффициент наклона аппроксимирующей прямой s, характеризующий систематические отклонения. Валидация показала, что модель EFIMOD 2 даёт результаты, удовлетворительно соответствующие фактическим данным (табл. 4, стр. 11).

Для каждого модельного участка имитировали несколько вариантов развития древостоев. Сценарий 5Б5Ос имитирует естественное зарастание *Betula spp.* и *Populus tremula* в равной пропорции (здесь и далее — по густоте) с начальной густотой 12 000 шт га$^{-1}$. Сценарий 10С имитирует посадку культур *Pinus sylvestris* с начальной густотой 4200 шт га$^{-1}$ (4.00 м между рядами и 0.60 м между сеянцами в ряду) для Красноярского края и 4000 шт га$^{-1}$ (4.00 м между рядами и 0.62 м между сеянцами в ряду) для Иркутской области (таким образом, параметры посадки соответствовали описанию проектов искусственного лесовосстановления). Следующая группа сценариев имитирует смешанные культуры *Pinus*

sylvestris и мелколиственных видов (*Betula* spp. и *Populus tremula*) в разных пропорциях (8С1Б1Ос, 7С2Б1Ос, 6С2Б2Ос, 5С3Б2Ос) при начальном размещении, аналогичном таковому в предыдущем сценарии. Смешение достигалось за счёт чередования рядов с сеянцами *Pinus sylvestris*, *Betula* spp. и *Populus tremula*. Начальные значения пулов углерода почвы в данных сценариях были приняты равными средневзвешенным значениям данных величин (табл. 3, стр. 10) в сценариях 10С (весовые коэффициенты 0.8, 0.7, 0.6 и 0.5 соответственно) и 5Б5Ос (весовые коэффициенты 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5 соответственно). В данной группе сценарий 8С1Б1Ос рассматривался в качестве основного, прочие сценарии направлены на оценку роли мелколиственных видов в накоплении углерода.

Во всех сценариях имитировали рост древостоев в соответствии со II и III классами бонитета. Имитация естественного возобновления основана на уравнениях, описывающих количество и видовой состав древесного подроста в зависимости от видового состава и полноты древостоя (Pukkala et al., 2012; Juutinen et al., 2018, 2021). Продолжительность периода моделирования составила 100 лет при годичном шаге модели.

Результатом расчётов в модели EFIMOD 2, помимо динамики углерода в древостое, были массы растительного опада разных фракций, которые использовались в качестве входных данных в модели динамики органического вещества почвы Romul_Hum. Динамика опада для разных древостоев приведена на рис. 1 (стр. 12).

Таблица 4. Характеристика соответствия между экспериментальными данными и результатами работы модели

Вид	Класс бонитета	Оценка	Средняя высота	Средний диаметр	Густота
Pinus sylvestris	II	R^2	0.989	0.992	0.952
		s	1.027	1.022	0.972
	III	R^2	0.980	0.981	0.957
		s	1.006	1.014	0.976
Betula spp.	II	R^2	0.983	0.982	0.947
		s	1.016	1.024	0.984
	III	R^2	0.990	0.994	0.932
		s	1.018	1.019	0.981
Populus tremula	II	R^2	0.982	0.986	0.942
		s	1.027	1.031	0.976
	III	R^2	0.984	0.989	0.926
		s	1.020	1.021	0.982

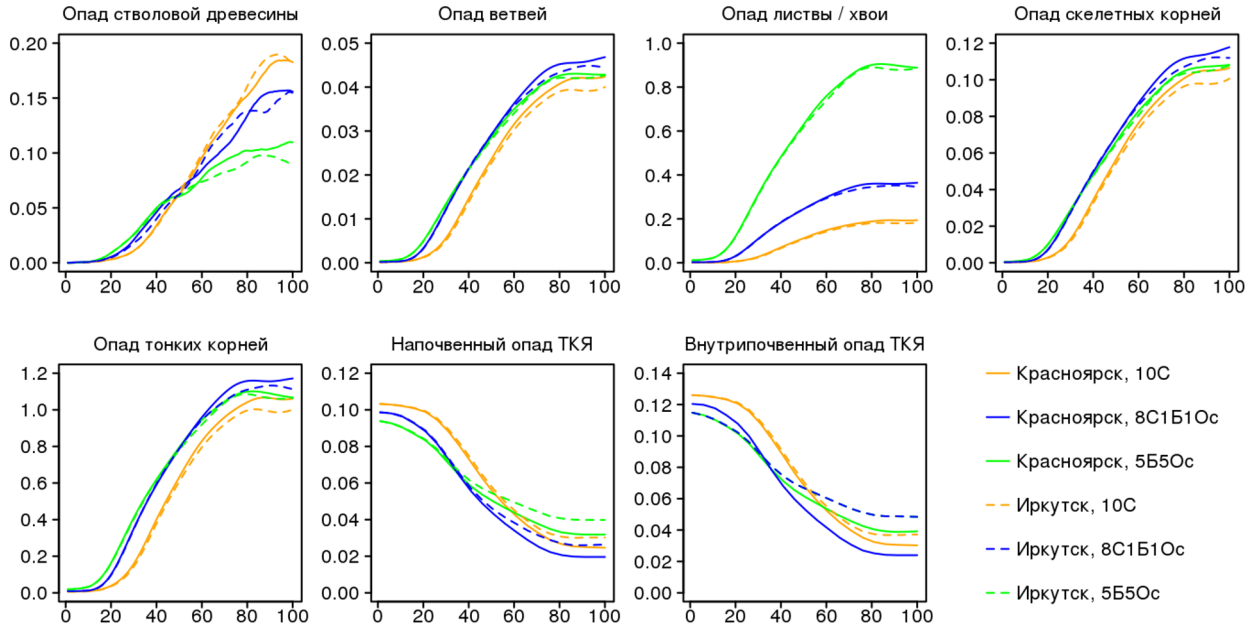

Рисунок 1. Динамика поступления растительного опада на модельные участки при разных сценариях, кг м$^{-2}$ год$^{-1}$ (в пересчёте на углерод), III класс бонитета. По горизонтальной оси — шаг моделирования, лет

Для каждого сценария было рассчитано относительное накопление / потери углерода как разность общего экосистемного запаса углерода в текущий год и общего экосистемного запаса углерода на начало реализации проекта. Данная динамика была пересчитана на CO_2-эквивалент (путём домножения на 44/12) с учетом площади проектов на каждом из трёх участков. Также была рассчитана разность в величине накопления / потерь углерода между сценариями реализации проекта и базовой линией.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогнозные оценки динамики углерода в разных типах древостоев

При анализе результатов моделирования рассматривались следующие показатели: (1) углерод древостоя; (2) углерод органогенных горизонтов почвы; (3) углерод органо-минеральных горизонтов почвы (верхние 30 см); (4) общий углерод почвы как сумма двух предыдущих компонентов; (5) углерод сухостоя и валежа; (6) общий углерод мортмассы как сумма углерода органогенных горизонтов

почвы и углерода сухостоя и валежа; (7) общий углерод экосистемы как сумма всех компонентов; (8) общая эмиссия CO_2 (в пересчёте на углерод) как результат гетеротрофного дыхания почвы.

Поскольку в сценариях с посадкой культур *Pinus sylvestris* (в т. ч. с примесью мелколиственных видов) начальный запас углерода в органогенных горизонтах почвы был принят равным 0, результаты имитационных экспериментов показали накопление углерода в органогенных горизонтах почвы (рис. 2) на всех объектах. В сценарии с естественным зарастанием, в силу небольшого количества поступающего опада на начальных этапах развития, наблюдается снижение запаса углерода относительно начального уровня, которое сменяется накоплением при возрасте древостоя более 15 лет.

Наиболее активное накопление углерода в органогенных горизонтах наблюдается при сценарии спонтанного зарастания мелколиственным древостоем, что может объясняться более высоким по сравнению с культурами *Pinus sylvestris* количеством поступающего растительного опада. Также сто-

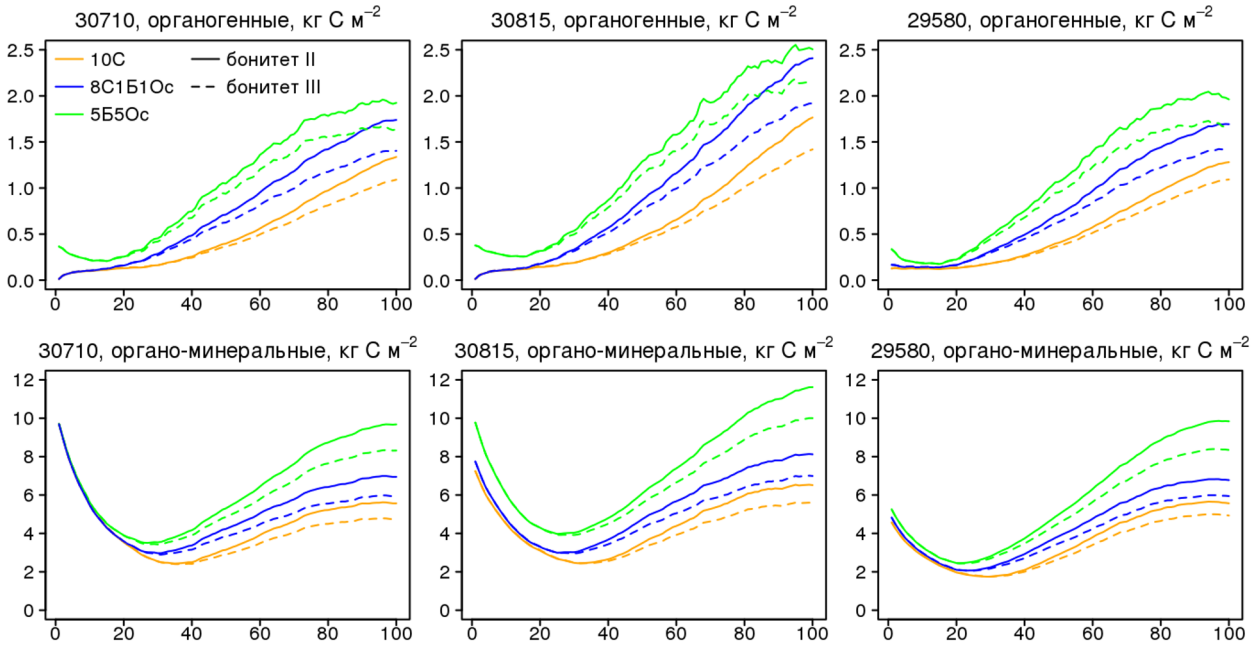

Рисунок 2. Динамика углерода органогенных и органо-минеральных (верхние 30 см) горизонтов почвы. Здесь и далее: горизонтальная ось — время от начала реализации проекта, лет

