

УДК 004.942:574.45:574.472:630.1:631.452

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ СТОКА УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ ЮЖНОГО ПОДМОСКОВЬЯ ПРИ РАЗНЫХ СЦЕНАРИЯХ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ¹

© 2024 г. В. Н. Шанин^{а, б, *}, И. В. Припутина^а, П. В. Фролов^а, Д. Н. Тебенькова^б,
С. С. Быховец^а, С. И. Чумаченко^{б, в}

^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, д. 2, корп. 2, Пушкино, Московская обл., 142290 Россия

^бЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

^вМытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
ул. 1-я Институтская, д. 1, Мытищи, Московская обл., 141005 Россия

*E-mail: shaninvn@gmail.com

Поступила в редакцию 28.07.2023 г.

После доработки 07.10.2023 г.

Принята к публикации 08.02.2024 г.

На примере Данковского участкового лесничества (юг Московской обл., подзона хвойно-широколиственных лесов) рассмотрены результаты имитационного моделирования динамики пулов и потоков углерода в лесных экосистемах при разных сценариях ведения лесного хозяйства. Проанализировано влияние на баланс углерода таких изменений существующей практики лесопользования, как заповедный режим, сокращение доли лесных земель в результате жилой застройки, зонирование территории с акцентом на повышении рекреационной роли лесов. В вычислительных экспериментах использован комплекс отечественных моделей: динамическая модель древостоя FORRUS-S, модель динамики органического вещества почв Romul_Hum, модель гидротермического режима почв SCLISS. Расчеты выполнялись для временного отрезка 100 лет на поведельном уровне, а также были агрегированы на уровне всего лесничества. Разнообразие типов лесорастительных условий (ТЛУ), наряду с видовым разнообразием и начальной разновозрастностью насаждений, определило значительное варьирование рассчитанных показателей продукции древостоев, количества и качества поступающего в почву растительного опада. Для всех сценариев модельные оценки показали увеличение запасов углерода в древостоях в первые 40–60 лет с последующим снижением расчетных величин. В сценарии заповедания наблюдался рост запасов органического вещества в лесной подстилке и почве: для ТЛУ С2 и С3 увеличение за 100 лет составило примерно 5–10 кг м⁻², для остальных ТЛУ — на уровне 2–3 кг м⁻² в пересчете на углерод. В сценариях хозяйственного использования лесов показано относительное “выравнивание” территории лесничества по показателям почвенных запасов углерода в сторону более низких значений. Максимальный экосистемный сток углерода рассчитан для ТЛУ С2 и С3, минимальный — для А5 и С4. В зависимости от сценария за 100 лет суммарное нетто-поглощение углерода лесами Данковского лесничества (с общей площадью лесопокрытых земель 6836 га) оценивается в диапазоне 0.15–0.57 Тг.

Ключевые слова: лесные экосистемы, депонирование углерода, дыхание почв, структура древостоев, поддержание экосистемных функций.

DOI: 10.31857/S0024114824020028 EDN: REZGAG

Тема оценки экосистемных функций и услуг лесов, их синергии, конфликтов и компромиссов затрагивается во многих отечественных публикациях последних лет и связана с необходимостью разработки практических мер по сохранению и устойчивому управлению лесами (Основы устойчивого ...,

2014; Лукина и др., 2021; Тебенькова и др., 2022). Интенсивность ведения лесного хозяйства существенно влияет на баланс углерода и другие экосистемные функции и услуги лесов (Leppä et al., 2020; Mäkipää et al., 2023), что повышает практическое значение эколого-экономического обоснования

¹Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории

Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

хозяйственной деятельности на региональном и локальном уровнях. Актуальность подобных оценок возрастает в контексте наблюдаемых изменений климата и роли лесных экосистем в его регулировании за счет связывания CO₂ атмосферы и долговременного удержания (депонирования, сток) углерода в фитомассе древостоев и органическом веществе лесных почв (Johnson, Curtis, 2001; Замолодчиков и др., 2021; Иванов и др., 2021; Липка и др., 2021). Общепризнанным инструментом оценок бюджета углерода на разных пространственных масштабах являются математические модели (Швиденко, Щепашенко, 2014; Замолодчиков и др., 2018; Володин, 2021; Столбовой, 2022; Sukhoveeva et al., 2023).

Цель данной работы — сравнительный анализ и оценка методами имитационного моделирования изменений запасов углерода в основных пулах лесных экосистем при разных вариантах ведения лесного хозяйства на локальном уровне, соответствующем территории лесничества как субъекта ведения хозяйства.

Работа выполнена на примере Данковского участкового лесничества, расположенного на юге Московской области, на левобережье р. Оки. Для этой территории, имеющей длительную историю хозяйственного освоения, характерна сложная видовая и возрастная структура древостоев и высокое разнообразие почвенно-растительных условий. Как следствие, “отклик” разных выделов на схожие варианты ведения лесного хозяйства может проявляться по-разному или в разные временные сроки. Использование имитационных моделей позволило учесть вклад подобной пространственной неоднородности в суммарные оценки баланса углерода для данной лесной территории.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Краткая характеристика Данковского лесничества

Данковское участковое лесничество (филиал “Русский лес” ГКУ МО “Мособллес”) расположено примерно в 90 км южнее Москвы в подзоне смешанных хвойно-широколиственных лесов. Протяженность территории лесничества с севера на юг составляет 13.4 км, с запада на восток — 14.2 км. Общая площадь лесного фонда — 7350 га, в том числе лесопокрытых земель — 6836 га. Общее количество выделов по данным таксационного учета 2015 года — 2302. В настоящее время в древостоях преобладают пионерные виды — береза (*Betula* spp.), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) (более 80% по запасу). На долю хвойных видов (сосна обыкновенная и ель европейская (*Picea abies* (L.) Н. Karst.)) приходится более половины от общего запаса древесины. В меньшей степени представлены

широколиственные виды: дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), вяз шершавый (*Ulmus glabra* Huds.), вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.), ясень высокий (*Fraxinus excelsior* L.). Средний возраст насаждений — 63 года, средняя полнота — 0.73, средний класс бонитета — 1.4. Все леса отнесены к защитным. По площади преобладают средневозрастные насаждения (53%), спелые и перестойные занимают 18%, на долю приспевающих приходится 17% от общей площади, молодняки занимают 12%. Разнообразие типов лесорастительных условий (ТЛУ) соответствует 9 вариантам, среди которых по количеству таксационных выделов и занимаемой ими суммарной площади преобладают С2 и С3 (табл. 1).

Условия Южного Подмосковья характеризуются умеренно континентальным климатом, с теплым и часто дождливым летом и умеренно холодной зимой. Продолжительность вегетационного периода составляет 180–190 дней; начало вегетации приходится, как правило, на середину апреля, окончание — на последнюю декаду октября. В ботанико-географическом плане территория лесничества относится к широколиственно-еловым лесам Валдайско-Онежской подпровинции Североевропейской таежной провинции Евразийской таежной области (Растительность ..., 1980). Зональным типом растительности являются полидоминантные хвойно-широколиственные леса. По долинам малых рек распространены леса с преобладанием ольхи черной (*Alnus glutinosa* (L.) Gaerth.).

Согласно почвенному районированию, исследуемая территория принадлежит к Москворецко-Окскому почвенному региону дерново-подзолистых и серых лесных почв (Дмитраков, 1979). В условиях преобладания песчаных отложений наибольшее распространение имеют почвы, которые в новой классификации (Классификация ..., 2004) соответствуют дерново-подбурам,

Таблица 1. Соотношение количества таксационных выделов и площадей с разными типами лесорастительных условий (ТЛУ) на территории Данковского участкового лесничества

ТЛУ	Число выделов	Суммарная площадь, га	Доля от общей площади, %
A2	50	137.1	2.01
A4	3	15.5	0.23
A5	3	8.9	0.13
B2	470	1199.0	17.53
B3	284	835.7	12.22
B4	9	15.9	0.23
C2	489	1618.2	23.67
C3	904	2846.1	41.62
C4	90	161.4	2.36

дерново-подзолам, торфяно-подзолам иллювиально-гумусовым, а также варианты глееземов и глеевых почв.

Имитационные модели

Для прогнозных оценок использовался комплекс моделей. Динамическая модель многовидового разновозрастного древостоя FORRUS-S (Chumachenko et al., 2003) вычисляет прирост запаса древесины на основе детальной процедуры с использованием бонитетных таблиц хода роста основных лесообразующих пород Европейской России. Рост корректируется по условиям освещенности для отдельных когорт (однолетних групп) древесных пород на квадратных участках размером 300 м² по пространственной решетке. Подобная корректировка соответствует эмпирическим или процессным моделям экофизиологического отклика на условия дефицита ресурса. Модель FORRUS-S позволяет рассчитывать запас древесины и древесную биомассу по органам деревьев. Входными данными для модели являются таксационные описания, пространственная структура выделов, сценарии лесохозяйственных мероприятий, включая ограничения на лесохозяйственную деятельность, схема дорожной сети, данные о рынке древесных ресурсов. Шаг модели составляет 5 лет.

