

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2022

Том 5. Выпуск 2

Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77 - 72325 — сетевое издание от 14 февраля 2018 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес издателя и редакции: 630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 8/2, тел.: +7(383) 363-90-35, ИПА СО РАН, e-mail: redactor@soils-journal.ru, сайт: <https://www.soils-journal.ru>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, зав. лабораторией агрохимии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Заместители главного редактора

Дергачева Мария Ивановна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Соколов Денис Александрович – доктор биологических наук, зав. лабораторией рекультивации почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Члены редколлегии

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, директор, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Абакумов Евгений Васильевич – профессор РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБНУ Бурятский НИИ сельского хозяйства (Улан-Удэ, Россия)

Гамзиков Геннадий Павлович – академик РАН, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Гольева Александра Амуриевна – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Россия)

Кулижский Сергей Павлович – доктор биологических наук, профессор, проректор по социальным вопросам, ФГБОУ ВО Национальный Исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Колесников Сергей Ильич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, ФГБОУ ВО Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Рожков Вячеслав Александрович – член-корреспондент РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Почвенный институт им.В.В. Докучаева (Москва, Россия)

Седов Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, ведущий исследователь Института геологии Национального автономного университета Мексики (UNAM, Мехико, Мексика)

Сиромля Татьяна Ивановна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сысо Александр Иванович – доктор биологических наук, заместитель директора по науке, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Убугунов Леонид Лазаревич – доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией генезиса почв и радиоэкологии, ФГБУН Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск, Россия)

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, руководитель Сибирского НИИ земледелия и химизации СФНЦА РАН (Новосибирск, Россия)

Шпедт Александр Артурович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, директор, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Якутин Михаил Владимирович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Содержание

Якименко В.Н., Нечаева Т.В., Гопп Н.В.

От редакции

e179

Органическое вещество почв

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ состояния почв и запасы углерода в лесной растительности

e169

Шарков И.Н., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв

e175

Эволюция почв и динамика экосистем

Титлянова А.А., Вишнякова Е.К. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту

e176

Обзоры и рецензии

Корнатовая Н.Г. Обзор исследований продукционно-деструкционных процессов в болотах Западной Сибири: методы и результаты

e170

Дискуссия

Наумов А.В. Углеродный статус России и динамическое равновесие биосферы

e166



ОТ РЕДАКЦИИ

Современная парадигма экономической и общественно-политической деятельности человечества предусматривает обязательный и всесторонний учет экологических аспектов. Перманентный рост мирового ресурсо- и энергопотребления, нарастающее антропогенно обусловленное изменение климата и природной среды, актуализируют необходимость замены имеющихся промышленных технологий на экологически обоснованные энерго-, природо- и ресурсосберегающие технологии. В этой связи, глобальная экологическая и климатическая трансформация, как экономики, так и общества в целом, остро стоит на повестке дня. Одним из ключевых направлений этой деятельности является декарбонизация или низкоуглеродная экономика, широко обсуждаемая и реализуемая в ведущих странах мира, в т.ч. и России.

Эффективность реализации стратегии низкоуглеродного развития России, как и других стран, в немалой степени зависит от адекватности подходов и технологий определения углеродного баланса в тех или иных экосистемах, методов измерения потоков парниковых газов – их поступление в атмосферу и секвестрация из неё. Это сфера интересов и зона ответственности профильных научных специалистов, которые, несомненно, внесут свой существенный вклад в решение данной проблемы.

В феврале 2021 года Министерство науки и высшего образования Российской Федерации запустило проект по созданию в различных экосистемах на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса. Однако на год раньше начал функционировать первый Пилотный Карбоновый полигон (КП) в Калужской области на территории Национального природного парка «Угра», включающий лесные и залежные участки разного возраста, типичные для зоны смешанных лесов, а также пахотные земли. Об итогах деятельности этой научной базы сообщается в материале И.Н. Кургановой с соавторами. На начальном этапе работы авторами дана характеристика почв исследуемых экосистем и проведена оценка запасов углерода в почве и фитомассе лесных участков. Установлено, что основным депо углерода в лесных экосистемах, независимо от их возраста, является фитомасса древесных растений; общие запасы углерода в древостое существенно превышают почвенный пул элемента. На основе полученных результатов авторы обсуждают дальнейшие перспективы научных исследований на КП «Угра».

В статье А.А. Титляновой и Е.К. Вишняковой представлен и проанализирован обширный материал по продуктивности различных экосистем – от болот лесотундры до опустыненных степей – лежащих на широтном градиенте от 65 до 50° с.ш. и в интервале долгот от 63 до 95° в.д. Авторы приводят запасы фитомассы и величины надземной, подземной и общей продукции для 45 экосистем, сгруппированных в 12 типов, и устанавливают особенности их изменения в зависимости от градиента температуры и осадков. Рассматривается специфика входных и выходных потоков углерода в различных экосистемах, влияющая на секвестрацию этого элемента и его поступление в атмосферу.

Сельскохозяйственные угодья, в т.ч. пахотные, занимают значительные площади на территории России, поэтому их учет как компонента общей системы цикла углерода является целесообразным. В работе И.Н. Шаркова и П.В. Антипиной рассматриваются особенности секвестрации атмосферного CO₂ пахотными почвами по сравнению с целинными аналогами и залежью. Показана невысокая, в целом, углерод-секвестрирующая способность почв агроценозов, выявлены причины слабого закрепления этого элемента в пахотных почвах, предлагаются пути повышения темпов депонирования углерода.

Результаты изучения специфики продукционно-деструкционных процессов, в целом, и показателей углеродного цикла, в частности, в верховых болотах Западной Сибири, представлены в работе Н.Г. Коронатовой. Отмечены особенности круговорота углерода в болотных экосистемах, описаны применяемые методы, показан географический охват исследований. Полученные данные позволили выявить закономерности изменения фитомассы, первичной продукции и деструкции вдоль широтного градиента, провести сравнительную оценку продуктивности болот с другими биогеоценозами региона.