ит отметить, что опад *Pinus sylvestris* характеризуется более низким содержанием азота (Шанин и др., 2019). Это приводит к снижению скорости трансформации органического вещества почвы (ОрВП) и способствует накоплению запасов углерода в органогенных горизонтах, хотя и на более низком уровне, чем в мелколиственных древостоях. Различия в динамике запасов углерода органогенных горизонтов между модельными древостоями объясняются в основном региональными различиями в продуктивности.

В органо-минеральных горизонтах почвы наблюдается схожая динамика запасов углерода: наибольшее накопление происходит при сценариях с самозарастанием (рис. 2, стр. 13), что может быть связано не только с большей массой опада в мелколиственных древостоях, но и с более высокой концентрацией азота в них. В силу дефицита опада (что характерно для лесовозобновления после различных внешних воздействий) в первые 25–30 лет происходит снижение запаса углерода в данном пуле, после чего начинается накопление, и концу 100-летнего периода моделирования запас углерода в органо-минеральных горизонтах равен или превышает начальное значение.

Схожая динамика наблюдается и для общего углерода почвы (рис. 3), однако снижение общих запасов углерода почвы в начале периода моделирования менее заметно, поскольку снижение запасов углерода в органо-

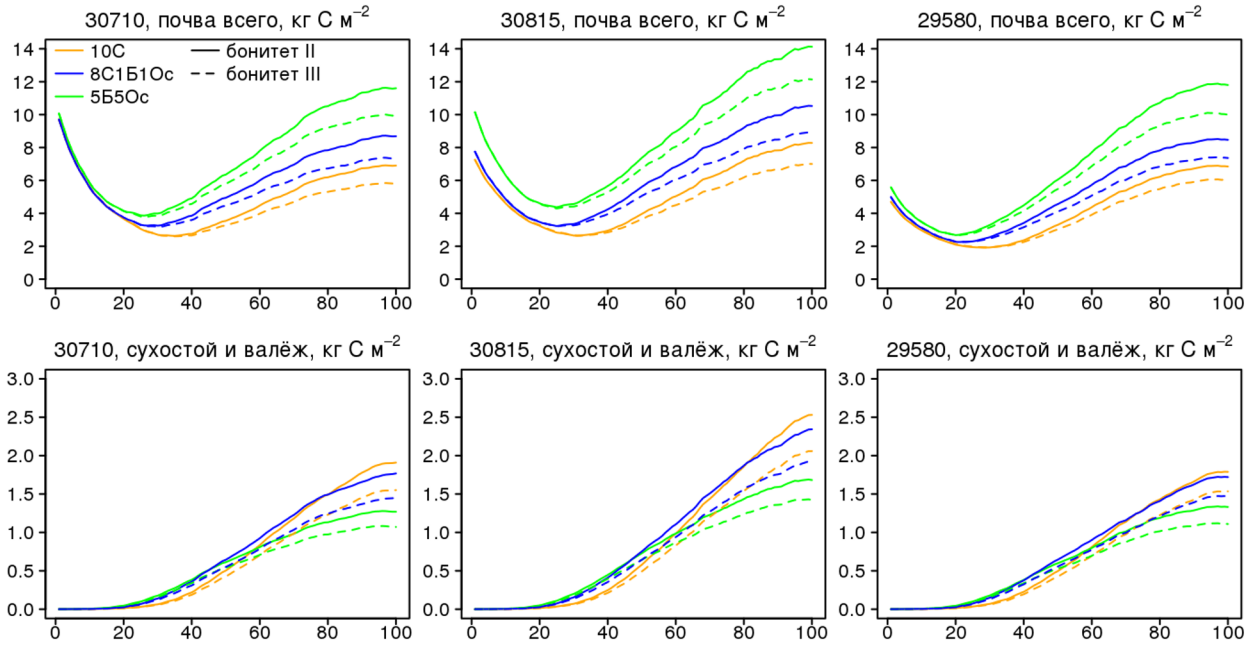

Рисунок 3. Динамика общего углерода почвы и углерода сухостоя и валежа

минеральных горизонтах компенсируется его накоплением в органогенных горизонтах. Характер динамики запасов углерода валежа отражает динамику поступления крупных древесных остатков (КДО). Поскольку начальные значения запаса углерода в пуле сухостоя и валежа приняты равными 0, во всех сценариях и на всех объектах происходит накопление углерода в данном пуле (рис. 3, стр. 14). В мелколиственных древостоях наиболее интенсивное самоизреживание происходит на ранних этапах развития, в то время как в культурах *Pinus sylvestris* самоизреживание интенсифицируется после смыкания полога. Кроме того, подобная динамика углерода валежа связана с более высоким запасом углерода в древостоях, сформированных *Pinus sylvestris*, и с более низкой скоростью минерализации и гумификации КДО, что обусловлено более низкой концентрацией азота и более высокой концентрацией лигнина.

Динамика углерода мортмассы является суммой динамики пула органогенных горизонтов и пула сухостоя и валежа (рис. 4). Наименьшее накопление углерода в мортмассе для всех модельных участков наблюдается в культурах *Pinus sylvestris* без примесей. Культуры *Pinus sylvestris* с примесью мелколиственных видов и сценарий естественного зарастания показали более высокий уровень накопления

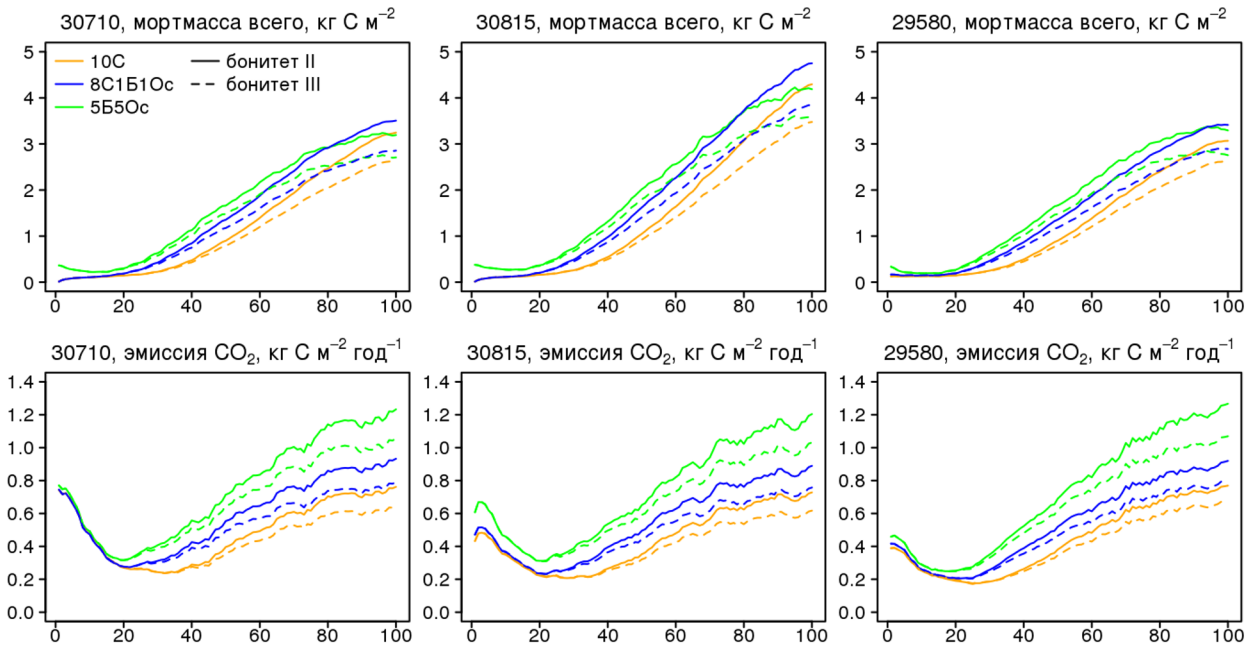

Рисунок 4. Динамика общего углерода мортмассы и годичная эмиссия углекислого газа. В силу высокой межгодичной вариабельности уровня эмиссии применено сглаживание скользящим средним с «окном» 5 лет

углерода в мортмассе. Результаты имитационных экспериментов показали, что основным фактором, влияющим на эмиссию CO_2, служит сценарий поступления растительного опада (рис. 4, стр. 15). Дополнительное влияние оказывает снижение величины отношения C : N, что приводит к росту скорости минерализации. Минерализация мелколиственного опада, более богатого азотом, по сравнению с опадом *Pinus sylvestris*, происходит с большей скоростью.