Модель динамики органического вещества (ОВ) почвы Romul_Hum (Komarov et al., 2017; Chertov et al., 2017a, 2017b) является новой версией всесторонне тестированной, откалиброванной и широко используемой как в России, так и в других странах модели ROMUL (Chertov et al., 2001; Peltoniemi et al., 2007; Laine-Kaulio et al., 2014). Новая версия модели, сохранив структуру и значения основных параметров, дополнительно вычисляет вклад почвенной фауны в процессы минерализации и гумификации, в т.ч. в формирование устойчивого органического вещества. В модели могут вычисляться скорости минерализации и гумификации неограниченного количества когорт наземного и подземного опада разного качества с оценкой пулов C и N в лесной подстилке и органо-минеральных горизонтах. Определяющими факторами динамики в модели служат гидротермические условия почвы и качество опада (отношение в нем C : N).

Модель Romul_Hum дополнена статистическим генератором данных о гидротермических условиях почвы SCLISS (Быховец, Комаров, 2002), который предназначен для оценки средних месячных значений температуры и влажности почвы (лесная подстилка, органо-минеральная почва) в разных типах леса по стандартным метеорологическим наблюдениям: температуре воздуха, осадкам и, при наличии данных, по температуре почвы под травяным покровом, измеряемой на метеорологических станциях. Расчет климатических параметров производится для лесной подстилки в целом (без

разделения на подгоризонты) и аналогично — в целом для органо-минеральной части профиля.

Ранее проведенная интеграция моделей (Грбарник и др., 2019) позволила реализовать обмен данными между ними. SCLISS передает в Romul_Hum данные о температуре подстилки и органо-минеральных (на глубине 20 см) горизонтов почвы, данные об объемной влажности тех же горизонтов, а также расчетные значения влажности завядания, наименьшей полевой влагоемкости и полной влагоемкости органо-минеральных горизонтов. Romul_Hum передает в SCLISS данные о запасе углерода в лесной подстилке. Комплекс Romul_Hum—SCLISS, в свою очередь, был интегрирован с динамической моделью древостоя FORRUS-S. Последняя передает в Romul_Hum данные о количестве растительного опада, отдельно по каждому древесному виду и фракции биомассы (стволы с корой, ветви, листва или хвоя, скелетные и тонкие корни), а в SCLISS — данные о составе древесного яруса (его видовой состав и общая сомкнутость крон). SCLISS использует данные о видовом составе и сомкнутости древостоя для конверсии метеорологических данных в показатели почвенного климата, которые влияют на коэффициенты скоростей трансформации растительного опада в модели Romul_Hum, что позволяет динамически оценивать влияние изменений в структуре древесной растительности вследствие естественного развития древостоев или лесохозяйственной деятельности на условия под пологом леса.

Использованные данные и имитационные сценарии

Климатический сценарий. Исходный сценарий метеорологических условий был получен на основе данных метеорологической станции Коломна, извлеченных из массивов (Булыгина и др., 2023а, 2023б; Шерстюков, 2023), подготовленных во Всероссийском НИИ гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД) Росгидромета и доступных на сайте организации (www.meteo.ru). Использовались следующие параметры: 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). В значения сумм осадков введена поправка на ветровой недоучет согласно Справочнику по климату ... (1967). Также в качестве входных данных использовалась географическая широта (54.9°). При создании климатического сценария для имитации стационарного климата в качестве базового был выбран период с 1981 по 2010 гг. По данным за этот период вычисляли статистические параметры (табл. 2), на основе которых подмоделью SCLISS были сгенерированы стационарные климатические сценарии требуемой продолжительности — 100 лет. Величины

Таблица 2. Обобщенные характеристики климатического сценария: многолетние среднемесячные температуры воздуха (T_a , °C) и почвы (T_s , °C), а также месячные суммы осадков (P , мм); приведены значения (m) и их среднеквадратические отклонения (s)

Показатель		Месяц											
		январ.	февр.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сентя.	окт.	нояб.	дек.
T_a	m	−7.0	−7.7	−1.9	6.3	13.0	16.7	18.6	16.6	11.1	5.2	−1.6	−5.7
	s	4.0	4.7	2.8	2.3	3.1	3.8	4.0	3.5	2.6	1.8	3.1	3.5
T_s	m	−0.7	−0.7	−0.4	3.2	10.4	14.4	16.8	16.0	11.9	6.9	2.0	0.1
	s	1.2	0.9	1.0	2.4	3.1	3.8	4.3	4.1	3.0	2.0	1.2	1.0
P	m	51.5	44.7	33.8	36.2	42.0	67.8	74.3	59.6	54.0	59.6	51.0	56.0
	s	22.7	22.2	17.3	19.2	22.0	31.4	42.8	42.3	31.5	33.9	26.4	28.8

видоспецифичных коэффициентов модели SCLISS, описывающих влияние неоднородности лесного полога на гидротермические условия почвы, были оценены ранее (Габарник и др., 2019). В имитационных сценариях также учитывалось поступление соединений азота с атмосферными осадками. Для всей территории лесничества использовано региональное фоновое значение — 6 кг га^{−1} год^{−1} (в пересчете на азот), рассчитанное по данным измерений состава атмосферных осадков на территории ПТЗ (Свистов и др., 2016; Громов и др., 2018).

Входные данные для модели Romul_Hum. Помимо получаемых среднемесячных значений температуры и влажности подстилки и органо-минеральной части почвы, модель Romul_Hum использует в качестве входных данных характеристики разных когорт опада. Каждая когорта представляет собой опад определенного органа (ствол, ветви, листья или хвоя, скелетные и тонкие корни) определенного вида дерева. К видоспецифичным свойствам

когорт опада относятся концентрации в них углерода, азота и зольных элементов (% от сухой массы). Химические свойства разных когорт опада, наряду с гидротермическими условиями почвы, влияют на скорость их трансформации в почве. Химические свойства разных когорт опада определены в предшествующих работах (Шанин и др., 2019).

Начальные характеристики пулов ОБ (в пересчете на $C_{орг}$) 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: ТЛУ и доминанта древостоя, а также на основе данных собственных полевых исследований (Надпорожская и др., 2018; Зубкова и др., 2024), которые сгруппировали по ТЛУ.

Для более точной калибровки начальных величин почвенных пулов углерода и азота в модели

Таблица 3. Характеристика лесохозяйственных сценариев

Сценарий	Варианты хозяйственной деятельности
1 (контроль)	Заповедание всей территории (отсутствует любая хозяйственная деятельность).
2	Проведение сплошных рубок в эксплуатационных лесах при достижении возраста спелости пород. Лесовосстановление искусственным саженцами хвойных пород с последующим комплексом лесоводственного ухода. Порубочные остатки убираются с лесосеки.
3	Рубки — в соответствии с действующими правилами: добровольно-выборочные рубки в два приема с уборкой порубочных остатков и сухостоя с лесосеки. Естественное зарращивание с полным циклом лесоводственного ухода с ориентированием на выращивание хвойной секции.
4	Зонирование территории с акцентом на природоохранной деятельности и повышении рекреационной роли лесов. В зоне активного отдыха — формирование устойчивых насаждений паркового характера, ландшафтные выборочные рубки низкой интенсивности, порубочные остатки и сухостой убираются с территории, естественное зарращивание с уходом за подростом с ориентированием на выращивание сосны и дуба. Проводится уход за подростом: вырубается 1/3 его часть по густоте каждые 5 лет. В прогулочной зоне — аналогичные мероприятия с формированием в большем масштабе полуоткрытых типов ландшафтов. Порядок выборки пород при рубках ухода: Ос—Е—Б—Лп—Кл. В охранной зоне — создание режима заповедания (аналогично сценарию 1). В лесохозяйственной зоне — добровольно-выборочные рубки в два приема с уборкой порубочных остатков и сухостоя с последующим естественным зарращиванием и рубками ухода.

Romul_Num использовался способ инициализации модели “spin-up”. Это предварительный запуск Romul_Num, который проводится до стабилизации запасов углерода и азота в почве. Период “spin-up” в Romul_Num (время корректировки, необходимое модели для достижения равновесных значений) составляет около 10 лет (или 120 шагов модели), а отклонения полученных после этой процедуры значений запасов углерода и азота в почвенных пулах для всех выделов не превышают 15% от начальных показателей. После этого рассчитанные таким образом значения запасов ОВ и азота были использованы в качестве начальных параметров в имитационных экспериментах.

Лесохозяйственные сценарии. Для моделирования динамики почвенных пулов и потоков углерода использовали набор лесохозяйственных сценариев (табл. 3). Сценарий 1 — заповедание в отсутствии любой хозяйственной деятельности — позволяет оценить закономерности естественного развития древостоев с учетом возможной смены их видового состава. Сценарий 2, имитирующий сплошные рубки спелых и перестойных лесных насаждений с последующим созданием посадок хвойных пород, отражает практику ведения хозяйства в эксплуатационных лесах. Сценарии 3 и 4 сформированы с ориентацией на экосистемные услуги лесов в соответствии с исследованиями Д.Н. Тебенковой с соавторами (2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика основных экосистемных пулов углерода и почвенная эмиссия CO_2

Разнообразие лесорастительных условий, наряду с видовым разнообразием и разновозрастностью насаждений Данковского лесничества, определяет значительное варьирование показателей продукции древостоев, количества и качества поступающего в почву растительного опада, что влияет на внутриэкосистемный баланс пулов и потоков углерода.