В статье А.В. Наумова изложена авторская точка зрения на вопросы оценки углеродного статуса наземных экосистем, обосновывается концепция динамического углеродного баланса в биосфере. В свете предлагаемой концепции рассматривается оценка годовой первичной продукции (NPP), эмиссии CO₂ с поверхности почвы (дыхание почвы, SR) и содержания углерода в сухом органическом веществе; показана возможность использования соотношения NPP/SR~1 в качестве количественного критерия, характеризующего углеродный статус природных наземных экосистем.

Редакция журнала неоднократно отмечала, что не возражает, если мнение авторов публикуемых нами статей не совпадает с редакционным, а также точкой зрения на рассматриваемые вопросы каких-то других профильных специалистов. Полагаем, что дискуссионность некоторых работ не является основанием для их неприятия и не предоставления авторам возможности высказаться по той или иной проблеме; научное сообщество, ознакомившись с доводами автора, само даст адекватные оценки. Возможность открытого обмена мнениями при поиске истины – неперемнное условие научного прогресса.






В целом можно сказать, что актуальность карбоновой повестки не вызывает сомнений. Однако пока еще нет единых мировых и даже национальных стандартов и алгоритмов расчета углеродного баланса. В настоящее время идет фаза активного формирования базы данных для разработки и согласования единых подходов и методов оценки баланса и цикла углерода, как глобального, так и региональных. Публикуемые в представляемом номере работы вносят свой, определенный вклад в решение вопросов углеродной проблематики и, как надеется редакция журнала, будут интересны и полезны нашим читателям.

Редакция журнала:
Якименко В.Н., Нечаева Т.В., Гопп Н.В.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**ПИЛОТНЫЙ КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН В РОССИИ: АНАЛИЗ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

© 2022 И. Н. Курганова ^{1,2}, В. О. Лопес де Гереню ¹, С. Л. Ипп³, В. В. Каганов ⁴,
Д. А. Хорошаев ¹, Д. И. Рухович⁵, Ю. В. Сумин³, Н. Д. Дурманов³, Я. В. Кузяков ⁶

¹ФГБУН ФИЦ ПНЦБИ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2а, г. Пушкино, 142290, Россия. E-mail: ikurg@mail.ru

²Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003, Россия

³ООО «Контролтугоу.Ру», ул. Шаболовка, д. 31, стр. 11, этаж 4, помещение 1-15, г. Москва, 115162, Россия

⁴ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, г. Москва, 117997, Россия

⁵ФГБНУ Почвенный Институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Россия

⁶Университет Георга Аугуста, Бузгенвег, 2, г. Гёттинген, 37077, Германия

Цель исследования: характеристика почв и определение запасов углерода в лесной растительности на территории пилотного карбонового полигона «Угра».

Место и время проведения. Калужская область, Национальный парк Угра, март-октябрь 2020 г.

Методология. Исследования проводили на почвах разного землепользования: современная паашня, залежные почвы под луговой растительностью, молодые лесные участки 25–30-летнего возраста и смешанный лес (75–80 лет). Образцы почв отбирали из 4 прикопок и одного разреза, заложенных на 2–4 отдельных участках каждого типа землепользования из слоя 0–50 см с шагом 10 см. Определяли содержание общего углерода (С) и общего азота (N), отношение C/N. Поскольку в дерново-подзолистых почвах карбонаты отсутствуют, то содержание общего С можно принять равным содержанию органического С (С_{орг}). Учитывая плотность почвы, была выполнена оценка запасов С_{орг} и N в слоях 0–20 и 0–50 см. В слое 0–20 см определяли гранулометрический состав, величину рН(KCl), наименьшую влажёмкость образцов нарушенного сложения (НВ) и микробную активность (скорость базального дыхания, БД и содержание углерода микробной биомассы, С_{мик}). На лесных участках, на основе данных лесотаксационного учёта, были оценены запасы углерода в фитомассе и мортмассе (сухостой деревьев).

Основные результаты. Дерново-подзолистые почвы Карбонового полигона «Угра» характеризуются супесчаным гранулометрическим составом и слабокислой (паашня и залежи) или кислой (лесные участки) реакцией. Микробная активность почв в слое 0–20 см убывает в следующем ряду: залежь под луговой растительностью > 25–30-летние лесные насаждения > паашня > смешанный лес. Показано, что варьирование скорости БД на 86–90% определялось содержанием С_{мик} в почве. Максимальные запасы С_{орг} в слое 0–50 см характерны для почв паашни (65,4 ± 4,4 т С/га), а минимальные (41,4 ± 0,4 т С/га) – для почв 25–30-летних лесных участков. Соотношение C/N в слое 0–10 см изученных почв варьирует от 8,9 до 17,6 и зависит от состава растительного опада, поступающего на поверхность почвы. Основным пулом С в лесных экосистемах, независимо от их возраста, является фитомасса древесных растений. Её запасы в лесных насаждениях 25–30-летнего возраста и смешанного леса превосходят суммарные запасы С_{орг} в 50-см слое почв в 1,6 и 4 раза, соответственно. Общие запасы С в смешанном лесу в 3 раза выше, чем в древостоях 25–30-летнего возраста.

Заключение. Запасы С и состояние почв Карбонового полигона «Угра» зависят от типа современного землепользования, который, в свою очередь, определяет характер поступающих в почву растительных остатков. Это является причиной наиболее отчётливых различий изученных почв по содержанию С_{орг} и N, отношению C/N и микробным характеристикам почв. Возраст лесных насаждений является ключевым фактором, определяющим суммарные запасы С в почве и фитомассе.

Ключевые слова: карбоновый полигон; лесные и сельскохозяйственные земли; дерново-подзолистая почва; содержание углерода и азота; микробные свойства; запасы углерода в лесной растительности

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

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата превратилось из узкоспециального естественнонаучного вопроса в одну из наиболее острых проблем мировой экономики и политики (Макаров, 2013). В индустриальную эпоху рост концентрации CO_2 в атмосфере приобрёл экспоненциальный характер и вызвал беспрецедентное увеличение глобальной температуры воздуха (Второй оценочный доклад по изменению климата..., 2014). Считается, что именно человек является причиной столь резких проявлений климатических изменений и, поэтому, именно человечеству необходимо искать пути для решения этой глобальной экологической проблемы современности и выработать стратегию по смягчению климатических изменений.