На начальных этапах развития мелколиственные древостои показали более высокую продуктивность (уровень накопления углерода в фитомассе древостоя), по сравнению с чистыми культурами *Pinus sylvestris* (рис. 5). Во второй половине периода моделирования (возраст древостоя более 50 лет) накопление углерода в культурах *Pinus sylvestris* становится более высоким, чем при спонтанном зарастании. Примечательно, что наиболее высокую продуктивность демонстрируют культуры *Pinus sylvestris* с примесью мелколиственных видов. Таким образом, проявляется эффект «разделения ниш» (Cavard et al., 2011), суть которого заключается в более эффективном использовании ограниченных ресурсов при совместном произрастании видов с разными экологическими

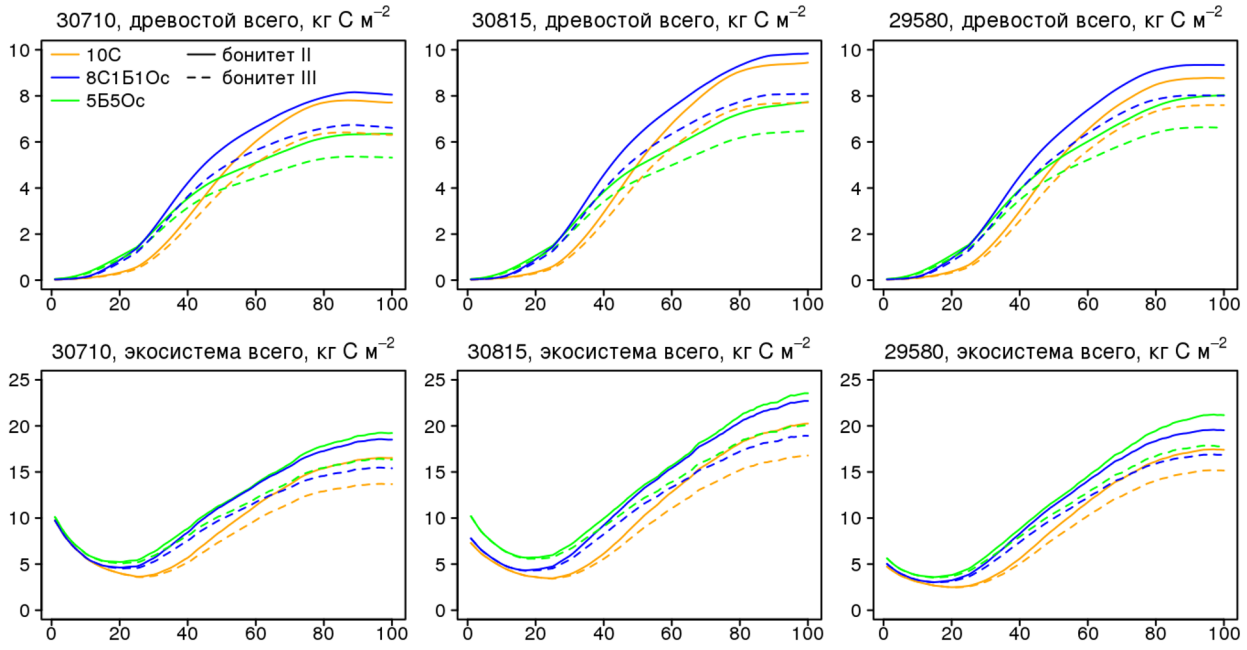

Рисунок 5. Динамика углерода древостоя и общего запаса углерода в экосистеме

стратегиями. В модели EFIMOD 2 стратегии видов реализованы в процедурах имитации конкуренции между деревьями за свет и ресурсы почвы (Shanin et al., 2015, 2020). Общий запас углерода в экосистеме (рис. 5, стр. 16) возрастает на всех модельных участках и при всех имитационных сценариях. Наиболее высокое накопление наблюдается при естественном зарастании, наименьшее — в чистых культурах *Pinus sylvestris*. Культуры *Pinus sylvestris* с примесью мелколиственных видов показывают промежуточный результат, более близкий к естественному зарастанию. Различия между классами бонитета предсказуемы и связаны с более высокой продуктивностью древостоев II класса бонитета, что выражается в большем количестве поступающего растительного опада и, как следствие, в более активном накоплении углерода в почве и в экосистеме в целом.

Прогнозируемый суммарный объём потерь углерода (относительно начальных значений) при реализации лесного климатического проекта с посадкой чистых культур *Pinus sylvestris* на территории Дзержинского лесничества Красноярского края достигает около 9.92 Гг CO_2-эквивалента (далее — просто CO_2) для всей площади (или 8.26 кг м$^{-2}$) к 20-му году от начала реализации проекта, после чего общий экосистемный запас углерода начинает возрастать и после 35-го года от начала реализации проекта становится выше начальных значений (табл. 5, стр. 18). Общее накопление углерода через 100 лет от начала реализации проекта на площади 120 га достигает 45.88 Гг (38.23 кг м$^{-2}$) CO_2. Примесь мелколиственных видов к культурам *Pinus sylvestris* (8С1Б1Ос) повышает эффективность накопления углерода: наибольшие потери углерода относительно начальной точки приходятся на 15-й год от начала проекта и составляют 8.85 Гг (7.37 кг м$^{-2}$) CO_2, а накопление общего углерода в экосистеме к 100-му году от начала проекта составляет 52.02 Гг (43.35 кг м$^{-2}$) CO_2. При реализации базовой линии (5Б5Ос) эффективность накопления углерода ещё выше и составляет 53.24 Гг (44.37 кг м$^{-2}$) CO_2 к 100-му году от начала реализации проекта.

При реализации разных сценариев на площади 28 га в пределах территории Иркутского лесничества Иркутской области прогнозируется схожая динамика накопления углерода в экосистеме, однако продолжительность фазы, характеризующейся потерями углерода экосистемой, выше, чем для предыдущего объекта. Прогнозируемое изменение запаса относительно его начального значения к 100-му году от начала реализации проекта составляет 4.05, 5.82 и 6.40 Гг (14.47, 20.77 и 22.86 кг м$^{-2}$) CO_2 для сценариев 10С,

Таблица 5. Прогнозируемый суммарный объём накопления/потерь углерода всеми пулами (класс бонитета — III) относительно начальной точки при естественном зарастании (5Б5Ос) и при реализации лесных климатических проектов (10С, 8С1Б1Ос) на территории Иркутского лесничества Иркутской области (код 30710, площадь проекта — 28 га), Кировского лесничества Иркутской области (код 30815, площадь проекта — 125 га) и Дзержинского лесничества Красноярского края (код 29580, площадь проекта — 120 га), в Гг CO_2-эквивалента в год (результаты приведены для каждого 5-го шага имитационного эксперимента)

Год от начала проекта	Код объекта и сценарий								
	30710			30815			29580		
	10С	8С1Б1Ос	5Б5Ос	10С	8С1Б1Ос	5Б5Ос	10С	8С1Б1Ос	5Б5Ос
5	−2.27	−2.28	−2.31	−6.43	−7.02	−9.33	−4.28	−4.63	−5.18
10	−4.14	−4.12	−4.08	−11.71	−12.63	−16.39	−7.21	−7.65	−8.17
15	−5.24	−5.04	−4.93	−15.18	−15.58	−20.30	−9.07	−8.85	−9.28
20	−5.88	−5.33	−5.16	−16.88	−15.88	−21.12	−9.92	−8.32	−8.62
25	−6.29	−5.32	−5.08	−17.75	−14.87	−20.49	−9.48	−6.13	−6.09
30	−6.18	−4.60	−4.31	−16.25	−10.56	−16.40	−7.27	−1.49	−1.16
35	−5.59	−3.46	−3.21	−12.74	−4.33	−10.65	−3.63	4.24	4.45
40	−4.70	−2.26	−2.10	−7.86	2.09	−5.01	1.32	10.38	10.31
45	−3.44	−0.92	−0.80	−1.71	8.59	0.91	7.21	16.36	16.12
50	−2.24	0.13	0.17	5.20	15.06	7.04	13.20	21.80	21.48
55	−1.09	1.09	1.10	11.28	20.23	11.76	18.67	26.59	26.23
60	0.03	2.04	2.08	17.28	25.45	17.04	24.22	31.72	31.51
65	1.03	2.91	3.03	22.57	30.10	21.89	29.43	36.65	36.67
70	1.89	3.66	3.88	28.02	35.22	27.61	33.65	40.77	40.88
75	2.77	4.51	4.94	32.11	38.96	31.99	37.66	44.76	45.26
80	3.25	4.96	5.48	36.26	43.25	37.03	40.95	47.83	48.78
85	3.58	5.32	5.85	39.15	46.43	40.42	43.37	50.05	51.50
90	3.93	5.73	6.29	40.75	48.21	42.00	44.78	51.16	52.74
95	4.05	5.86	6.43	42.82	50.55	44.73	45.93	52.15	53.77
100	4.05	5.82	6.40	43.55	51.04	45.14	45.88	52.02	53.24