В сценарии 1 для большинства таксационных выделов характерно возрастание запасов углерода в древостоях (рис. 1), связанное со значительной долей в структуре лесов на начальных этапах моделирования молодых и средневозрастных насаждений. На уровне медианных значений максимальные оценки запаса древесины получены для относительно немногочисленных по занимаемой площади ТЛУ А2 и В2, которым соответствуют чистые сосновые древостои без примеси мелколиственных пород, сохраняющие высокую продуктивность на протяжении всего модельного периода. Для более богатых ТЛУ В3, С2 и С3 медианные оценки запасов углерода в древостоях чуть ниже, но на уровне отдельных таксационных выделов именно для них характерны максимальные величины депонирования углерода в биомассе. В условиях естественного развития значительное

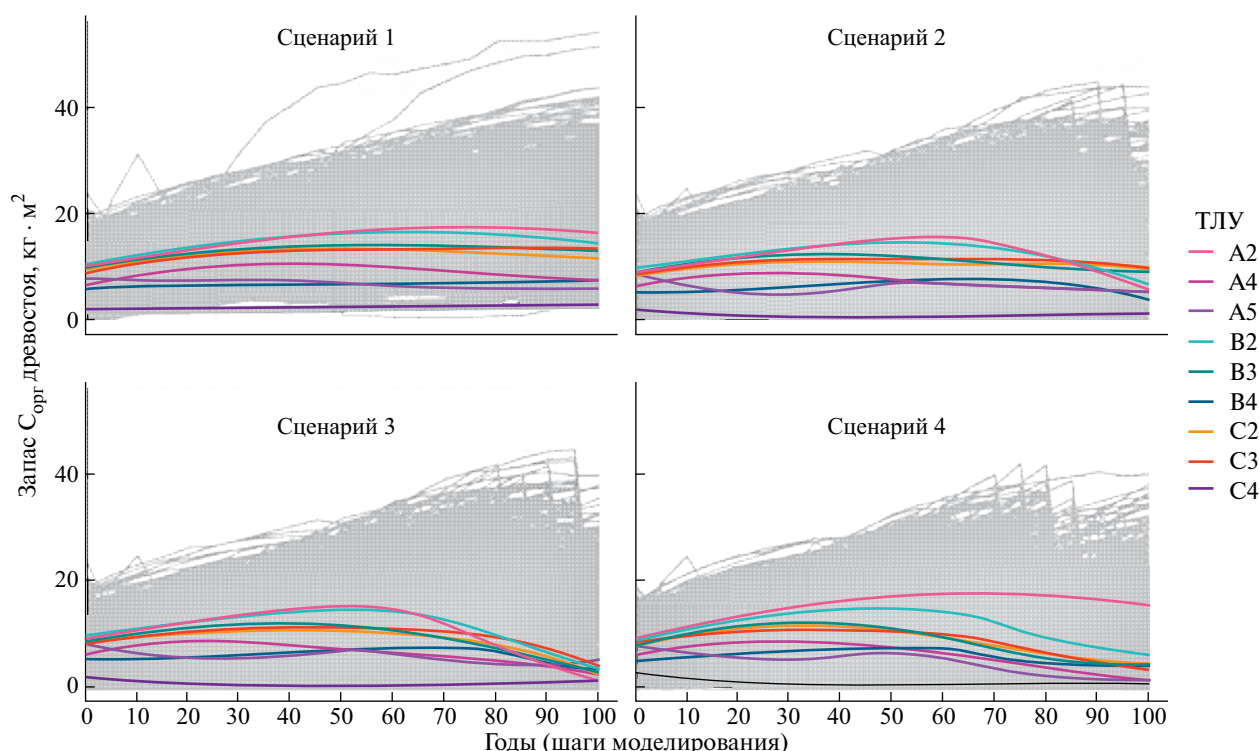


Рис. 1. Динамика запаса углерода древостоя Данковского лесничества (серые линии соответствуют отдельным таксационным выделам; цветные линии — медианные значения для разных ТЛУ; описание сценариев дано в табл. 3).

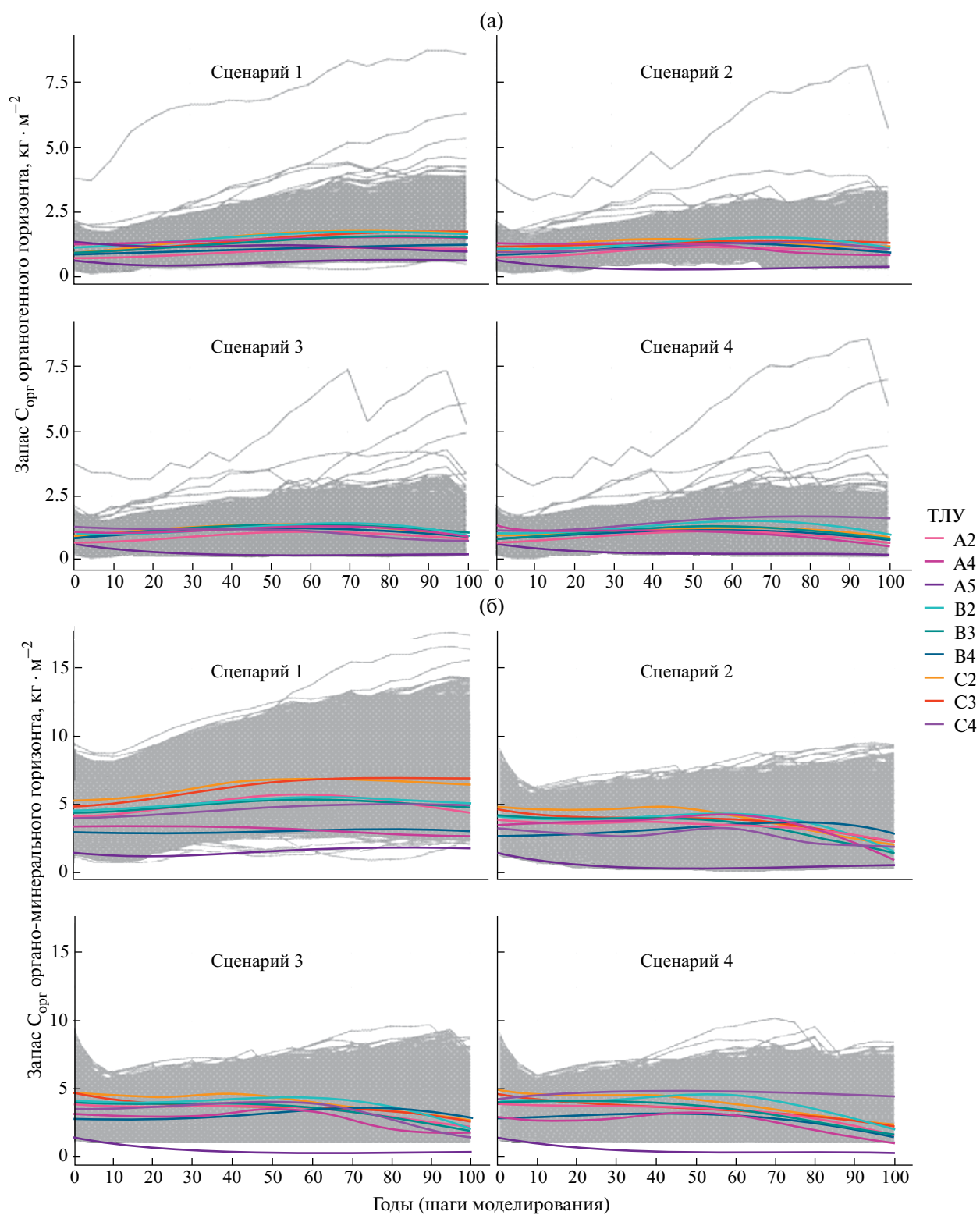


Рис. 2. Динамика запасов углерода в лесной подстилке (а) и органо-минеральных горизонтах почв (б) Данковского лесничества (серые линии соответствуют отдельным таксационным выделам; цветные линии — медианные значения для разных ТЛУ; описание сценариев дано в табл. 3).