Одним из предлагаемых направлений для решения данного вопроса является сокращение выбросов парниковых газов в индустрии и агропромышленном комплексе путём перехода на «зелёную», или низкоуглеродную экономику и низкоэмиссионные технологии производств (Битва за климат..., 2021). Западные страны настаивают на введении трансграничного налога для стран-экспортёров продукции с высоким углеродным следом; уже к 2023 г. механизм налогообложения должен охватить электроэнергетику и продукцию энергоёмких секторов промышленности, производящих цемент, сталь, алюминий, нефтепродукты, бумагу, стекло, химикаты и удобрения.

Состояние сельскохозяйственных почв играет существенную роль не только в обеспечении продовольственной безопасности страны, но и в вопросах изменения климата (Kudeyarov, 2019). На протяжении веков «здоровые» почвы смягчали негативные последствия потепления климата, выступая постоянно действующим стоком атмосферного CO_2 (Иванов и др., 2021). Пул почвенного углерода, включая торфяные залежи, на территории Российской Федерации составляет 298–342 Гт С (1 Гт = 10^9 т) для слоя 0–100 см или 18–23% мировых запасов углерода в педосфере (Курганова, Кудеяров, 2012). Используя почву для получения продуктов питания, человек оказывает огромное влияние на почвенные запасы углерода, определяя тем самым экологическую функцию почв, как источника или стока CO_2 . Необходимо разработать и внедрить меры по связыванию избыточных количеств CO_2 с использованием адаптивных технологий, воспроизводящих естественные природные процессы. К таким мерам, прежде всего, следует отнести лесоразведение, а также регенеративное и ресурсосберегающее земледелие (Соколов и др., 2019). Поэтому сегодня как никогда актуальными становятся задачи мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов, оценки современного потенциала наземных экосистем депонировать углерод и разработка научно-обоснованных мер по увеличению углерод-поглощающей ёмкости основных резервуаров биогенного цикла углерода.

В связи с этим в современную государственную повестку дня включено создание в самые кратчайшие сроки так называемых «карбоновых полигонов» – территорий для исследования биогеохимического цикла углерода в наиболее типичных экосистемах и выработки практических мер по контролю эмиссии и поглощения основных парниковых газов. Проект Минобрнауки по созданию карбоновых полигонов на территории Российской Федерации стартовал в начале 2021 г. (Карбоновые полигоны..., 2021). Для научного обоснования проекта Минобрнауки, на год раньше – в марте 2020 г. – был запущен Пилотный Карбоновый полигон в Калужской области на территории Национального природного парка «Угра». Располагаясь на площади около 600 га, Карбоновый полигон «Угра» (КП «Угра») включает лесные и залежные земли разного возраста, типичные для зоны смешанных лесов, а также пахотные земли. Основная задача организации КП «Угра» – разработка и испытание технологий дистанционного и наземного контроля эмиссии парниковых газов и других значимых для изменения климата параметров на лесных территориях и сельскохозяйственных землях. Один из начальных этапов исследований на КП «Угра» включал инвентаризацию состояния почв и растительности.

В представляемой работе даётся: (1) общая характеристика почв лесных, залежных и пахотных участков и (2) оценка запасов углерода в почвах и фитомассе лесных участков Первого карбонового полигона, а также обсуждаются возможные перспективы научных исследований на Пилотном КП «Угра».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика климата и растительности. Климат в регионе исследований умеренно-континентальный. По данным ближайшей к полигону метеостанции Сухиничи (Калужская область, 54°06' с.ш. 35°21' в.д.), среднегодовая температура воздуха (Тв) в 1981–2010

гг. составляла 5,4 °С, а среднегодовое количество осадков – 637 мм. Минимальная Тв характерна для января (–6,8 °С), а максимальная – для июля (18,3 °С). Преобладающий тип почв на КП «Угра», согласно данным рекогносцировочных маршрутов, дерново-подзолистая глубоко оглеенная супесчано-глинистая на флювиогляциальных отложениях (Классификация ..., 2004).

Преобладающим типом растительности на КП «Угра» (Рис. 1) являются лесные насаждения двух типов. Одни из них (площадки F4–F6) представляют собой смешанный лес, имеют разнородный породный состав, с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*, L.) и берёзы повислой (*Betula pendula*, Roth). Их возраст составляет около 75–80 лет, что подтверждается наличием обследованных лесных массивов на исторических картах 1940–1945 гг. Другие (площадки F1–F3) представляют собой заросшие древесной растительностью земли сельхозназначения, выведенные из сельскохозяйственного оборота 25–30 лет назад. К настоящему моменту на них образовались сомкнутые древостои с преобладанием *B. pendula*, небольшим участием *P. sylvestris* и единичными экземплярами осины обыкновенной (*Populus tremula*, L.). Для проведения лесотаксационных работ на однородных ключевых участках в ненарушенных лесных насаждениях были организованы пробные площади размером 34×33 м (0,1 га).



Рисунок 1. Расположение площадок исследования на территории Пилотного Карбонового полигона «Угра». Обозначения: F1–F3 – лесные насаждения 25–30 лет; F4–F6 – лесные насаждения 75–80 лет; Ar1–Ar4 – пахотные участки; Ab1–Ab2 – залежные участки под луговой растительностью.

На территории КП «Угра» располагаются также бывшие сельскохозяйственные земли, которые представляют собой луговые ценозы с разнотравно-злаковой растительностью (площадки Ab1 и Ab2). После выведения из сельскохозяйственного оборота они периодически распахивались, что препятствовало возобновлению на них древесной растительности. Современные пахотные участки (Ar1–Ar4) в начале 90-х годов прошлого столетия на несколько лет также были заброшены, но затем периодически пахались и использовались под выращивание самых разнообразных сельскохозяйственных культур.