8С1Б1Ос и 5Б5Ос соответственно. Прогноз накопления углерода при реализации разных сценариев на площади 125 га в пределах территории Кировского лесничества Иркутской области показал, что, в отличие от двух других объектов, более эффективным вариантом оказывается посадка культур *Pinus sylvestris* с примесью мелколиственных видов (8С1Б1Ос). В этом случае накопление углерода в экосистеме к 100-му году (относительно начального значения) составляет 51.04 Гг (40.83 кг м$^{-2}$) CO_2, тогда как при посадке чистых культур (10С) прогнозируемое значение данного показателя равно 43.55 Гг (34.84 кг м$^{-2}$) CO_2, а для базовой линии — 45.14 Гг (36.11 кг м$^{-2}$)

CO_2. Несмотря на то, что для данного объекта, аналогично двум другим, абсолютное значение запаса углерода к концу периода моделирования максимально для сценария 5С5Б (рис. 5, стр. 16), из-за различных начальных значений общего экосистемного запаса углерода между разными сценариями относительное изменение запаса углерода показало более высокую эффективность сценария 8С1Б1Ос. Таким образом, для всех объектов и при всех сценариях общее изменение запаса углерода в экосистеме за 100-летний период было положительным. Более низкое, по сравнению с двумя другими объектами, накопление углерода на единицу площади на территории Иркутского лесничества Иркутской области связано в наибольшей степени с более низкой продуктивностью древостоев на данной территории (рис. 5, стр. 16), что, в свою очередь, выражается в менее интенсивном накоплении углерода в пулах мортмассы и органического вещества почвы.

На всех объектах при обоих сценариях реализации лесных климатических проектов (10С, 8С1Б1Ос) значение отношения общего экосистемного запаса углерода при реализации проекта и при сценарии базовой линии (5Б5Ос) составляло менее 1 на протяжении всего периода моделирования (рис. 6). Однако стоит отметить, что данный эффект может частично объясняться различиями в начальных запасах углерода, которые в сценариях с реализа-

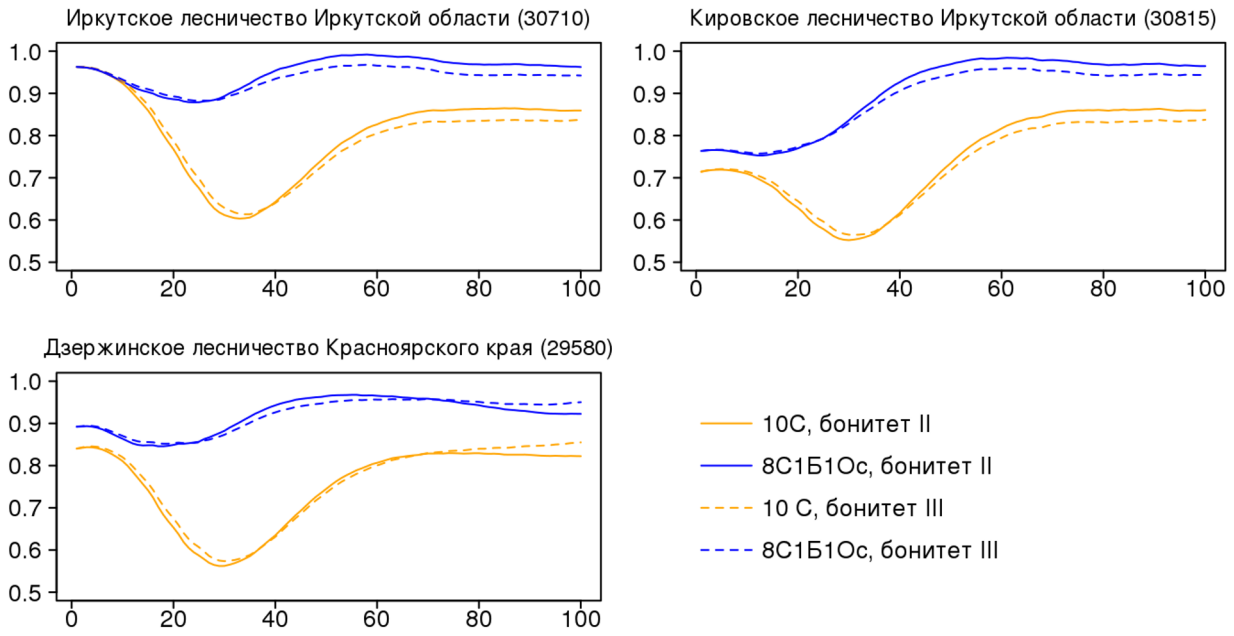

Рисунок 6. Относительное отклонение общего экосистемного запаса углерода от базовой линии в сценариях с реализацией лесных климатических проектов (10С и 8С1Б1Ос) для разных модельных объектов

цией лесных климатических проектов всегда ниже, чем в сценарии базовой линии за счёт имитации начальной расчистки участков, что выразилось в более низких начальных запасах углерода в мортмассе (табл. 3, стр. 10).

Сравнение динамики пулов и потоков углерода при посадке лесных культур с разным соотношением *Pinus sylvestris* и мелколиственных видов (рис. 7) показало, что доля мелколиственных несущественно влияет на данные показатели (особенно на динамику пула углерода в минеральной почве). Кроме того, увеличение доли мелколиственных видов в составе смешанных культур приводит к небольшому снижению накопления углерода. Оптимальное значение коэффициента участия для мелколиственных видов составляет порядка 2–3 единиц (по густоте). Однако мы допускаем возможность, что при включении в смешанные культуры других видов (например, *Picea abies* (L.) H. Karst.) оптимальное соотношение будет ближе к 5 : 5, как показали наши более ранние имитационные эксперименты (Shanin et al., 2013, 2014).

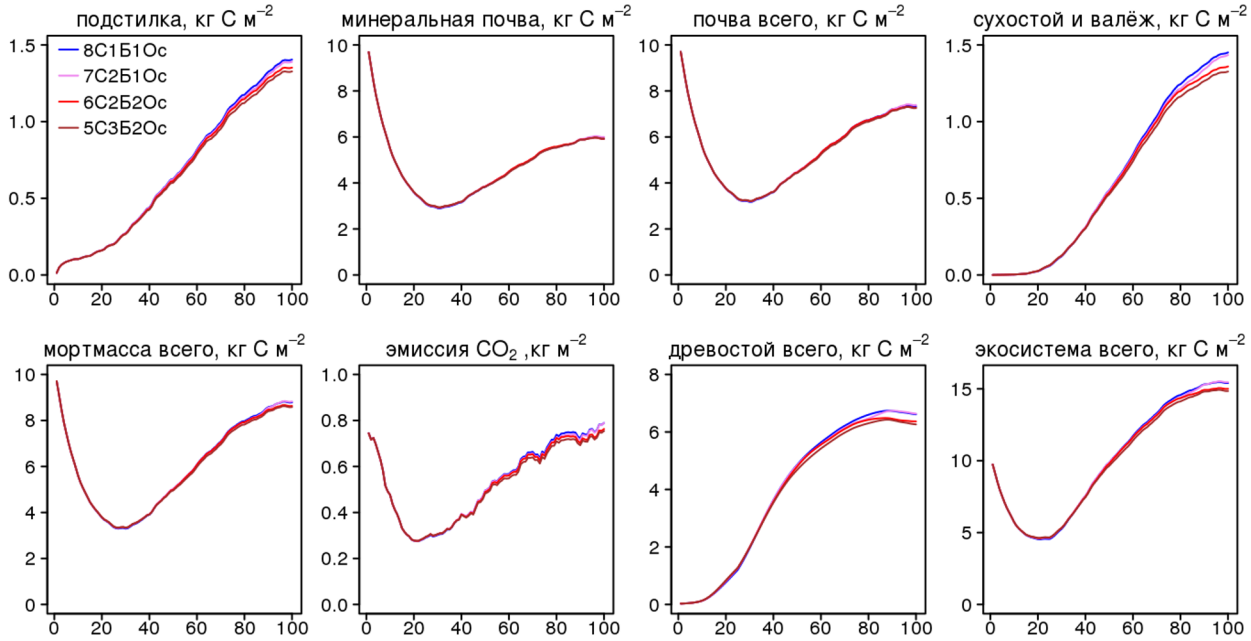

Рисунок 7. Динамика пулов и потоков углерода в смешанных культурах разного состава

Источники неопределенности прогноза и методические ограничения подхода

Применяемый нами в данном исследовании подход имеет ряд ограничений, которые необходимо принимать во внимание при анализе полученных результатов. В частности, в модели Romul_Hum рассматривается динамика лабильных (растительные остатки и гуминовые вещества, ассоциированные с растительными остатками) и относительно стабильных (гуминовые вещества, ассоциированные с минеральной матрицей верхних органоминеральных горизонтов почвы) пулов углерода. Однако модель Romul_Hum не учитывает т. н. «сверхстабильное» органическое вещество почвы, к которому можно отнести, например, органическое вещество глубоких почвенных горизонтов, и пирогенный углерод, возникающий в результате неполного сгорания органического вещества (Lehmann, Kleber, 2015). Данный пул характеризуется крайне низкими скоростями разложения, составляющими сотни и тысячи лет (Kuzyakov et al., 2009). Как следствие, данное ограничение модели может приводить к тому, что на ранних этапах развития древостоев, когда количество поступающего опада невелико, а минерализация органического вещества в органо-минеральных горизонтах не полностью компенсируется его накоплением за счёт гумификации растительных остатков, потери органического вещества могут быть переоценены. Также в применяемых моделях отсутствует пространственная детализация распределения древесного опада и динамики ОрВП, однако при имитации подобных относительно однородных в пространственном отношении древостоев данное ограничение не является существенным.