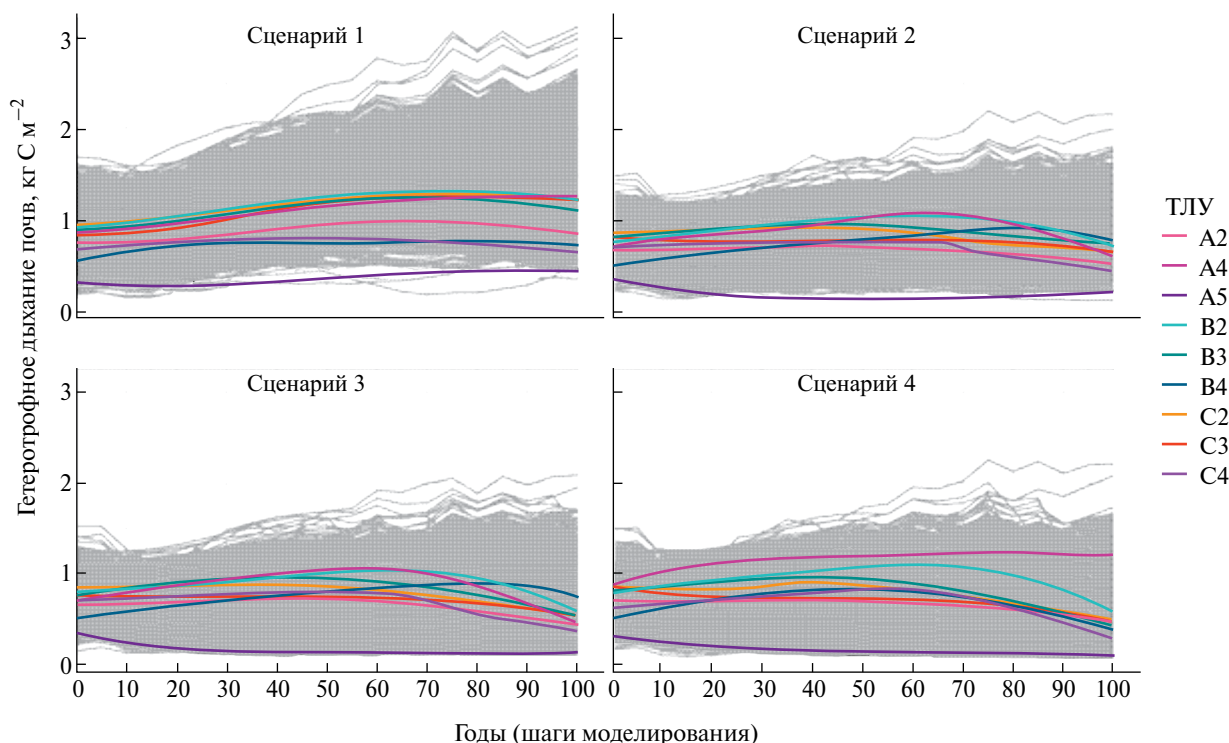


Рис. 3. Динамика гетеротрофного дыхания почв Данковского лесничества (серые линии соответствуют отдельным таксационным выделам; цветные линии — медианные значения для разных ТЛУ; описание сценариев дано в табл. 3).

варьирование получено для показателей, отражающих поступление в почву опада древесного яруса. Большое количество растительного опада продуцируется древостоями в местообитаниях, соответствующих ТЛУ A4, B2, C2 и C3 и имеющих, как правило, полидоминантный состав (данные не приводятся). В целом для сценария 1 модельные оценки показывают рост запасов органического вещества как в лесной подстилке, так и в органо-минеральной части почвенного профиля (рис. 2). Для относительно богатых элементами питания почв ТЛУ C2 и C3 общее увеличение углеродного пула почв за 100 лет составило 1.5–2.0 раза от начальных значений, что в пересчете на углерод соответствует примерно 5–10 кг м⁻². Для более бедных вариантов почв ТЛУ A2 и B2 динамика роста запасов выражена слабее и в среднем составляет около 2–3 кг м⁻² в пересчете на углерод. Некоторая часть выделов демонстрирует снижение почвенных запасов органического вещества в те или иные временные отрезки, что может объясняться изменениями в структуре древесного яруса, связанными, например, с самоизреживанием молодых или распадом старовозрастных древостоев. Гетеротрофное дыхание почв при заповедании оценивается моделью в диапазоне от 0.2–0.5 до 2.0–2.5 кг м⁻² год⁻¹ в пересчете на углерод (рис. 3). Эмиссионная составляющая в углеродном балансе почв для всей территории лесничества не превышает 22.5%.

Сценарий 2 предусматривает проведение сплошных рубок с последующим искусственным лесовосстановлением с полным циклом ухода за древостоями. Согласно полученным оценкам, запас углерода в древостое после начального увеличения за счет интенсивного роста молодняков к концу периода моделирования демонстрирует тенденцию к снижению вследствие вовлечения в сплошные рубки все больших площадей древостоев, достигших возраста спелости. Сценарий 2 показывает меньший, по сравнению со сценарием 1, рост почвенных запасов углерода в лесной подстилке и снижение запаса углерода в органо-минеральной части профиля для большинства таксационных выделов (рис. 2). В среднем для лесничества потери почвенного пула оцениваются примерно в 2.5 кг м⁻² в пересчете на углерод, что составляет около 50% от первоначальных запасов. Такое снижение может объясняться неполным возвратом в почву поверхностных фракций опада вследствие рубок и удаления порубочных остатков и сухостоя. Следует отметить, что отрицательная динамика средних для лесничества запасов углерода в почвах наблюдается на фоне более низких показателей гетеротрофного дыхания (рис. 3), тогда как вклад эмиссии CO₂ в углеродный баланс отдельных выделов на заключительных стадиях моделирования превышает 30%.

Сценарий 3 предусматривает добровольно-выборочные рубки в два приема с уборкой

порубочных остатков и сухостоя с лесосеки, естественное зарастивание с проведением рубок ухода. По характеру динамики и абсолютным значениям средних для лесничества показателей этот сценарий близок к оценкам, полученным в сценарии 2. Динамика пула углерода в древостое в сценарии 3 показывает более заметное снижение запасов к концу имитационного периода. Заметные различия между сценариями 2 и 3 связаны с меньшим (в сценарии 3) накоплением углерода в лесной подстилке и чуть более высоким — в органо-минеральной части профиля (рис. 2). Это может зависеть от качества лесовосстановления. Естественное зарастивание, особенно на низкопродуктивных почвах, не всегда может обеспечить быстрое лесовосстановление.

Сценарий 4 предусматривает зонирование территории лесничества на рекреационную и лесохозяйственную зоны. В рекреационной зоне предполагается формирование устойчивых насаждений паркового характера с уходом за подлеском. В эксплуатационной зоне — добровольно-выборочные рубки. Согласно этому сценарию, запас углерода в древостоях начинает снижаться раньше, чем в других сценариях (уже в середине имитационного периода). Использование территории, согласно сценарию 4, способствует формированию почвенных условий с минимальным диапазоном варьирования запасов органического вещества в лесной подстилке и примерно 2-кратным снижением почвенного пула углерода в органо-минеральных горизонтах в среднем для территории лесничества (аналогичные потери запасов показаны для сценариев 2 и 3). Особенности сценария 4 проявились в повышенных показателях гетеротрофного дыхания в бедных почвах ТЛУ А2 и В2 (рис. 3). Аналогично сценариям 2 и 3 сценарий 4 ведет к “выравниванию” почвенных условий Данковского лесничества в отношении показателей углеродного цикла на фоне общего снижения запасов органического вещества.

Зависимость показателей углеродного баланса от лесорастительных условий

Анализ данных вычислительных экспериментов с позиций различий в оценках показателей углеродного баланса для разных ТЛУ показывает, что наиболее ярко влияние условий богатства и влажности почв проявляется при естественном развитии древостоев. В сценарии 1 (заповедание) повышенные показатели формирования фракций опавов, запасов органического вещества в лесной подстилке и органо-минеральных горизонтах почв и почвенного гетеротрофного дыхания характерны для богатых местообитаний, соответствующих ТЛУ С2 и С3, которые преобладают на территории лесничества. Для таксационных выделов с ТЛУ В2 и В3 рассчитанные величины углеродных пулов и потоков, как правило, ниже. Минимальные

оценки рассматриваемых показателей получены в сценарии 1 для ТЛУ А2, А4 и А5, соответствующих местообитаниям с бедными почвами, а также для таксационных выделов с богатыми элементами питания, но переувлажненными почвами — ТЛУ С4. При этом запасы углерода в фитомассе древостоев в ТЛУ А2 и В2, согласно полученным оценкам, характеризуются значительными величинами, что связано с моновидовым составом формирующихся в этих условиях сосновых древостоев.

Для сценариев 2–4, рассматривающих разные варианты активного использования лесов на территории Данковского лесничества, характерны схожие закономерности, которые проявляются на фоне общего снижения показателей углеродного цикла почв, особенно заметного в наиболее продуктивных ТЛУ С2 и С3. Следует обратить внимание на заметный рост соотношения показателей гетеротрофного дыхания и почвенных запасов органического вещества для ТЛУ А2, А4, А5, В2–В4, свидетельствующий об увеличении эмиссионной составляющей в общем балансе углерода соответствующих таксационных выделов.

Оценки экосистемного стока углерода

Рассчитанные с детализацией на уровне таксационных выделов величины суммарных запасов углерода на экосистемном уровне (рис. 4) являются результирующей накопления органического вещества в биомассе древостоев, мортмассе (сухостой и валеж, органогенные горизонты подстилки) и органическом веществе почвы. Полученные экосистемные оценки отражают влияние лесорастительных условий на сток углерода, особенно ярко проявляющееся в сценарии 1 (заповедание). Для условий Данковского лесничества максимальные запасы органического вещества формируются в ТЛУ А2, В2, С2 и С3, минимальные — в С4 и А5. В сценариях 2–4 динамика экосистемных запасов С более сложная за счет влияния фактора рубок, а также последующего искусственного лесовосстановления (сценарии 2 и 4), что в долгосрочной перспективе снижает потенциал стока углерода в наиболее продуктивных ТЛУ С2 и С3.