Отбор почвенных проб и их анализ. На участках различного землепользования в углах квадрата со стороной 50 метров закладывали по 4 прикопки, а в центре квадрата был выкопан полнопрофильный разрез, в котором с помощью бура Качинского определяли плотность почвы (BD , $г/см^3$) в 10-см слоях до глубины 50 см весовым методом (Шейн, 2005). Во всех прикопках и в разрезе послойно с шагом 10 см до глубины 50 см отбирали почвенные пробы. Образцы почв высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. Корни и грубодисперсный органический материал удаляли вручную. Гранулометрический состав определяли для каждого участка в смешанном образце из слоя 0–20 см методом пипетки с диспергацией пиррофосфатом натрия (Шейн, 2005). В тех же образцах нарушенного сложения проводили определение наименьшей влагоёмкости (НВ) с использованием пластиковых трубочек диаметром 2 см с перфорированным дном (Шейн, 2005). Определение величины рН проводили в 1 М растворе KCl (соотношение почвы и раствора 1:2,5) на рН-метре Metler-Toledo (Швейцария).

Содержание общего углерода (С) и общего азота (N) определяли в индивидуальных образцах, отобранных послойно, на автоматическом элементном CHNS-O анализаторе (EA 1110, PerkinElmer) в независимой аккредитованной лаборатории Института Биологии Коми «Коми научный центр Уральского отделения Российской Академии наук» (РОСС RU.0001.511257, <http://fsa.gov.ru>). Поскольку в дерново-подзолистых почвах карбонаты отсутствуют, то содержание общего С можно принять равным содержанию органического С ($C_{орг}$). Для каждого из 12 участков было проанализировано по 20–25 почвенных образцов. Отношение C/N определяли на основе их массовой доли, т.е. $C(\%)/N(\%)$.

Запасы углерода (Stock $C_{орг}$, т С/га) в каждом 10-см слое исследуемых почв определяли по формуле:

$$\text{Stock } C_{орг} = \text{Content } C_{орг} \times BD \times h \quad (1),$$

где Content $C_{орг}$ – абсолютное среднее содержание $C_{орг}$ в слое (%), BD – плотность почвы ($г/см^3$), h – мощность слоя, см. Суммарные запасы $C_{орг}$ в слоях 0–20 и 0–50 см находили простым суммированием запасов $C_{орг}$ в соответствующих 10-см слоях.

Базальное дыхание (БД) почв определяли в слое 0–20 см в 3-х кратной повторности по интенсивности выделения CO_2 из почвы после 7 дней предварительной инкубации при увлажнении, соответствующем 70–75% их НВ, и температуре 22–24 °C (Kurganova et al., 2012):

$$\text{БД (мг С/кг почвы/сут)} = (C_1 - C_0) \times 12 \times V_{\text{флак}} \times 1000 / m \times 22,4 \times t \times 100 \quad (2),$$

где C_0 и C_1 – начальная и конечная концентрации CO_2 во флаконе, объёмные %; $V_{\text{флак}}$ – объём флакона, мл; t – время инкубации, сут; m – навеска почвы, кг; 12 – атомный вес углерода, г; 22,4 – молярный объём, л.

Содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (Anderson, Domsch, 1978) в почвенных образцах после измерения БД и внесения 1 мл раствора глюкозы из расчёта 10 мг глюкозы на 1 г почвы. Скорость субстрат-индуцированного дыхания ($V_{\text{сид}}$) рассчитывали по формуле (2), выражая в мкл $CO_2/г$ почвы/час. Содержание $C_{\text{мик}}$ (мг С/кг почвы) рассчитывали по формуле (Anderson, Domsch, 1978):

$$C_{\text{мик}} = 40,04 \times V_{\text{сид}} + 0,37 \quad (3).$$

Определение запасов стволовой древесины и оценка общих запасов углерода в фитомассе и мортмассе базировалось на данных сплошной перечислительной таксации древостоя в пределах организованных пробных площадей (ПП), выполненной согласно Общесоюзным нормативам для таксации лесов (1989). К учёту принимались деревья с диаметром ствола 8 и более см, для каждого из которых определяли породу и выполняли двукратное измерение диаметра (в см) на высоте 1,3 м с использованием таксационной вилки Mantax-80. Измерение высот проводили ультразвуковым высотомером VERTEX-IV для выборки, охватывающей 15–30% деревьев каждой породы. Запас стволовой древесины вычисляли по формуле:

$$M = \Sigma G \times H_{\text{ср}} \times F_{\text{ср}} \quad (4),$$

где M – объём стволовой древесины, $м^3/га$; ΣG – сумма площадей сечения элемента леса (породы), $м^2/га$; $H_{\text{ср}}$ – средняя высота элемента леса (породы), м; $F_{\text{ср}}$ – среднее видовое число

элемента леса (породы), представляющее табличную величину, которая варьирует в диапазоне от 0,4 до 0,5. Величина ошибки при определении запаса стволовой древесины по данным пробных площадей со сплошным перечётом элементов древостоя находится в диапазоне от 2 до 10%.

Конвертирование полученных таксационных показателей в величины, отражающие запас углерода, депонированного в фитомассе деревьев (стволы, ветви, листья, корни), было выполнено на основе Руководящих указаний Межправительственной группы экспертов по изменению климата и Методических указаний по количественному определению объёма поглощения парниковых газов (2017), утверждённых распоряжением Минприроды России № 20-Р от 30.06.2017.

Запас углерода в фитомассе ($C_{\text{фито}}$, т С/га) рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{фито}} = M \times KР \quad (5),$$

где M – объём стволовой древесины, м³/га; $KР$ – конверсионный коэффициент для пересчёта запаса стволовой древесины в углерод фитомассы (табл. 1).