Вклад опада живого напочвенного покрова в биогенный цикл углерода в некоторых типах леса может достигать 50% от общего количества растительного опада (Morén, Lindroth, 2000; Muukkonen, Mäkipää, 2006; Ťupek et al., 2008; Hilli et al., 2010), что также было подтверждено имитационными экспериментами по оценке вклада живого напочвенного покрова (Frolov et al., 2020a, 2020b). Однако в силу отсутствия фактических данных и модели, описывающей динамику живого напочвенного покрова, нами была использована приближённая оценка количества данной фракции опада (с использованием сомкнутости яруса древостоя в качестве единственного предиктора и без учёта различий в химических свойствах опада в зависимости от видового состава яруса живого напочвенного покрова), что, в свою очередь, могло повлиять на точность прогноза накопления углерода в органическом веществе почвы и эмиссии CO_2.

При реализации проекта дополнительно необходимо учитывать потери углерода, связанные с подготовкой территории под посадку лесных культур (сведение подроста, нарушение почвенного покрова), а также выбросы парниковых газов от сжигания топлива машинами и механизмами при проведении лесовосстановительных мероприятий. Эти источники выбросов не рассматриваются в настоящей работе.

Применённые в данной работе сценарии не учитывали как лесохозяйственную деятельность (уход за культурами, выборочные рубки и т. п.), так и возможные нарушающие воздействия (пожары, ветровалы, влияние фитопатогенов). Очевидно, что эффект данных воздействий на динамику пулов углерода будет существенным, однако количество возможных вариантов сценариев с учётом возможных вариантов воздействий и их комбинаций очень велико и может быть темой отдельного исследования. Также в рамках данного исследования не рассматривалось влияние прогнозируемых изменений климата, которые, как ожидается, могут оказать существенное влияние на экосистемный баланс углерода. В целом, прогнозируемое влияние изменений климата заключается в снижении запасов органического вещества вследствие роста скоростей минерализации (Gutiérrez-Salazar, Medrano-Vizcaíno, 2019; Stuble et al., 2019). В то же время влияние изменений климата на накопление углерода в биомассе древостоя может иметь более сложный характер, поскольку наряду с положительным эффектом, вызванным ростом количества азота в доступных для растений формах вследствие увеличения скорости минерализации и влиянием увеличивающейся концентрации CO_2 в атмосфере, также может иметь место отрицательное влияние, связанное со снижением влажности почвы и воздуха. Однако рассмотрение этого аспекта увеличило бы объём исследования, поэтому было решено ограничиться стационарным климатическим сценарием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования нами продемонстрирована перспективность использования прогнозного имитационного моделирования как для построения базовой линии, так и для прогнозирования результатов проектной деятельности, а также для выбора оптимального сценария лесовосстановления. С точки зрения поглощения CO_2 в пределах установленного горизонта прогноза (100 лет) создание культур *Pinus sylvestris* оказалось менее эффективным, по сравнению с естественным зарастанием мелколиственным древостоем, что противоречит принципу дополнительности. Если сравнивать разные варианты лесных культур, наибольшая эффективность в накоплении углерода спрогнозирована для сме-

шанных культур *Pinus sylvestris* с примесью 2–3 единиц мелколиственных видов (*Betula* spp. и *Populus tremula*).

Также следует учитывать сложности, сопровождающие искусственное лесовосстановление. В частности, создание монокультур *Pinus sylvestris* создаёт риски возникновения пожаров и массового распространения фитопатогенов, что приведёт к смене поглощения парниковых газов на их эмиссию, а формирующиеся древостои, как правило, характеризуются невысоким биологическим разнообразием, что оказывает существенное влияние на способность лесов к выполнению комплекса экосистемных функций (Lukina et al., 2021). Кроме того, процесс создания культур характеризуется высокой начальной стоимостью (расчистка участка, подготовка почвы, посадка) и затратами на поддержание (агротехнический уход, рубки ухода и пр.). Мероприятия по подготовке участка сопровождаются дополнительными эмиссиями вследствие удаления подроста, нарушений живого напочвенного покрова и почвы, а также вследствие сжигания ископаемого топлива при работе техники.

Однако осуществление проектов по искусственному лесовосстановлению может иметь существенное значение для воспроизводства ценных лесных ресурсов, но в данном случае необходимо принимать во внимание способ использования заготовленной древесины, поскольку от этого будет зависеть продолжительность периода консервации углерода (Wihersaari, 2005). Важно использовать средства прогнозного моделирования для сравнительной оценки разных вариантов лесовосстановления, а также для оценки возможных рисков. Значительная часть перечисленных выше рисков может быть нивелирована путём создания ориентированных на лесоклиматические задачи проектов смешанных культур, например, с использованием полишахматного или кулисного смешения нескольких видов вместо рядного, обязательным уходом за культурами и т. д. (Коротков, 2016).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «РУСАЛ Менеджмент» (сбор экспериментального материала, планирование и проведение имитационных экспериментов, анализ результатов) и АО «Апатит» в рамках договора АПТ-58-0000583 от 31.01.2022 г. (расширенная параметризация и валидация моделей).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность работникам Дзержинского и Иркутского лесничеств за неоценимую помощь в сборе исходных данных, а также научным сотрудникам Института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля: В. Ю. Вертянкиной, П. Д. Полумиевой и А. А. Труновy за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богородская А. В., Иванова Г. А. Микробиологический мониторинг состояния почв после пожаров в сосново-лиственничных насаждениях нижнего Приангарья // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. XXVIII. № 1–2. С. 98–106.

Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. URL: http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (дата обращения: 12.11.2021).

Воробьёва Л. А., Лопухина О. В., Салпагарова И. А., Расторова О. Г, Андреев Д. П., Ладонин Д. В., Фёдорова Н. Н., Касаткина Г. А., Глебова Г. И., Рудакова Т. А. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

Грабарник П. Я., Чертов О. Г., Чумаченко С. И., Шанин В. Н., Ханина Л. Г., Бобровский М. В., Быховец С. С., Фролов П. В. Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы // Математическая биология и биоинформатика. 2019а. Т. 14. № 2. С. 488–499. DOI: 10.17537/2019.14.488.

Грабарник П. Я., Шанин В. Н., Чертов О. Г., Припутина И. В., Быховец С. С., Петропавловский Б. С., Фролов П. В., Зубкова Е. В., Шашков М. П., Фролова Г. Г. Моделирование динамики лесных экосистем как инструмент прогнозирования и управления лесами // Лесоведение. 2019б. № 6. С. 488–500. DOI: 10.1134/S0024114819030033.

Грозовская И. С., Ханина Л. Г., Смирнов В. Э., Бобровский М. В., Романов М. С., Глухова Е. М. Биомасса напочвенного покрова в еловых лесах Костромской области // Лесоведение. 2015. № 1. С. 63–76.

Зинченко С. И. Характеристика отдельных физических и почвенно-гидрологических свойств метрового профиля серой лесной почвы // Владимирский земледелец. 2018. № 1 (83). С. 2–5. DOI: 10.24411/2225-2584-2018-00001.

Ильин Б. М., Булыгина О. Н., Богданова Э. Г., Веселов В. М., Гаврилова С. Ю. Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. URL: http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov#описание-массива-данных (дата обращения: 12.11.2021).

Коротков В. Н. Концепция восстановления разновозрастных полидоминантных хвойно-широколиственных лесов Восточной Европы // Устойчивое лесопользование. 2016. № 3 (47). С. 2–7.

Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утверждены Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р. URL: http://docs.cntd.ru/document/456077289 (дата обращения: 06.05.2022).

Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах (отв. ред. В. Н. Кудеяров). М.: Наука, 2007. 380 с.

Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 708 с.

Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с.

Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Усольцев В. А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.

Усольцев В. А. Продукционные показатели и конкурентные отношения деревьев. Исследование зависимостей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2013. 556 с.

Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесообразующих пород в климатических градиентах Евразии (к менеджменту биосферных функций лесов). Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. 383 с.

Шанин В. Н., Грабарник П. Я., Быховец С. С., Чертов О. Г., Припутина И. В., Шашков М. П., Иванова Н. В., Стаменов М. Н., Фролов П. В., Зубкова Е. В., Ручинская Е. В. Параметризация модели продукционного процесса для доминирующих видов деревьев Европейской части РФ в задачах моделирования динамики лесных экосистем // Математическая биология и биоинформатика. 2019. Т. 14. № 1. С. 54–76. DOI: 10.17537/2019.14.54.

Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). 2-е изд. М.: Федеральное агентство лесного хозяйства и Международный институт прикладного системного анализа, 2008. 886 с.

Шерстюков А. Б. Описание массива суточных данных о температуре почвы на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям

Российской Федерации (версия 2). URL: http://meteo.ru/data/164-soil-temperature#описание-массива-данных (дата обращения: 12.11.2021).

Ahtikoski A., Rämö J., Juutinen A., Shanin V., Mäkipää R. Continuous cover forestry and cost of carbon abatement on mineral soils and peatlands // Frontiers in Environmental Science. 2022. Vol. 10. ID 837878. DOI: 10.3389/fenvs.2022.83787.