При суммировании рассмотренных выше результатов расчетов пулов и потоков углерода с учетом площадей выделов были получены итоговые балансовые оценки стока С для всей территории Данковского лесничества (рис. 5). В зависимости от сценария за 100 лет суммарное нетто-поглощение С в лесных экосистемах Данковского участкового лесничества (с общей площадью лесопокрываемых земель 6836 га) оценивается в диапазоне от 0.15 Тг (сценарий 3) до 0.57 Тг (сценарий 1). Сценарий 3, помимо добровольно-выборочных рубок с уборкой порубочных остатков и сухостоя на лесосеке, предусматривает естественное лесовосстановление; сценарий 1 — режим заповедания для

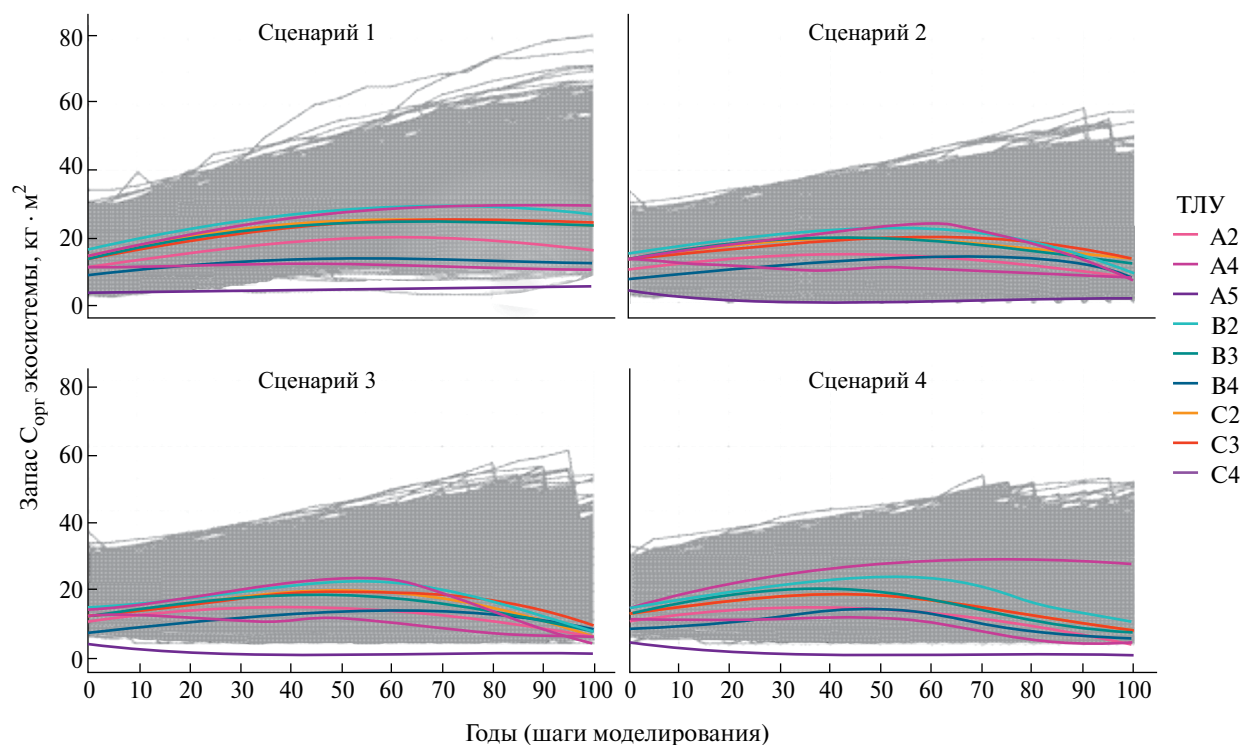


Рис. 4. Динамика экосистемных запасов С на территории Данковского лесничества (серые линии соответствуют отдельным таксационным выделам; цветные линии — медианные значения для разных ТЛУ; описание сценариев дано в табл. 3).

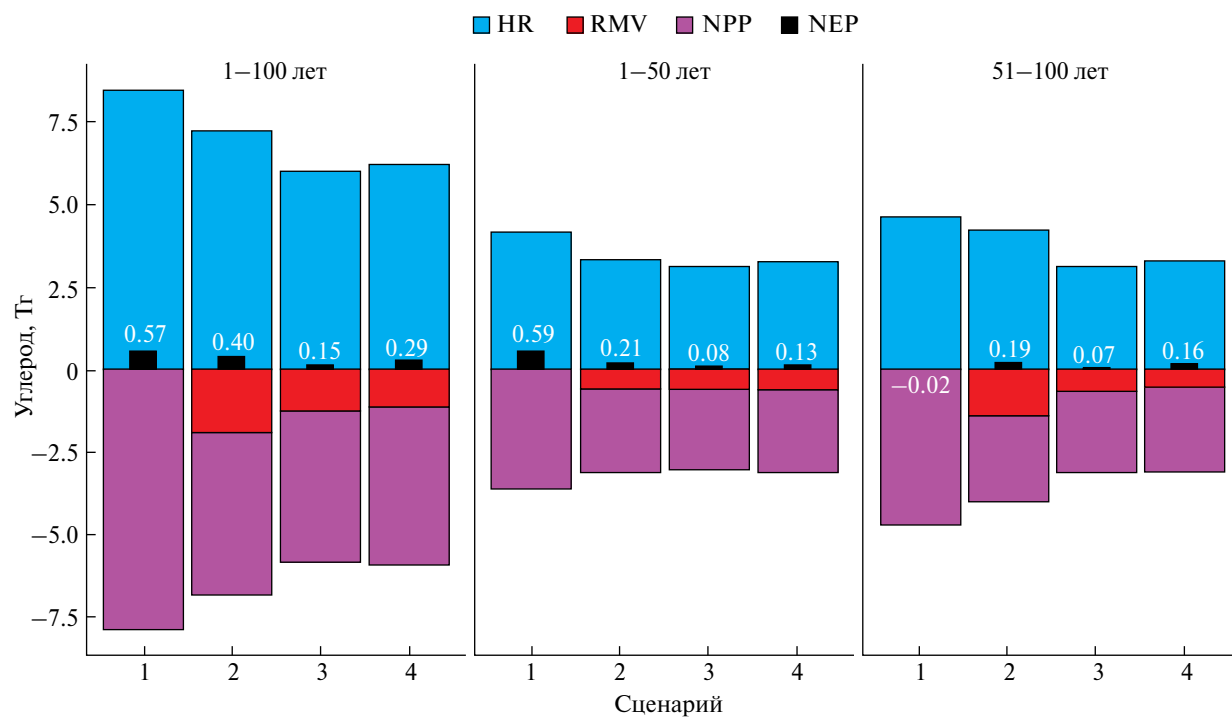


Рис. 5. Основные элементы и результирующий баланс углерода для всей территории Данковского лесничества на разных временных отрезках и при разных сценариях лесопользования (HR — гетеротрофное дыхание почв, RMV — вынос $C_{орг}$ с фитомассой древостоя при рубках, NPP — чистая первичная продукция древостоя, NEP — нетто-поглощение С в экосистемах как результирующая трех указанных выше потоков с учетом их знака).

всех лесных земель. При этом основной экосистемный сток C в сценарии 1 наблюдается в первые 50 лет, что, если учитывать начальный возраст древостоев, соответствует переходу от средневозрастных насаждений к приспевающим и спелым. В последующие 50 лет модельные оценки в сценарии 1 показывают для территории Данковского лесничества близкий к нейтральному слабоотрицательный углеродный баланс, несмотря на продолжающийся сток $C_{орг}$ в почвах, что может объясняться снижением продукции старовозрастных древостоев, повышенным накоплением в них сухостоя и валежа в условиях заповедного режима и дополнительным вкладом крупных древесных остатков в эмиссию CO_2 . Достаточно высокое накопление углерода — до 0.40 Тг — показано для сценария 2 за счет искусственного лесовосстановления. Этот же сценарий показывает максимальные объемы полученной в ходе рубок древесины, обеспечивая, таким образом, синергию разных экосистемных услуг.

Факторы, определяющие динамику запасов углерода

Модельные оценки наглядно показывают зависимость динамики пулов и потоков углерода от почвенно-растительных условий, характерных для различных таксационных выделов Данковского лесничества и определяемых разными вариантами ТЛУ. Повышенные значения составляющих углеродного баланса получены для наиболее богатых местообитаний, которым на рассматриваемой территории соответствуют ТЛУ С2 и С3. Аналогичные тенденции зависимости запасов и экосистемного стока углерода от продуктивности лесов отмечают во многих исследованиях (Шевченко и др., 2019; Cook-Patton et al., 2020; Lindeskog et al., 2021; Erkan et al., 2023; Strîmbu et al., 2023).

Фактором, определяющим особенности долговременной динамики основных пулов углерода в лесах со схожими почвенно-растительными условиями, являются начальные характеристики древостоев (их возраст и породный состав). Результаты расчетов в сценарии 1 (заповедание) хорошо согласуются с данными работы Кузнецовой с соавторами (2019), где на примере лесных почв Московско-Окской ландшафтной провинции показана связь почвенных запасов углерода с разными стадиями сукцессии, проявляющаяся как тенденция повышения запасов углерода в почвах от ранней к промежуточной и поздней стадиям.