Таблица 1

Конверсионные коэффициенты для расчёта запасов углерода в фитомассе древостоя по объёмному запасу древесины

Преобладающая порода	Группа возраста			
	молодняки	средне-возрастные	приспевающие	спелые и перестойные
<i>B. pendula</i>	0,437	0,396	0,367	0,367
<i>P. sylvestris</i>	0,435	0,352	0,329	0,356
<i>P. tremula</i>	0,356	0,363	0,335	0,365

Обработка данных. Статистическую обработку результатов и визуализацию данных проводили с использованием программы Microsoft Excel 2013 (пакет «Анализ данных») и Statistica 6. В таблицах и на графиках приведены средние значения и стандартная ошибка (SE). Все статистические процедуры выполняли при уровне значимости $\alpha = 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика свойств почв лесных участков. Дерново-подзолистые почвы Карбонового полигона «Угра» сформировались на флювиогляциальных отложениях. На всех лесных участках они характеризуются близким гранулометрическим составом (табл. 2). В слое 0–20 см преобладающими являются фракции песка (< 0,05 мм; 51–60%) и крупной пыли (0,05–0,01 мм; 22–29%). Содержание физической глины (< 0,01 мм) в верхнем горизонте почв изменяется в пределах 10–20%, и в соответствии с классификацией Н.А. Качинского, все почвы, независимо от возраста сформировавшегося на них древостоя, относятся к супесчаным.

Таблица 2

Гранулометрический состав почв лесных участков Карбонового полигона «Угра» (слой 0–20 см)

Объект	Фракции (мм), %						Физ. глина < 0,01	Физ. песок > 0,01
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001		
Лесные участки (возраст 25–30 лет)								
F1	35,90	16,47	28,33	6,11	9,75	3,44	19,30	80,70
F2	37,63	13,45	29,52	6,27	9,26	3,88	19,41	80,59
F3	36,12	18,14	27,77	1,54	14,17	2,27	17,97	82,03
Смешанный лес (возраст 75–80 лет)								
F4	44,81	19,19	21,56	4,60	6,52	3,32	14,44	85,56
F5	38,88	21,92	22,84	5,72	7,04	3,60	16,36	83,64
F6	32,32	26,72	24,72	4,88	7,24	4,12	16,24	83,76

Величина НВ в слое 0–20 см почв под более молодыми лесными насаждениями варьирует незначительно – от 33 до 34%, составляя в среднем (\pm SE) $33,3 \pm 0,4\%$ (табл. 3). В почвах смешанного леса величины НВ значимо выше ($p < 0,001$), чем в почвах молодых насаждений и

составляют 37–40% (среднее значение (\pm SE) – $38,2 \pm 0,9\%$), что при сходном гранулометрическом составе почв всех лесных участков может быть обусловлено более высоким содержанием органического вещества (ОВ) в почвах смешанного леса (рис. 1).

Таблица 3

Наименьшая влагоёмкость (НВ), базальное дыхание (БД) и содержание микробного углерода ($C_{\text{мик}}$) в почвах лесных участков Карбонового полигона «Угра» (слой 0–20 см)

Участок	pH(KCl)	НВ, %	БД, мг С/кг почвы/сут	$C_{\text{мик}}$, мг С/кг почвы
Лесные участки (возраст 25–30 лет)				
F1	$4,00 \pm 0,02$	$32,8 \pm 0,44$	$32,4 \pm 0,7$	471 ± 17
F2	$3,95 \pm 0,03$	$34,1 \pm 0,67$	$28,2 \pm 1,4$	379 ± 21
F3	$4,22 \pm 0,04$	$33,1 \pm 0,08$	$22,9 \pm 0,5$	319 ± 4
Среднее	$4,05 \pm 0,08$	$33,3 \pm 0,4$	$27,8 \pm 2,7$	390 ± 44
Смешанный лес (возраст 75–80 лет)				
F4	$3,87 \pm 0,03$	$37,6 \pm 0,05$	$15,4 \pm 0,3$	$180 \pm 1,8$
F5	$3,88 \pm 0,01$	$37,0 \pm 0,26$	$10,6 \pm 0,5$	$182 \pm 5,5$
F6	$3,97 \pm 0,01$	$40,0 \pm 2,42$	$11,2 \pm 0,7$	$256 \pm 3,7$
Среднее	$3,90 \pm 0,03$	$38,2 \pm 0,9$	$12,4 \pm 1,5$	206 ± 25
Значимость различий, p*	ns	< 0,001	0,002	0,002

Примечание. *Уровень значимости (p) различий средних значений почвенных характеристик между лесными насаждениями разного возраста; ns – различия недостоверны.

Потенциальная кислотность почв (слой 0–20 см) смешанного леса составляет в среднем (\pm SE) $3,90 \pm 0,03$ ед. pH, что чуть выше, чем в почвах более молодых лесных насаждений (pH = $4,05 \pm 0,08$). Эти различия могут быть обусловлены разным породным составом древостоя и, следовательно, различиями в листовом опаде лесных насаждений: преимущественно лиственным на участках бывшей пашни с молодым лесом и лиственно-хвойным в смешанном лесу.

Скорость базального дыхания верхнего 20-см слоя почв на участках с молодой древесной растительностью изменялась довольно существенно: от 22,9 до 32,4 мг С/кг почвы/сут, составляя в среднем (\pm SE) $27,8 \pm 2,7$ мг С/кг почвы/сут (табл. 3). Почвы смешанного леса, несмотря на большее содержание органического вещества, характеризовались достоверно более низкой интенсивностью БД ($p = 0,002$) при высоком разбросе значений (от 10,6 до 15,4 мг С/кг почвы/сут). Средняя величина БД составила $12,4 \pm 1,5$ мг С/кг почвы/сут, что в 2 раза меньше, чем интенсивность БД на участках, зарастающих молодым лесом. Это, с одной стороны, может объясняться более высокой кислотностью почв смешанного леса, что может угнетать микробное сообщество (Susyan et al., 2011; Kurganova et al., 2021), а с другой – меньшей доступностью ОВ верхнего слоя этих почв микробному разложению по причине преобладания в составе опада трудноразлагаемой хвои.