Bykhovets S. S., Komarov A. S. A simple statistical model of soil climate with a monthly step // Eurasian Soil Science. 2002. Vol. 35. No 4. P. 392–400.

Cavard X., Bergeron Y., Chen H. Y. H., Paré D., Laganiére J., Brassard B. Competition and facilitation between tree species change with stand development // Oikos. 2011. Vol. 120. P. 1683–1695. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.19294.x.

Chertov O. G., Komarov A. S., Nadporozhskaya M. A., Bykhovets S. S., Zudin S. L. ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling. 2001. Vol. 138. P. 289–308. DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00409-9.

Chertov O., Bhatti J. S., Komarov A. Impact of temperature increase and precipitation alteration at climate change on forest productivity and soil carbon in boreal forest ecosystems in Canada and Russia: Simulation approach with the EFIMOD model, In: Climate Change and Variability. 2010. pp. 303–326. DOI: 10.5772/9814.

Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Priputina I., Zubkova E., Shashkov M. Romul_Hum — A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity // Ecological Modelling. 2017a. Vol. 345. P. 125–139. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024.

Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frolov P., Kalinina O., Priputina I., Zubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity // Ecological Modelling. 2017b. Vol. 345. P. 140–149. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013.

Frolov P. V., Shanin V. N., Zubkova E. V., Bykhovets S. S., Grabarnik P. Ya. CAMPUS-S — The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contribution to the dynamics of carbon and nitrogen. I. Problem formulation and description of the model // Ecological Modelling. 2020a. Vol. 431. ID 109184. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109184.

Frolov P. V., Zubkova E. V., Shanin V. N., Bykhovets S. S., Mäkipää R., Salemaa M. CAMPUS-S — The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contri-

bution to the dynamics of carbon and nitrogen. II. Parameterization, validation and simulation experiments // Ecological Modelling. 2020b. Vol. 431. ID 109183. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109183.

Gutiérrez-Salazar P., Medrano-Vizcaíno P. The effects of climate change on decomposition processes in Andean Paramo ecosystem-synthesis, a systematic review // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. Vol. 17. P. 4957–4970. DOI: 10.15666/aeer/1702_49574970.

Hilli S., Stark S., Derome J. Litter decomposition rates in relation to litter stocks in boreal coniferous forests along climatic and soil fertility gradients // Applied Soil Ecology. 2010. Vol. 46. No 2. P. 200–208. DOI: 10.1016/j.apsoil.2010.08.012.

Jia Y., Yu G., Gao Y., He N., Wang Q., Jiao C., Zuo Y. Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements // Nature Scientific Reports. 2016. Vol. 6. ID 19810. DOI: 10.1038/srep19810.

Juutinen A., Ahtikoski A., Mäkipää R., Shanin V. Effect of harvest interval and intensity on the profitability of uneven-aged management of Norway spruce stands // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2018. Vol. 91. No 5. P. 589–602. DOI: 10.1093/forestry/cpy018.

Juutinen A., Shanin V., Ahtikoski A., Rämö J., Mäkipää R., Laiho R., Sarkkola S., Laurén A., Penttilä, T., Hökkä H., Saarinen M. Profitability of continuous-cover forestry in Norway spruce dominated peatland forest and the role of water table // Canadian Journal of Forest Research. 2021. Vol. 51. No 6. P. 859–870. DOI: 10.1139/cjfr-2020-0305.

Komarov A. S., Chertov O. G., Zudin S. L., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2 — A model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. Vol. 170. No 2–3. P. 373–392. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Priputina I., Zubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // Ecological Modelling. 2017a. Vol. 345. P. 113–124. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007.

Komarov A. S., Ginzhul L. K., Shanin V. N., Bykhovets S. S., Bobkova K. S., Kuznetsov M. A., Manov A. V., Osipov A. F. Pattern of biomass partitioning into fractions of boreal trees // Biology Bulletin. 2017b. Vol. 44. No 6. P. 626–633. DOI: 10.1134/S1062359017060061.

Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labeling // Soil Biology and Biochemistry. 2009. Vol. 41. No 2. P. 210–219. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.10.016.

Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. 2015. Vol. 528. P. 60–68. DOI: 10.1038/nature16069.

Lehtonen A., Linkosalo T., Peltoniemi M., Sievänen R., Mäkipää R., Tamminen P., Salemaa M., Nieminen T., Ťupek B., Heikkinen J., Komarov A. Forest soil carbon stock estimates in a nationwide inventory: evaluating performance of the ROMULv and Yasso07 models in Finland // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. No 11. P. 4169–4183. DOI: 10.5194/gmd-9-4169-2016.

Lippke B., Puettmann M., Oneil E., Oliver C. D. The plant a trillion trees campaign to reduce global warming — Fleshing out the concept // Journal of Sustainable Forestry. 2021. Vol. 40. No 1. P. 1–31. DOI: 10.1080/10549811.2021.1894951.

Lukina N. V., Geraskina A. P., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Kuprin A. V., Chernov T. I., Chumachenko S. I., Shanin V. N., Kuznetsova A. I., Tebenkova D. N., Gornova M. V. Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects // Forest Science Issues. 2021. Vol. 4. No 1. P. 1–60. DOI: 10.31509/2658-607x-202141k-60.

Morén A. S., Lindroth A. CO_2 exchange at the floor of a boreal forest // Agricultural and Forest Meteorology. 2000. Vol. 101. No 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00160-4.

Muukkonen P., Mäkipää R. Empirical biomass models of understorey vegetation in boreal forests according to stand and site attributes // Boreal Environmental Research. 2006. Vol. 11. No 5. P. 355–369.

Piñeiro G., Perelman S., Guerschman J. P., Paruelo J. M. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? // Ecological Modelling. 2008. Vol. 216. No 3. P. 316–322. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006.

Pukkala T., Lähde E., Laiho O. Continuous cover forestry in Finland — Recent research results, In: Pukkala, T., von Gadow, K. (Eds.), Continuous Cover Forestry, second ed. Springer, Berlin-Heidelberg, 2012. P. 85–128. DOI: 10.1007/978-94-007-2202-6_3.

Shanin V. N., Komarov A. S., Khoraskina Yu. S., Bykhovets S. S., Linkosalo T., Mäkipää R. Carbon turnover in mixed stands: Modelling possible shifts under climate change // Ecological Modelling. 2013. Vol. 251. P. 232–245. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.12.015.

Shanin V. N., Komarov A. S., Mäkipää R. Tree species composition affects productivity and carbon dynamics of dif-

ferent site types in boreal forests // European Journal of Forest Research. 2014. Vol. 133. P. 273–286. DOI: 10.1007/s10342-013-0759-1.

Shanin V., Mäkipää R., Shashkov M., Ivanova N., Shestibratov K., Moskalenko S., Rocheva L., Grabarnik P., Bobkova K., Manov A., Osipov A., Burnasheva E., Bezrukova M. New procedure for the simulation of belowground competition can improve the performance of forest simulation models // European Journal of Forest Research. 2015. Vol. 134. P. 1055–1074. DOI: 10.1007/s10342-015-0909-8.

Shanin V. N., Grabarnik P. Ya., Shashkov M. P., Ivanova N. V., Bykhovets S. S., Frolov P. V., Stamenov M. N. Crown asymmetry and niche segregation as an adaptation of trees to competition for light: conclusions from simulation experiments in mixed boreal stands // Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences. 2020. Vol. 12. No 1. P. 26–49. DOI: 10.5281/zenodo.3759256.

Shanin V., Juutinen A., Ahtikoski A., Frolov P., Chertov O., Rämö J., Lehtonen A., Laiho R., Mäkiranta P., Nieminen M., Laurén A., Sarkkola S., Penttilä T., Ťupek B., Mäkipää R. Simulation modelling of greenhouse gas balance in continuous-cover forestry of Norway spruce stands on nutrient-rich drained peatlands // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 496. ID 119479. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119479.

Stuble K. L., Ma S., Liang J., Luo Y., Classen A. T., Souza L. Long-term impacts of warming drive decomposition and accelerate the turnover of labile, not recalcitrant, carbon // Ecosphere. 2019. Vol. 10. No 5. ID e02715. DOI: 10.1002/ecs2.2715.

The greenhouse gas protocol. The land use, land-use change, and forestry guidance for GHG project accounting. Washington: Word Resource Institute, 2006. 97 p. URL: ttps://ghgprotocol.org/standards/project-protocol (дата обращения: 06.05.2022).

Ťupek B., Minkkinen K., Kolari P., Starr M., Chan T., Alm J., Vesala T., Laine J., Nikinmaa E. Forest floor versus ecosystem CO_2 exchange along boreal ecotone between upland forest and lowland mire // Tellus B. 2008. Vol. 60. No 2. P. 153–166. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2007.00328.x.

Verified Carbon Standard, v 4.2. Issued: 19 September 2019. Updated: 20 January 2022. URL: https://verra.org/project/vcs-program/rules-and-requirements/ (дата обращения: 06.05.2022).

Wihersaari M. Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue // Biomass and Bioenergy. 2005. Vol. 28. No 5. P. 444–453. DOI: 10.1016/j.biombioe.2004.11.011.

REFERENCES

Ahtikoski A., Rämö J., Juutinen A., Shanin V., Mäkipää R., Continuous cover forestry and cost of carbon abatement on mineral soils and peatlands, *Frontiers in Environmental Science*, 2022, Vol. 10, ID 837878. DOI: 10.3389/fenvs.2022.83787.