Для значительного числа таксационных выделов Данковского лесничества результаты оценок в сценарии 1 показывают рост запасов углерода в фитомассе древостоев, средний возраст которых на конец имитационного эксперимента при их естественном развитии должен составлять более 150 лет. Этот результат несколько противоречит мнению о снижении продуктивности в старовозрастных

лесах и близком к нулевому стоку углерода в наземной продукции их фитомассы из-за активного отпада деревьев старших возрастных классов (Strîmbu et al., 2023). Однако исследования накопления углерода в старовозрастных лесах умеренного пояса свидетельствуют о значительной продолжительности жизни некоторых видов деревьев, продолжающих аккумулировать большое количество углерода в живых деревьях возрастом 150 и более лет (Lindenmayer et al., 2016; Cook-Patton et al., 2020; Leverett et al., 2021). Отражением этого являются полученные в настоящей работе данные о высоких показателях накопления углерода в фитомассе чистых сосновых насаждений в ТЛУ А2 и В2. Для территории Московской области этот факт подтверждается экспериментальными данными для сосняков Серебряноборского лесничества (Рысин и др., 2010) и культур сосны на территории Никольской лесной дачи (Мерзленко и др., 2023).

Результаты вычислительных экспериментов для сценариев 2–4 отражают влияние хозяйственного использования лесов на углеродный баланс лесных территорий, ведущее к снижению запасов органического вещества в древостоях, органо-минеральном профиле почв. В этой связи следует отметить, что наиболее заметное снижение экосистемных запасов углерода, по сравнению со сценарием заповедания, модель показывает для наиболее продуктивных ТЛУ С2 и С3, таким образом, минимизируя их природный потенциал секвестрации углерода в значительно большей степени, чем лесов бедных местообитаний. Ранее схожий эффект был показан в работе Кузнецовой с соавторами (2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имитационное моделирование как эффективный инструмент управления экосистемными услугами лесов позволяет оценить риски и последствия принятия управленческих решений в области лесного хозяйства и природопользования за счет анализа и обоснования альтернативных сценариев развития лесных территорий. Используемая в данной работе система моделей ориентирована на прогнозирование долговременной динамики пулов углерода в лесах сложной видовой структуры, преобладающих в европейской части России. Прогнозные оценки изменений стока углерода для территории Данковского лесничества показали адекватность воспроизведения в имитационных экспериментах динамики роста древостоев, почвенных запасов углерода и гетеротрофного дыхания почв для широкого спектра лесорастительных условий (от А2 и А5 до В4 и С3) при разных сценариях лесопользования.

Оценивая рассмотренные сценарии хозяйственного и рекреационного использования лесов с позиций их влияния на углеродный баланс

территории Данковского лесничества, необходимо ответить, что его положение вблизи густонаселенной Московской агломерации и непосредственно в черте муниципального образования Серпухов предполагает важность таких экосистемных услуг лесов, как “рекреация”, “рынок лесного туризма”, “строительство на землях лесного фонда”, обеспечивающих поддержание благоприятной экологической обстановки в городах и создание мест отдыха для городского населения. В этой связи возможные компромиссы могут быть обеспечены за счет разработки более детальных сценариев использования данной лесной территории, предполагающих дифференцированный подход к ее различным участкам (соответствующим конкретным таксационным выделам) с учетом результатов модельных оценок, полученных в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеиц Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (дата обращения: 29.05.2023).
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коришнуова Н.Н., Швеиц Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation> (дата обращения: 29.05.2023).
- Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.
- Володин Е.М. Углеродный цикл в модели климата ИВМ РАН. Тезисы доклада в ИГКЭ 26.05.2021 [Электронный ресурс]. URL: http://www.igce.ru/wp-content/uploads/2021/05/Volodin_IGKE_210526-1.pdf (дата обращения: 14.06.2023).
- Габарник 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. 2019. Т. 14. № 2. С. 488–499. <https://doi.org/10.17537/2019.14.488>
- Громов С.А., Жигачева Е.С., Покровский Д.Д. Оценка сухих выпадений соединений серы и азота из атмосферы в Приокско-Террасном биосферном заповеднике по данным наблюдений станции ЕМЕП // Экологические системы и приборы. 2018. № 2. С. 10–17.
- Дмитраков Л.М. Почвенный покров биосферных пикетов Пушкинского биосферного стационара // Экосистемы Южного Подмосковья. М.: Наука, 1979. С. 70–77.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России / Под ред. В.С. Столбового. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 760 с.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Каганов В.В. Экосистемные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2021. № 6. С. 581–592. <https://doi.org/10.31857/S0024114821060115>
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Честных О.В. Динамика баланса углерода в лесах федеральных округов Российской Федерации // Вопросы лесной науки. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–24. <https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24>
- Зубкова Е.В., Стаменов М.Н., Припутина И.В., Грабовский В.И. Фитоиндикация богатства почв в лесах и содержание азота в почве и растениях в сосняках и липняках Московской области // Ботанический журнал. 2024 (принято в печать).
- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров — последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 5–32. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
- Классификация и диагностика почв России / Под ред. Г.В. Добровольского. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803–816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>
- Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546. <https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>
- Лукина Н.В., Гераськина А.П., Кузнецова А.И., Смирнов В.Э., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Тихонова Е.В., Тебенькова Д.Н., Басов Е.В. Функциональная классификация лесов: актуальность и подходы к разработке // Лесоведение. 2021. № 6. С. 566–580. <https://doi.org/10.31857/S0024114821060085>
- Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Мельник Л.П. Депонирование углерода стволовой фракцией в 100-летних лесных культурах хвойных пород // Лесной вестник. 2023. Т. 27. № 2. С. 5–10. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-2-5-10>
- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Под ред. В.Н. Кудярова. М.: Наука, 2007. 380 с.
- Надпорожская М.А., Зубкова Е.В., Фролов П.В., Быховец С.С., Чертов О.Г. Соподчиненность почвенных условий и растительных сообществ в сосняках как следствие действия комплекса факторов // Вестник ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2018. № 2. С. 122–138.
- Основы устойчивого лесопользования / Под ред. А.В. Беляковой, Н.М. Шматкова. М.: WWF России, 2014. 266 с.
- Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. 431 с.
- Рысин Л.П., Алексахина Т.И., Быков А.В., Колесников А.В., Лысков А.Б., Маслов А.А., Меланхолин П.Н., Молчанов А.Г., Полякова Г.А., Цельникер Ю.Л. Серебряноборское опытное лесничество: 65 лет лесного мониторинга. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 260 с.
- Свистов П.Ф., Першина Н.А., Полищук А.И., Павлова М.Т., Семенец Е.С. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за

- 2011–2015 гг. (Обзор данных). СПб: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2016. 116 с.
- Справочник по климату СССР. Вып. 8. Часть 4. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 360 с.
- Столбовой В.С. Влияние потепления климата на баланс углерода в лесных почвах России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2022. Вып. 111. С. 5–29. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-5-29>
- Тебенькова Д.Н., Лукина Н.В., Катаев А.Д., Чумаченко С.И., Киселева В.В., Колычева А.А., Шанин В.Н., Гагарин Ю.Н., Кузнецова А.И. Разработка сценариев для имитационного моделирования экосистемных услуг лесов // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 2. С. 1–87. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202252-104>
- 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. <https://doi.org/10.17537/2019.14.54>
- Швиденко А.З., Шенащенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
- Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Горнов А.В., Тихонова Е.В., Лукина Н.В. Сукцессионная динамика запасов почвенного углерода и растительности хвойно-широколиственных лесов северо-западного Кавказа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 163–176. <https://doi.org/10.1134/S0024114819030082>
- Шерстюков А.Б. Описание массива суточных данных о температуре почвы на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации (версия 2) [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/164-soil-temperature> (дата обращения: 29.05.2023).
- 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. V. 138. № 1–3. P. 289–308. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9)
- Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripitina I., Zhubkova 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. V. 345. P. 125–139. <https://doi.org/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., Pripitina I., Zhubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity // Ecological Modelling. 2017b. V. 345. P. 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013>
- Chumachenko S.I., Korotkov V.N., Palenova M.M., Polotov D.V. Simulation modeling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous-broad-leaved forests // Ecological Modelling. 2003. V. 170. № 2–3. P. 345–362. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00238-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00238-2)
- Cook-Patton S.C., Leavitt S.M., Gibbs D., Harris N.L., Lister K., Anderson-Teixeira K.J., Briggs R.D., Chazdon R.L., Crowther T.W., Ellis P.W., Griscom H.P., Herrmann V., Holl K.D., Houghton R.A., Larrosa C., Lomax G., Lucas R., Madsen P., Malhi Y., Paquette A., Parker J.D., Paul K., Routh D., Roxburgh S., Saatchi S., van den Hoogen J., Walker W.S., Wheeler C.E., Wood S.A., Xu L., Griscom B.W. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth // Nature. 2020. V. 585. P. 545–550. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x>
- Erkan N., Güner Ş.T., Aydın A.C. Thinning effects on stand growth, carbon stocks, and soil properties in Brutia pine plantations // Carbon Balance and Management. 2023. V. 18. P. 1–10. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00226-0>
- Johnson D.W., Curtis P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis // Forest Ecology and Management. 2001. V. 140. № 2–3. P. 227–238. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6)
- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripitina I., Zhubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007>
- Laine-Kaulio H., Koivusalo H., Komarov A.S., Lappalainen M., Launianen S., Laurén A. Extending the ROMUL model to simulate the dynamics of dissolved and sorbed C and N compounds in decomposing boreal mor // Ecological Modelling. 2014. V. 272. P. 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.026>
- Leppä K., Hökkä H., Laiho R., Launianen S., Lehtonen A., Mäkipää R., Peltoniemi M., Saarinen M., Sarkkola S., Nieminen M. Selection cuttings as a tool to control water table level in boreal drained peatland forests // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. Article 576510. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576510>
- Leverett R.T., Masino S.A., Moomaw W.R. Older Eastern White pine trees and stands accumulate carbon for many decades and maximize cumulative carbon // Frontiers in Forests and Global Change. 2021. V. 4. Article 620450. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.620450>
- Lindenmayer D.B., Laurance W.F. The unique challenges of conserving large old trees // Trends in Ecology and Evolution. 2016. V. 31. № 6. P. 416–418. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.03.003>
- Lindeskog M., Smith B., Lagergren F., Sycheva E., Ficko A., Pretzsch H., Rammig A. Accounting for forest management in the estimation of forest carbon balance using the dynamic vegetation model LPJ-GUESS (v4.0, r9710): implementation and evaluation of simulations for Europe // Geoscientific Model Development. 2021. V. 14. № 10. P. 6071–6112. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6071-2021>
- Mäkipää R., Abramoff R., Adamczyk B., Baldy V., Biryol C., Bosela M., Casals P., Curiel Yuste J., Dondini M., Filipek S., Garcia-Pausas J., Gros R., Gömöryová E., Hashimoto S., Hassegawa M., Immonen P., Laiho R., Li H., Li Q., Luyssaert S., Menival C., Mori T., Naudts K., Santonja M., Smolander A., Toriyama J., Tupek B., Ubeda X., Verkerk P.J., Lehtonen A. How does management affect soil C sequestration and greenhouse gas fluxes in boreal and temperate forests? — A review // Forest Ecology and Management. 2023. V. 529. Article 120637. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120637>