Содержание $C_{\text{мик}}$ в почвах лесных участков тесно коррелировало со скоростью БД ($r = 0,93$; $p = 0,007$). Так, в почве под смешанным лесом (слой 0–20 см) количество углерода микробной биомассы было значимо ниже ($p = 0,002$), чем в почвах участков бывшей пашни с молодой древесной растительностью: 206 ± 25 против 390 ± 44 мг С/кг почвы. В почвах лесных участков вариабельность скорости базального дыхания на 86% объяснялась изменчивостью содержания $C_{\text{мик}}$ ($p = 0,007$).

Содержание $C_{\text{орг}}$ в почвах всех лесных участков резко убывает вниз по профилю (рис. 2), демонстрируя классический гумусо-аккумулятивный характер распределения $C_{\text{орг}}$ в слое 0–50 см. В почве смешанного леса содержание $C_{\text{орг}}$ снижается от 20,0 до 1,1 г С/кг почвы, а в почвах при естественном лесовозобновлении на бывших сельскохозяйственных угодьях уменьшение содержания $C_{\text{орг}}$ выражено чуть менее рельефно: от 12,5 до 1,4 г С/кг почвы. И хотя в пределах всех слоёв верхней 50-см толщи почв смешанного леса содержание $C_{\text{орг}}$ выше, чем в соответствующих слоях участков, зарастающих молодым лесом, значимые различия по содержанию $C_{\text{орг}}$ между почвами лесных участков разного возраста имеют место только в слое 0–10 см.

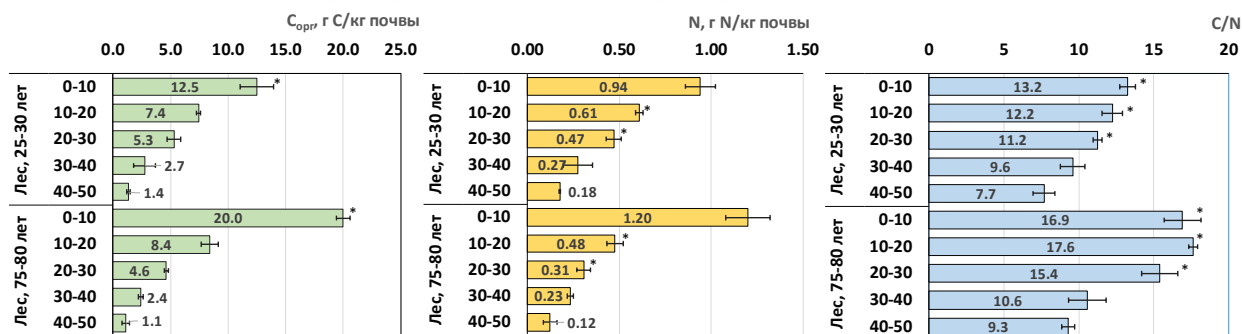


Рисунок 2. Изменение среднего содержания органического углерода (C_{орг}), общего азота (N) и соотношения C/N в 0–50 см слое почв лесных участков Карбонового полигона «Угра». (Знак * показывает значимые различия (p < 0,05) между лесными насаждениями разного возраста по почвенным свойствам на одной глубине).

Содержание N в слое 0–50 см в целом повторяет динамику изменения C_{орг}, демонстрируя наиболее существенные, но не значимые различия между почвами лесных участков разного возраста в слое 0–10 см: 1,20 г N/кг почвы во вторичном смешанном лесу против 0,94 г N/кг почвы участков молодого леса (см. рис. 2). Вместе с тем, на глубинах 10–20 и 20–30 см содержание N в почве смешанного леса значимо выше, чем в почве под более молодыми насаждениями при абсолютной разнице между ними 0,13–0,16 г N/кг почвы.

Соотношение C/N в почвах смешанного леса составляет 17–18 в верхнем 20 см слое; это ожидаемо выше, чем в том же слое почв более молодых лесных насаждений на бывших сельхозугодьях, где величина C/N имеет величину 12–13. С глубиной отношение C/N становится более узким и в слое 40–50 см оно составляет 7,7–9,3. И хотя различия по этому показателю мы наблюдаем по всему профилю почв, значимая разница между лесными участками разных возрастов характерна только для слоя 0–30 см. Более широкое отношение C/N в ОВ почв смешанного леса, свидетельствующее о его меньшей обогащённости азотом, также является причиной их более низкой микробной активности по сравнению с почвами участков молодой древесной растительности. Сходные закономерности отмечались нами также для дерново-подзолов залежного хроноряда в Костромской области (Kurganova et al., 2021).

Запасы углерода и азота в почвах лесных участков. Послойное распределение запасов C_{орг} и N в верхней 50-см толще практически полностью повторяет их содержание, представленное на рис. 2. Поэтому проанализируем суммарные запасы C_{орг} и N в бывшем пахотном слое 0–20 и для верхней 50-см толщи в целом. Для лесных участков одного возраста характерна существенная вариабельность суммарных запасов этих биогенных элементов (табл. 4), что обусловлено, по-видимому, не только природной неоднородностью почвенного покрова, но и локальными особенностями зарастания бывших пахотных почв.

Таблица 4

Суммарные запасы C_{орг} и N в слоях 0–20 и 0–50 см почв лесных участков Карбонового полигона «Угра»

Слой, см	Лесные участки, 25–30 лет			Вторичный лес, 75–80 лет			Средние запасы		
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	25–30 лет	75–80 лет	p*
Запасы C _{орг} (т С/га)									
0-20	30,3	26,3	22,0	29,5	36,2	31,9	25,9 ± 2,4	32,5 ± 2,0	ns
0-50	42,0	40,7	41,5	42,3	50,1	43,5	41,3 ± 0,4	45,3 ± 2,4	ns
Запасы N (т N/га)									
0-20	2,19	2,21	1,75	1,57	2,29	1,90	2,02 ± 0,15	1,93 ± 0,21	ns
0-50	3,45	3,61	3,58	2,67	3,46	2,75	3,54 ± 0,05	2,96 ± 0,25	0,02

Примечание. *Уровень значимости (p) различий между средними величинами запасов C_{орг} и N в почвах лесных насаждений разного возраста; ns – различия незначительны.