Bogorodskaya A. V., Ivanova G. A., Mikrobiologicheskiy monitoring sostoyaniya pochv posle pozharov v sosnovo-listvennichnykh nasazhdeniyakh nizhnego Priangar'ya (Microbiological monitoring of the state of soils after fires in pine-larch plantations of the lower Angara region), *Khvoynye boreal'noy zony*, 2011, Vol. XXVIII, No 1–2, pp. 98–106.

Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Trofimenko L. T., Shvets N. V., *Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoy temperatury vozdukha na stantsiyakh Rossii* (Description of the data array of average monthly air temperature at stations in Russia). Certificate of state registration of the database No 2014621485, available at: http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (December 11, 2021).

Bykhovets S. S., Komarov A. S., A simple statistical model of soil climate with a monthly step, *Eurasian Soil Science*, 2002, Vol. 35, No 4, pp. 392–400.

Cavard X., Bergeron Y., Chen H. Y. H., Paré D., Laganiére J., Brassard B., Competition and facilitation between tree species change with stand development, *Oikos*, 2011, Vol. 120, pp. 1683–1695. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.19294.x.

Chertov O., Bhatti J. S., Komarov A. Impact of temperature increase and precipitation alteration at climate change on forest productivity and soil carbon in boreal forest ecosystems in Canada and Russia: Simulation approach with the EFIMOD model, In: *Climate Change and Variability*, 2010. pp. 303–326. DOI: 10.5772/9814.

Chertov O. G., Komarov A. S., Nadporozhskaya M. A., Bykhovets S. S., Zudin S. L., ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling, *Ecological Modelling*, 2001, Vol. 138, pp. 289–308, DOI: 10.1016/S0304-3800(00)00409-9.

Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Priputina I., Zubkova E., Shashkov M., Romul_Hum — A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity, *Ecological Modelling*, 2017a, Vol. 345, pp. 125–139, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024.

Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frolov P., Kalinina O., Priputina I., Zubkova E., Romul_Hum

model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity, *Ecological Modelling*, 2017b, Vol. 345, pp. 140–149, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013.

Frolov P. V., Shanin V. N., Zubkova E. V., Bykhovets S. S., Grabarnik P. Ya., CAMPUS-S — The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contribution to the dynamics of carbon and nitrogen, I. Problem formulation and description of the model, *Ecological Modelling*, 2020a, Vol. 431, ID 109184. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109184.

Frolov P. V., Zubkova E. V., Shanin V. N., Bykhovets S. S., Mäkipää R., Salemaa M., CAMPUS-S — The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contribution to the dynamics of carbon and nitrogen. II. Parameterization, validation and simulation experiments, *Ecological Modelling*, 2020b, Vol. 431, ID 109183, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109183.

Grabarnik P. Ya., Chertov O. G., Chumachenko S. I., Shanin V. N., Khanina L. G., Bobrovskiy M. V., Bykhovets S. S., Frolov P. V., Integratsiya imitatsionnykh modeley dlya kompleksnoy otsenki ekosistemnykh uslug lesov: metodicheskie podkhody (Integration of simulation models for the integrated assessment of forest ecosystem services: methodological approaches), *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, 2019a, Vol. 14, No 2, pp. 488–499. DOI: 10.17537/2019.14.488.

Grabarnik P. Ya., Shanin V. N., Chertov O. G., Priputina I. V., Bykhovets S. S., Petropavlovskiy B. S., Frolov P. V., Zubkova E. V., Shashkov M. P., Frolova G. G., Modelirovanie dinamiki lesnykh ekosistem kak instrument prognozirovaniya i upravleniya lesami (Modelling the dynamics of forest ecosystems as a tool for forecasting and forest management), *Lesovedenie*, 2019b, No 6, pp. 488–500, DOI: 10.1134/S0024114819030033.

Grozovskaya I. S., Khanina L. G., Smirnov V. E., Bobrovskiy M. V., Romanov M. S., Glukhova E. M., Biomassa napochvennogo pokrova v elovykh lesakh Kostromskoy oblasti (Biomass of the ground cover in the spruce forests of the Kostroma region), *Lesovedenie*, 2015, No 1, pp. 63–76.

Gutiérrez-Salazar P., Medrano-Vizcaíno P., The effects of climate change on decomposition processes in Andean Paramo ecosystem-synthesis, a systematic review, *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, Vol. 17, pp. 4957–4970, DOI: 10.15666/aeer/1702_49574970.

Hilli S., Stark S., Derome J., Litter decomposition rates in relation to litter stocks in boreal coniferous forests along climatic and soil fertil-

ity gradients, *Applied Soil Ecology*, 2010, Vol. 46, No 2, pp. 200–208, DOI: 10.1016/j.apsoil.2010.08.012.

Il'in B. M., Bulygina O. N., Bogdanova E. G., Veselov V. M., Gavrilova S. Yu., *Opisanie massiva mesyachnykh summ osadkov, s ustraneniem sistematicheskikh pogreshnostey osadkomernykh priborov*, (Description of the array of monthly precipitation sums, with the elimination of systematic errors of precipitation gauges), available at: http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov#описание-массива-данных (December 11, 2021).

Jia Y., Yu G., Gao Y., He N., Wang Q., Jiao C., Zuo Y., Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements, *Nature Scientific Reports*, 2016, Vol. 6, ID 19810. DOI: 10.1038/srep19810.

Juutinen A., Ahtikoski A., Mäkipää R., Shanin V., Effect of harvest interval and intensity on the profitability of uneven-aged management of Norway spruce stands, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2018, Vol. 91, No 5, pp. 589–602, DOI: 10.1093/forestry/cpy018.

Juutinen A., Shanin V., Ahtikoski A., Rämö J., Mäkipää R., Laiho R., Sarkkola S., Laurén A., Penttilä, T., Hökkä H., Saarinen M., Profitability of continuous-cover forestry in Norway spruce dominated peatland forest and the role of water table, Canadian Journal of Forest Research, 2021, Vol. 51, No 6, pp. 859–870, DOI: 10.1139/cjfr-2020-0305.

Komarov A. S., Chertov O. G., Zudin S. L., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E., EFIMOD 2 — A model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems, *Ecological Modelling*, 2003, Vol. 170, No 2–3, pp. 373–392, DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Priputina I., Zubkova E., Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing, *Ecological Modelling*, 2017a, Vol. 345, pp. 113–124, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007.

Komarov A. S., Ginzhul L. K., Shanin V. N., Bykhovets S. S., Bobkova K. S., Kuznetsov M. A., Manov A. V., Osipov A. F., Pattern of biomass partitioning into fractions of boreal trees, *Biology Bulletin*, 2017b, Vol. 44, No 6, pp. 626–633, DOI: 10.1134/S1062359017060061.

Korotkov V. N., Kontseptsiya vosstanovleniya raznovozrastnykh polidominantnykh khvoyno-shirokolistvennykh lesov Vostochnoy Evropy (The

concept of restoration of uneven-aged polydominant coniferous-broad-leaved forests of Eastern Europe), *Ustoychivoe lesopol'zovanie*, 2016, No 3 (47), pp. 2–7.

Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X., Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by $_{14}C$ labeling, *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, Vol. 41, No 2, pp. 210–219, DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.10.016.

Lehmann J., Kleber M., The contentious nature of soil organic matter, *Nature*, 2015, Vol. 528, pp. 60–68, DOI: 10.1038/nature16069.

Lehtonen A., Linkosalo T., Peltoniemi M., Sievänen R., Mäkipää R., Tamminen P., Salemaa M., Nieminen T., Ťupek B., Heikkinen J., Komarov A., Forest soil carbon stock estimates in a nationwide inventory: evaluating performance of the ROMULv and Yasso07 models in Finland, *Geoscientific Model Development*, 2016, Vol. 9, No 11, pp. 4169–4183, DOI: 10.5194/gmd-9-4169-2016.

Lippke B., Puettmann M., Oneil E., Oliver C. D., The plant a trillion trees campaign to reduce global warming — Fleshing out the concept, *Journal of Sustainable Forestry*, 2021, Vol. 40, No 1, pp. 1–31. DOI: 10.1080/10549811.2021.1894951.

Lukina N. V., Geraskina A. P., Gornov A. V., Shevchenko N. E., Kuprin A. V., Chernov T. I., Chumachenko S. I., Shanin V. N., Kuznetsova A. I., Tebenkova D. N., Gornova M. V., Biodiversity and climate-regulating functions of forests: current issues and research prospects, *Forest Science Issues*, 2021, Vol. 4, No 1, pp. 1–60, DOI: 10.31509/2658-607x-202141k-60.

Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema pogloshcheniya parnikovykh gazov (Guidelines for quantifying greenhouse gas sequestration), approved by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 30.06.2017 No 20-p, available at: http://docs.cntd.ru/document/456077289 (June 05, 2022).

Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnykh ekosistemakh (Modelling the dynamics of organic matter in forest ecosystems), Kudeyarov V. N. (ed.), Moscow: Nauka, 2007. 380 p.

Morén A. S., Lindroth A., CO_2 exchange at the floor of a boreal forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, Vol. 101, No 1, pp. 1–14, DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00160-4.

Muukkonen P., Mäkipää R., Empirical biomass models of understorey vegetation in boreal forests according to stand and site attributes, *Boreal Environmental Research*, 2006, Vol. 11, No 5, pp. 355–369.

Piñeiro G., Perelman S., Guerschman J. P., Paruelo J. M., How to evaluate models:

Observed vs. predicted or predicted vs. observed? Ecological Modelling, 2008, Vol. 216, No 3, pp. 316–322, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006.