Peltoniemi M., Mäkipää R., Thürig E., Palosuo T., Schrumpf M., Buttrbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gärdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P. Models in country scale carbon accounting of forest soils // *Silva Fennica*. 2007. V. 41. № 3. P. 575–602.
<https://doi.org/10.14214/sf.290>

Strimbu V.F., Næsset E., Ørka H.O., Liski J., Petersson H., Gobakken T. Estimating biomass and soil carbon change at the level of forest stands using repeated forest surveys assisted

by airborne laser scanner data // *Carbon Balance and Management*. 2023. V. 18. Article 10.
<https://doi.org/10.1186/s13021-023-00222-4>

Sukhoveeva O., Karelin D., Lebedeva T., Pochikalov A., Ryzhkov O., Suvorov G., Zolotukhin A. Greenhouse gases fluxes and carbon cycle in agroecosystems under humid continental climate conditions // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2023. V. 352. Article 108502.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108502>

Predictions of Carbon Stock in the Southern Moscow Region Forests Under Different Forest Use Scenarios

V. N. Shanin^{a, b, *}, I. V. Pripulina^a, P. V. Frolov^a, D. N. Tebenkova^b,
 S. S. Bykhovets^a, S. I. Chumachenko^{b, c}

^a*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS, Institutskaya st. 2, Pushchino, Moscow Oblast, 142290, Russia*

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

^c*Mytishchi branch of the Moscow State University of Technology, 1st Institutskaya st, 1, Mytishchi, Moscow region, 141005 Russia*

*E-mail: shaninvn@gmail.com

The results of forest simulation modelling of the dynamics of carbon pools and fluxes in forest ecosystems under different forest management scenarios were considered on the example of the Dankovsky forest enterprise (south of the Moscow region, subzone of coniferous-broadleaved mixed forests). The impact of such changes in forest management practices, as the reserve regime, the reduction in the proportion of forest lands as a result of residential development, and zoning of the territory with an emphasis on increasing the recreational use of forests on the carbon balance was analysed. In computational experiments, a set of Russian models was used: the dynamic model of a forest stand FORRUS-S, the model of soil organic matter dynamics Romul_Hum, the model of the hydrothermal regime of soils SCLISS. Calculations were performed for a time period of 100 years at the forestry unit level, and were also aggregated at the level of the entire forestry district. The diversity of types of forest growth conditions (FGC), together with the species diversity and the initial different ages of stands, determined significant variations of the calculated indicators of forest stands' production, the quantity and quality of plant litter entering the soil. For all cases, model estimates of changes in carbon reserves occurred in the forest stands within the initial 40–60 years with a subsequent decrease in the calculated values. Under the conservation scenario, an increase in the organic substances reserves in forest litter and soil was observed: for FGCs C2 and C3, an increase over 100 years was approximately 5–10 kg m⁻², for the remaining FGCs — at the level of 2–3 kg m⁻² in terms of carbon. Under the economic use scenarios, a relative “levelling” of forest enterprise area towards the lower end of the spectrum was shown in terms of soil carbon reserves. The maximum ecosystem carbon stock was calculated for FGC C2 and C3, the minimum — for A5 and C4. Depending on the scenario, over 100 years, the total net sequestration of carbon by the forests of the Dankovsky forest enterprise (with a total area of forested land of 6836 ha) was estimated within the range of 0.15–0.57 Tg.

Key words: forest ecosystems, carbon depositing, soil respiration, forest stand's structure, support of ecosystem functions.

Acknowledgements: The work has been carried out within the framework of the innovative state-level project of utmost importance “Development of terrestrial and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gases fluxes within the boundaries of the Russian Federation, creation of a registration system of climatically active substances fluxes and carbon budget data from forests and other terrestrial ecosystems” (No. 123030300031–6).

REFERENCES

- 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.
- Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripitina 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.
<https://doi.org/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., Pripitina 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013>.
- 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, No. 1–3, pp. 289–308.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9).
- Chumachenko S.I., Korotkov V.N., Palenova M.M., Polotov D.V., Simulation modeling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous-broad-leaved forests, *Ecological Modelling*, 2003, Vol. 170, No. 2–3, pp. 345–362.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00238-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00238-2)
- Cook-Patton S.C., Leavitt S.M., Gibbs D., Harris N.L., Listner K., Anderson-Teixeira K.J., Briggs R.D., Chazdon R.L., Crowther T.W., Ellis P.W., Griscom H.P., Herrmann V., Holl K.D., Houghton R.A., Larrosa C., Lomax G., Lucas R., Madsen P., Malhi Y., Paquette A., Parker J.D., Paul K., Routh D., Roxburgh S., Saatchi S., van den Hoogen J., Walker W.S., Wheeler C.E., Wood S.A., Xu L., Griscom B.W., Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth, *Nature*, 2020, Vol. 585, pp. 545–550.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x>.
- Dmitrakov L.M., Pochvennyi pokrov biosfernykh piketov Pushchinskogo biosfernogo stacionara (Soil cover of biosphere pickets of the Pushchino biosphere station), In: *Ekosistemy Yuzhnogo Podmoskov'ya* (Ecosystems of the Southern Moscow Region), Moscow: Nauka, 1979, pp. 70–77.
- Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii, (Unified State register of soil resources of Russia), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 768 p.
- Erkan N., Güner Ş.T., Aydın A.C., Thinning effects on stand growth, carbon stocks, and soil properties in Brutia pine plantations, *Carbon Balance and Management*, 2023, Vol. 18, pp. 1–10.
<https://doi.org/10.1186/s13021-023-00226-0>.
- Grabarnik P.Y., Chertov O.G., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Khanina L.G., Bobrovskii M.V., Bykhovets S.S., Frolov P.V., Integratsiya imitatsionnykh modelei dlya kompleksnoi otsenki ekosistemnykh uslug lesov: metodicheskie podkhody (The Integration of Simulation Models for Complex Evaluation of Different Forest Ecosystem Services: Methodological Approaches), *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, 2019, Vol. 14, No. 2, pp. 488–499.
<https://doi.org/10.17537/2019.14.488>
- Gromov S.A., Zhigacheva E.S., Pokrovskii D.D., Otsenka sukhikh vypadenii soedinenii sery i azota iz atmosfery v Prioksko-Terrasnom biosfernom zapovednike po dannym nablyudenii stantsii EMEP (Evaluation of atmospheric dry deposition of sulphur and nitrogen compounds in the Prioksko-Terrasny Nature Biosphere Reserve with the measurements at the EMEP station), *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2018, No. 2, pp. 10–17.
<http://meteo.ru/data/156-temperature>, (May 29, 2023).
<http://meteo.ru/data/158-total-precipitation>, (May 29, 2023).
<http://meteo.ru/data/164-soil-temperature>, (May 29, 2023).
- Ivanov A.L., Savin I.Y., Stolbovoi V.S., Dukhanin Y.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M., Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov — posledstviya dlya zemlepol'zovaniya Rossii (Global climate and soil cover — implications for land use in Russia), *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2021, Issue 107, pp. 5–32.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
- Johnson D.W., Curtis P.S., Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis, *Forest Ecology and Management*, 2001, Vol. 140, No. 2–3, pp. 227–238.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6)
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii (Classification and recognition of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripitina 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*, 2017, Vol. 345, pp. 113–124.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007>
- Kuznetsova A.I., Lukina N.V., Tikhonova E.V., Gornov A.V., Gornova M.V., Smirnov V.E., Geraskina A.P., Shevchenko N.E., Tebenkova D.N., Chumachenko S.I., Carbon stock in sandy and loamy soils of coniferous-broadleaved forests at different succession stages, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 7, pp. 756–768.
- Laine-Kaulio H., Koivusalo H., Komarov A.S., Lappalainen M., Launianen S., Laurén A., Extending the ROMUL model to simulate the dynamics of dissolved and sorbed C and N compounds in decomposing boreal mor, *Ecological Modelling*, 2014, Vol. 272, pp. 277–292.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.026>.
- Leppä K., Hökkä H., Laiho R., Launianen S., Lehtonen A., Mäkipää R., Peltoniemi M., Saarinen M., Sarkkola S., Nieminen M., Selection cuttings as a tool to control water table level in boreal drained peatland forests, *Frontiers in Earth Science*, 2020, Vol. 8, Article 576510.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.576510>
- Leverett R.T., Masino S.A., Moomaw W.R., Older Eastern White pine trees and stands accumulate carbon for many decades and maximize cumulative carbon, *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, Vol. 4, Article 620450.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.620450>
- Lindenmayer D.B., Laurance W.F., The unique challenges of conserving large old trees, *Trends in Ecology and Evolution*, 2016, Vol. 31, No. 6, pp. 416–418.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.03.003>
- Lindeskog M., Smith B., Lagergren F., Sycheva E., Ficko A., Pretzsch H., Rammig A., Accounting for forest management in the estimation of forest carbon balance using the dynamic vegetation model LPJ-GUESS (v4.0, r9710): implementation and evaluation of simulations for Europe, *Geoscientific Model Development*, 2021, Vol. 14, No. 10, pp. 6071–6112.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-6071-2021>

- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Y., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Y., Semenov S.M., Rol' lesov v adaptatsii prirodnnykh sistem k izmeneniyam klimata (A role of forests in natural systems' adaptation to climate change), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 531–546.
- Lukina N.V., Geras'kina A.P., Kuznetsova A.I., Smirnov V.E., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Tikhonova E.V., Teben'kova D.N., Basova E.V., Funktsional'naya klassifikatsiya lesov: aktual'nost' i podkhody k razrabotke (Forests' functional classification: relevance and approaches to development), *Lesovedenie*, 2021, No. 6, pp. 566–580.
<https://doi.org/10.31857/S0024114821060085>
- Mäkipää R., Abramoff R., Adamczyk B., Baldy V., Biryol C., Bosela M., Casals P., Curiel Yuste J., Dondini M., Filipek S., Garcia-Pausas J., Gros R., Gömöryová E., Hashimoto S., Hassegawa M., Immonen P., Laiho R., Li H., Li Q., Luysaert S., Menival C., Mori T., Naudts K., Santonja M., Smolander A., Toriyama J., Tupek B., Ubeda X., Verkerk P.J., Lehtonen A., How does management affect soil C sequestration and greenhouse gas fluxes in boreal and temperate forests? — A review, *Forest Ecology and Management*, 2023, Vol. 529, Article 120637.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120637>
- Merzlenko M.D., Mel'nik P.G., Mel'nik L.P., Deponirovanie ugleroda stvolovoi fraktsiei v 100-letnikh lesnykh kul'turakh khvoynykh porod (Carbon deposit by stem fraction in 100-year-old coniferous species), *Lesnoi vestnik*, 2023, Vol. 27, No. 2, pp. 5–10.
- Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnykh ekosistemakh* (Modeling of organic matter dynamics in forest ecosystems), Moscow: Nauka, 2007, 380 p.
- Nadporozhskaya M.A., Zubkova E.V., Frolov P.V., Bykhovets S.S., Chertov O.G., Sopodchinennost' pochvennykh uslovii i rastitel'nykh soobshchestv v sosnyakakh kak sledstvie deistviya kompleksa faktorov (Factors of soil and ground vegetation formation in pine forests), *Vestnik TvGU. Ser. Biologiya i ekologiya*, 2018, No. 2, pp. 122–138.
- Osnovy ustoichivogo lesoupravleniya* (Basics of Sustainable Forest Management), Moscow: WWF Rossii, 2014, 266 p.
- Peltoniemi M., Mäkipää R., Thürig E., Palosuo T., Schruppf M., Buttrbach-Bahl K., Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Gärdenäs A., Perry C., Liski J., Smith P., Models in country scale carbon accounting of forest soils, *Silva Fennica*, 2007, Vol. 41, No. 3, pp. 575–602.
<https://doi.org/10.14214/sf.290>
- Rastitel'nost' evropeiskoi chasti SSSR* (The vegetation of the European part of the USSR), Leningrad: Nauka, 1980, 429 p.
- Rysin L.P., Striganova B.R., Sirin A.A., *Serebryanoborskoe opytное lesnichestvo: 65 let lesnogo monitoringa* (Serebryanyi Bor trial forestry: 65 years of monitoring), Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010, 260 p.
- Shanin V.N., Grabarnik P.Y., 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 protessa dlya dominiruyushchikh vidov derev'ev evropeiskoi chasti RF v zadachakh modelirovaniya dinamiki lesnykh ekosistem (Parameterization of Productivity Model for the Most Common Trees Species in European Part of Russia for Simulation of Forest Ecosystem Dynamics), *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika*, 2019, Vol. 14, No. 1, pp. 54–76.
<https://doi.org/10.17537/2019.14.54>
- Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Smirnov V.E., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Grabenko E.A., Tikhonova E.V., Lukina N.V., Suktsessionnaya dinamika rastitel'nosti i zapasy pochvennogo ugleroda v khvoino-shirokolistvennykh lesakh Severo-Zapadnogo Kavkaza (Succession dynamics of vegetation and storages of soil carbon in mixed forests of Northwestern Caucasus), *Lesovedenie*, 2019, No. 3, pp. 163–176.
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Uglerodnyi byudzheth lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.
- Spravochnik po klimatu SSSR* (USSR climate data), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967, Vol. 8, Part 4, 359 p.
- Stolbovoi V.S., Vliyanie potepleniya klimata na balans ugleroda v lesnykh pochvakh Rossii (Climate warming impact on the carbon balance in forest soils in Russia), *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2022, Vol. 111, pp. 5–29.
- Strîmbu V.F., Næsset E., Ørka H.O., Liski J., Petersson H., Gobakken T., Estimating biomass and soil carbon change at the level of forest stands using repeated forest surveys assisted by airborne laser scanner data, *Carbon Balance and Management*, 2023, Vol. 18, Article 10.
<https://doi.org/10.1186/s13021-023-00222-4>
- Sukhoveeva O., Karelin D., Lebedeva T., Pochikalov A., Ryzhkov O., Suvorov G., Zolotukhin A., Greenhouse gases fluxes and carbon cycle in agroecosystems under humid continental climate conditions, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, Vol. 352, Article 108502.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108502>
- Svistov P.F., Pershina N.A., Polishchuk A.I., Pavlova M.T., Semenets E.S., *Ezhгодnye dannye po khimicheskomu sostavu i kislottosti atmosferynykh osadkov za 2011–2015 gg. (Obzor dannyykh)* (Annual data on the chemical composition and acidity of atmospheric precipitation for 2011–2015 (Data Review)), Saint Petersburg: Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voeikova, 2016, 116 p.
- Teben'kova D.N., Lukina N.V., Kataev A.D., Chumachenko S.I., Kiseleva V.V., Kolycheva A.A., Shanin V.N., Gagarin Y.N., Kuznetsova A.I., Razrabotka stsensariyev dlya imitatsionnogo modelirovaniya ekosistemnykh uslug lesov (Scenario development for the forests ecosystem services imitation modelling), *Voprosy lesnoi nauki*, 2022, Vol. 5, No. 2, pp. 1–87.
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-202252-104>
- Volodin E.M., available at: http://www.igce.ru/wp-content/uploads/2021/05/Volodin_IGKE_210526-1.pdf (June 14, 2023).
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Chestnykh O.V., Dinamika balansa ugleroda v lesakh federal'nykh okrugov Rossiiskoi Federatsii (Dynamic pattern of carbon balance in the forests of federal districts of the Russian Federation), *Voprosy lesnoi nauki*, 2018, Vol. 1, No. 1, pp. 1–24.
<https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-24>
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kaganov V.V., Ekosistemnye uslugi i prostranstvennoe raspredelenie zashchitnykh lesov Rossiiskoi Federatsii (The ecosystem services and spatial distribution of protective forests in Russian Federation), *Lesovedenie*, 2021, No. 6, pp. 581–592.
- Zubkova E.V., Stamenov M.N., Priputina I.V., Grabovskii V.I., Fitoindikatsiya bogatstva pochv v lesakh i sodержание azota v pochve i rasteniyakh v sosnyakakh i lipnyakakh Moskovskoi oblasti (Phytoindication of soil richness in forests and nitrogen content in soil and plants in pine and linden forests of the Moscow region), *Botanicheskii zhurnal*, 2024. (In print).