Средние запасы C_{орг} в слое 0–20 см почв смешанного леса составляют 32,5 ± 2,0 т С/га или 72% от общих запасов C_{орг} в слое 0–50 см (см. табл. 3). В верхнем 20-см слое почв зарастающей

лесом бывшей пашни запасы $C_{\text{орг}}$ несколько ниже ($26,2 \pm 2,4$ т С/га), но значимо не отличаются от таковых в более зрелом лесном насаждении (см. табл. 4). Их доля составляет 63% от общих запасов $C_{\text{орг}}$ в 50-см толще. Средние запасы N в слое 0–20 см почв лесных участков разного возраста близки между собой, а в слое 0–50 см почвы лесозарастающих сельскохозяйственных угодий содержат значимо больше N ($p = 0,02$), чем почвы смешанного леса: 3,55 против 2,96 т N/га. Это объясняется разным составом поступающего в почву листового опада, который в 25–30 летних лесных насаждениях состоит преимущественно из листвы мелколиственных пород и опада лесных трав более богатых азотом по сравнению с хвойно-лиственным опадом леса 75–80-летнего возраста (Ларионова и др., 2017).

Характеристика свойств почв пахотных и залежных участков. Почвы пахотных и залежных участков под луговой растительностью характеризуются близким гранулометрическим составом (табл. 5) и, в соответствии с классификацией Н.А. Качинского, относятся к супесчаным, поскольку содержание физической глины ($< 0,01$ мм) в них изменяется в пределах 16,8–19,6% ($< 20\%$). В слое 0–20 см преобладающими являются фракции песка ($< 0,05$ мм; 53–60%) и крупной пыли (0,05–0,01 мм; 22–30%).

Таблица 5

Результаты гранулометрического анализа почв пахотных и залежных участков
Карбонового полигона «Угра»

Объект	Фракции (мм), %						Физ. глина < 0,01	Физ. песок > 0,01
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001		
Пахотные участки								
Ag1	32,22	21,78	29,20	5,88	7,84	3,08	16,80	83,20
Ag2	33,49	18,35	30,28	6,40	8,40	3,08	17,88	82,12
Ag3	43,40	10,44	26,60	6,08	8,84	4,64	19,56	80,44
Ag4	42,44	12,09	26,48	6,08	8,92	4,00	19,00	81,00
Залежные участки (25–30 лет, луговая растительность)								
Ab-1	33,63	21,03	27,70	5,90	9,61	2,14	17,65	82,35
Ab-2	47,25	11,95	22,14	5,59	10,04	3,04	18,66	81,34

Величина НВ в слое 0–20 см в пахотных почвах варьирует незначительно – от 36 до 39%, составляя в среднем (\pm SE) $37,8 \pm 0,7\%$ (табл. 6). В почвах залежных участков под луговой растительностью величины НВ значимо ниже ($p = 0,03$), чем на пашне и изменяются от 32 до 37%. Среднее значение НВ в этих почвах равно $34,8 \pm 2,3\%$, что близко к средней величине НВ в почвах участков с молодым лесом ($33,3 \pm 0,4\%$).

Таблица 6

Наименьшая влагоёмкость (НВ), базальное дыхание (БД) и содержание микробного углерода ($C_{\text{мик}}$) в почвах пахотных и залежных участков Карбонового полигона «Угра» (слой 0–20 см)

Участок	pH(KCl)	НВ, %	БД, мг С/кг почвы/час	С _{мик} , мг С/кг почвы
Пахотные участки				
Ag1	$5,72 \pm 0,15$	$36,6 \pm 0,12$	$12,9 \pm 0,3$	$184 \pm 6,5$
Ag2	$5,06 \pm 0,02$	$36,8 \pm 0,63$	$12,6 \pm 0,3$	$197 \pm 4,7$
Ag3	$5,27 \pm 0,05$	$39,3 \pm 1,09$	$19,2 \pm 0,1$	$281 \pm 3,4$
Ag4	$5,32 \pm 0,02$	$38,5 \pm 0,68$	$16,1 \pm 1,1$	$313 \pm 8,5$
Среднее	$5,34 \pm 0,16$	$37,8 \pm 0,7$	$15,2 \pm 1,6$	244 ± 32
Залежные участки (25–30 лет, луговая растительность)				
Ab-1	$5,78 \pm 0,07$	$37,1 \pm 0,08$	$31,4 \pm 1,9$	491 ± 6
Ab-2	$5,75 \pm 0,01$	$32,6 \pm 0,24$	$32,4 \pm 1,4$	678 ± 17
Среднее	$5,76 \pm 0,01$	$34,8 \pm 2,3$	$31,9 \pm 0,5$	584 ± 94
Уровень значимости, p^*	0,005	0,03	0,002	0,002

Примечание. *Уровень значимости (p) различий средних значений почвенных характеристик между пахотными и залежными участками.

Потенциальная кислотность почв пашни (слой 0–20 см) варьирует от 5,1 до 5,7 ед. pH, составляя в среднем (\pm SE) $5,34 \pm 0,16$, что значимо ниже ($p = 0,005$), чем в почвах залежей,

средняя величина рН в которых равна $5,76 \pm 0,01$ ед. рН (см. табл. 6). Выявленные различия между пахотными и залежными участками могут быть обусловлены как разным составом поступающих в почву растительных остатков, так и природной неоднородностью почвенного покрова.

Скорость БД верхнего 20-см слоя пахотных почв изменялась довольно существенно: от 12,6 до 19,2 мг С/кг почвы/сут, составляя в среднем $15,2 \pm 1,6$ мг С/кг почвы/сут (см. табл. 6). Почвы залежей отличаются более высоким содержанием и большей биологической доступностью ОВ в слое 0–20 см, что отражается и в их большей микробной активности по сравнению с пахотными почвами. Средняя скорость БД в залежных почвах была в 2 раза выше, чем в пахотных и составила $31,9 \pm 0,5$ мг С/кг почвы/сут.