Pukkala T., Lähde E., Laiho O. Continuous cover forestry in Finland — Recent research results, In: *Continuous Cover Forestry*, second ed., Pukkala T., von Gadow K. (eds.), Berlin-Heidelberg: Springer, 2012, pp. 85–128, DOI: 10.1007/978-94-007-2202-6_3.

Shanin V. N., Komarov A. S., Khoraskina Yu. S., Bykhovets S. S., Linkosalo T., Mäkipää R., Carbon turnover in mixed stands: Modelling possible shifts under climate change, *Ecological Modelling*, 2013, Vol. 251, pp. 232–245, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.12.015.

Shanin V. N., Komarov A. S., Mäkipää R., Tree species composition affects productivity and carbon dynamics of different site types in boreal forests, *European Journal of Forest Research*, 2014, Vol. 133, pp. 273–286, DOI: 10.1007/s10342-013-0759-1.

Shanin V., Mäkipää R., Shashkov M., Ivanova N., Shestibratov K., Moskalenko S., Rocheva L., Grabarnik P., Bobkova K., Manov A., Osipov A., Burnasheva E., Bezrukova M., New procedure for the simulation of belowground competition can improve the performance of forest simulation models, European Journal of Forest Research, 2015, Vol. 134, pp. 1055–1074, DOI: 10.1007/s10342-015-0909-8.

Shanin V. N., Grabarnik P. Ya., Bykhovets S. S., Chertov O. G., Priputina I. V., Shashkov M. P., Ivanova N. V., Stamenov M. N., Frolov P. V., Zubkova E. V., Ruchinskaya E. V., Parametrizatsiya modeli produktsionnogo protsessa dlya dominiruyushchikh vidov derev'ev Evropeyskoy chasti RF v zadachakh modelirovaniya dinamiki lesnykh ekosistem (Parameterization of the production process model for the dominant tree species of the European part of the Russian Federation in the problems of modelling the dynamics of forest ecosystems), *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, 2019, Vol. 14, No 1, pp. 54–76, DOI: 10.17537/2019.14.54.

Shanin V. N., Grabarnik P. Ya., Shashkov M. P., Ivanova N. V., Bykhovets S. S., Frolov P. V., Stamenov M. N., Crown asymmetry and niche segregation as an adaptation of trees to competition for light: conclusions from simulation experiments in mixed boreal stands, *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*, 2020, Vol. 12, No 1, pp. 26–49, DOI: 10.5281/zenodo.3759256.

Shanin V., Juutinen A., Ahtikoski A., Frolov P., Chertov O., Rämö J., Lehtonen A., Laiho R., Mäkiranta P., Nieminen M., Laurén A., Sarkkola S., Penttilä T., Ťupek B., Mäkipää R. Simulation modelling of greenhouse gas balance in continuous-cover forestry of Norway spruce stands on nutrient-rich drained peatlands, *For-*

est Ecology and Management, 2021, Vol. 496, ID 119479, DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119479.

Sherstyukov A. B., *Opisanie massiva sutochnykh dannykh o temperature pochvy na glubinakh do 320 sm po meteorologicheskim stantsiyam Rossiyskoy Federatsii (versiya 2)* (Description of the array of daily data on soil temperature at depths up to 320 cm for meteorological stations of the Russian Federation (version 2)), available at: http://meteo.ru/data/164-soil-temperature#описание-массива-данных (Decemder 11, 2021).

Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Nil'sson S., Buluy Yu. I., *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdeniy osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoy Evrazii (normativno-spravochnye materialy). 2-e izd.* (Tables and models of growth and productivity of plantations of the main forest-forming species of Northern Eurasia (regulatory reference materials). 2nd ed.), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaystva i Mezhdunarodnyy institut prikladnogo sistemnogo analiza, 2008, 886 p.

Stuble K. L., Ma S., Liang J., Luo Y., Classen A. T., Souza L., Long-term impacts of warming drive decomposition and accelerate the turnover of labile, not recalcitrant, carbon, *Ecosphere*, 2019, Vol. 10, No 5, ID e02715, DOI: 10.1002/ecs2.2715.

The greenhouse gas protocol. The land use, land-use change, and forestry guidance for GHG project accounting. Washington: Word Resource Institute, 2006. 97 p., available at: https://ghgprotocol.org/standards/project-protocol (June 05, 2022).

Ťupek B., Minkkinen K., Kolari P., Starr M., Chan T., Alm J., Vesala T., Laine J., Nikinmaa E. Forest floor versus ecosystem CO_2 exchange along boreal ecotone between upland forest and lowland mire, *Tellus B*, 2008, Vol. 60, No 2, pp. 153–166, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2007.00328.x

Usol'tsev V. A., *Fitomassa lesov Severnoy Evrazii: baza dannykh i geografiya* (Phytomass of Northern Eurasia forests: database and geography), Ekaterinburg: UrO RAN, 2001. 708 p.

Usol'tsev V. A., *Fitomassa lesov Severnoy Evrazii: normativy i elementy geografii* (Phytomass of Northern Eurasia forests: standards and elements of geography), Ekaterinburg: UrO RAN, 2002. 763 p.

Usol'tsev V. A., *Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoy Evrazii: metody, baza dannykh i ee prilozheniya* (Biological productivity of Northern Eurasian forests: methods, database and applications), Ekaterinburg: UrO RAN, 2007. 636 p.

Usol'tsev V. A., *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* (Phytomass and primary production of Eurasian

forests), Ekaterinburg: UrO RAN, 2010. 570 p.

Usol'tsev V. A., *Produktsionnye pokazateli i konkurentnye otnosheniya derev'ev. Issledovanie zavisimostey* (Production indicators and competitive relations of trees, Dependency research), Ekaterinburg: UGLTU, 2013, 556 p.

Usol'tsev V. A., *Biologicheskaya produktivnost' lesoobrazuyushchikh porod v klimaticheskikh gradientakh Evrazii (k menedzhmentu biosfernykh funktsiy lesov)* (Biological productivity of forest-forming species in the climatic gradients of Eurasia (towards the management of the biospheric functions of forests)), Ekaterinburg: UGLTU, 2016. 383 p.

Verified Carbon Standard, v 4.2. Issued: 19 September 2019. Updated: 20 January 2022. available at: https://verra.org/project/vcs-program/rules-and-requirements/ (June 05, 2022).

Vorob'eva L. A., Lopukhina O. V., Salpagarova I. A., Rastorova O. G, Andreev D. P., Ladonin D. V., Fedorova N. N., Kasatkina G. A., Glebova G. I., Rudakova T. A., *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* (Theory and practice of chemical analysis of soils), Moscow: GEOS 2006, 400 p.

Wihersaari M., Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue, *Biomass and Bioenergy*, 2005, Vol. 28, No 5, pp. 444–453, DOI: 10.1016/j.biombioe.2004.11.011.

Zinchenko S. I., Kharakteristika otdel'nykh fizicheskikh i pochvenno-gidrologicheskikh svoystv metrovogo profilya seroy lesnoy pochvy (Characteristics of individual physical and soil-hydrological properties of the 1-m profile of grey forest soil), *Vladimirskiy zemledelets*, 2018, No 1 (83), pp. 2–5, DOI: 10.24411/2225-2584-2018-00001.

CAN ARTIFICIAL REFORESTATION ALWAYS BE A FOREST CLIMATIC PROJECT?

V. N. Shanin [1, 2, 3*], P. V. Frolov [1], V. N. Korotkov [1]

[1] *Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science of the RAS, Federal Research Centre "Pushchino Scientific Centre of Biological Research RAS" Institutskaya st., 2, bld. 2, Pushchino, Moscow region, 142290, Russia*

[2] *Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia*

[3] *Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology Glebovskaya st. 20B, Moscow, 107258, Russia*

* shaninvn@gmail.com

Received: 23.05.2022
Revised: 15.06.2022
Accepted: 20.06.2022

Currently, forest climatic projects aimed at enhancing the carbon sequestration in forest ecosystems are becoming very popular. The main requirements for such projects include additionality, permanence and the absence of leakage. Compliance with these requirements ensures that the project fulfils the tasks at which it is aimed. Predictive modelling can be one of the tools for checking the compliance of forest climate projects with the above principles. The purpose of the study was to assess the prospects for carbon accumulation during the implementation of reforestation projects in the Krasnoyarsk and Irkutsk regions. An assessment of the carbon balance in the territory of artificial reforestation projects was carried out at the baseline (natural regeneration of *Betula* spp. and *Populus tremula* L.) and during the implementation of the forest climatic project (planting of *Pinus sylvestris* L.) with a forecast for 100 years. The results show that during the implementation of the project, the achieved level of emissions is higher and the level of carbon sequestration is lower compared to the baseline, which contradicts the principle of additionality, and, therefore, artificial reforestation cannot be considered as a forest climatic project. The highest efficiency in carbon sequestration for mixed plantations is predicted for mixtures of *Pinus sylvestris* with 20–30 percent of small-leaved species (*Betula* spp. and *Populus tremula*). However, the implementation of artificial reforestation projects can be essential for the reproduction of valuable forest resources, but in this case it is necessary to take into account the way the obtained phytomass of trees is used, since the length of the carbon conservation period will depend on this.

Key words: *forest climatic projects, reforestation, mixed plantations, carbon budget, greenhouse gases, predictive modelling*

Рецензент: к. б. н. Осипов А. Ф.