Содержание $S_{\text{мик}}$ и скорость БД в верхнем 20-см слое почв пашни и залежей тесно коррелировали между собой ($r = 0,95$; $p = 0,004$), свидетельствуя о том, что изменчивость величины БД на 90% объяснялась вариабельностью содержания $S_{\text{мик}}$. В среднем в пахотных почвах количество углерода микробной биомассы было в 2,4 раза ниже, чем в почвах залежных участков: 244 ± 32 против 584 ± 94 мг С/кг почвы. Эта закономерность объясняется более высоким содержанием в почвах залежей легкоразлагаемого опада травянистых растений, который является хорошо доступным питательным субстратом для почвенных микроорганизмов (Ларионова и др., 2017). Накопление опада трав в почвах залежей стало возможным после прекращения отчуждения биомассы растений при сельскохозяйственном использовании этих земель (Kurganova et al., 2018; 2021).

Содержание $S_{\text{орг}}$ в почвах залежных участков резко убывает вниз по профилю (рис. 3). В соответствии с гумусо-аккумулятивным характером распределения в пределах верхних 0–50 см почвы, оно снижается более чем в 10 раз – от 14,7 в слое 0–10 см до 1,4 г С/кг почвы в слое 40–50 см. В почвах пашни мы наблюдаем 8-кратное снижение содержания $S_{\text{орг}}$ (от 12,2–12,5 до 1,6 г С/кг почвы). Значимые различия по содержанию $S_{\text{орг}}$ между почвами пашни и залежей под луговой растительностью имеют место только в слое 10–20 см.

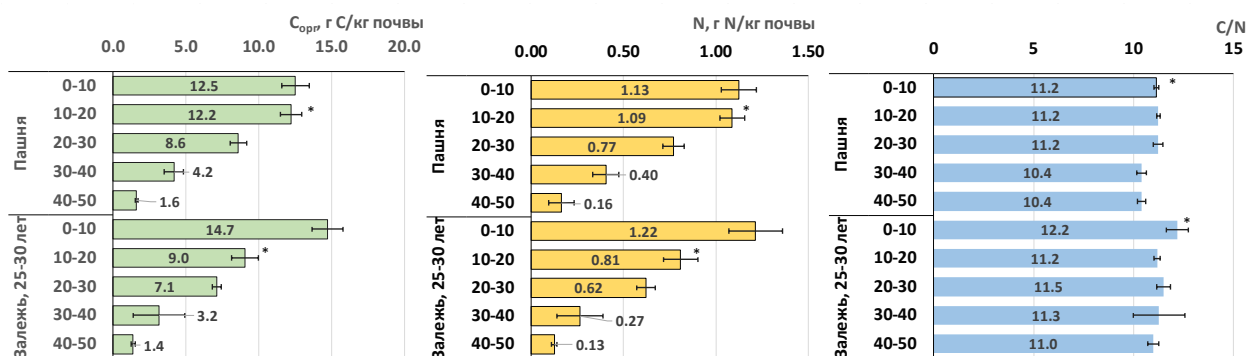


Рисунок 3. Изменение содержания органического углерода ($S_{\text{орг}}$), общего азота (N) и соотношения C/N в 0–50 см слое почв пахотных и залежных участков Карбонового полигона «Угра». (Знак * показывает значимые различия ($p < 0,05$) между залежными и пахотными участками по почвенным характеристикам на одной глубине).

Содержание азота в почвенном слое 0–50 см в целом повторяет закономерности изменения содержания $S_{\text{орг}}$, также демонстрируя значимые различия между почвами пашни и залежей только в слое 10–20 см: 1,09 против 0,81 г N/кг почвы (см. рис. 3). Соотношение C/N в пахотных почвах с глубиной убывает от 11,2 до 10,4. В почвах залежей соотношение C/N чуть выше, чем в пахотных почвах, и с глубиной оно уменьшается от 12,2 в слое 0–10 см до 11,0 в слое 40–50 см. Значимые различия по этому показателю между залежными и пахотными почвами мы наблюдаем только в самом верхнем 10-см слое почв. Вместе с тем, отношение C/N в ОВ почв залежных участков ниже, чем в почвах лесных участков, поскольку травяной опад содержит больше азота по сравнению с лесной подстилкой (Ларионова и др., 2017).

Запасы углерода в почвах пахотных и залежных участков. Наибольший интерес представляют суммарные запасы $S_{\text{орг}}$ и N в бывшем пахотном 20-см почвенном слое и во всей 50-см толще (табл. 7), поскольку послойное распределение запасов $S_{\text{орг}}$ и N в верхнем 50-см слое сходно с изменением их содержания, представленного на рис. 3.

Суммарные запасы $C_{орг}$ и N (т/га) в слоях 0-20 и 0-50 см почв лесных участков Карбонового полигона «Угра»

Слой, см	Пахотные участки			Залежные участки			Средние запасы		
	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Ab-1	Ab-2	Пашня	Залежи	p*
Запасы $C_{орг}$ (т С/га)									
0-20	28,3	36,1	37,9	31,9	27,6	34,0	33,5 ±1,5	30,8 ±1,4	ns
0-50	48,1	63,2	66,5	66,6	48,5	50,4	61,1 ±3,1	49,5 ±1,4	0,05
Запасы N (т N/га)									
0-20	2,51	3,17	3,41	2,90	2,09	2,67	3,00 ±0,14	2,64 ±0,14	ns
0-50	4,36	5,54	6,10	6,25	3,66	3,94	5,56 ±0,30	4,26 ±0,15	0,02

Примечание. *Уровень вероятности различий средних значений почвенных характеристик между лесными насаждениями разного возраста; ns — различия недостоверны.

Для пахотных участков характерна существенная вариабельность суммарных запасов $C_{орг}$ и N в почвенных слоях 0–20 и 0–50 см (см. табл. 7). Это, вероятно, обусловлено не только природной неоднородностью почвенного покрова исследуемой территории, но и особенностями использования современных пахотных почв, которые в течение последних 30 лет периодически находились то в залежном, то в обработанном состоянии. Средние запасы $C_{орг}$ в слое 0–20 см почв пашни составляли 33,5 ± 1,5 т С/га или чуть больше 50% от общих запасов $C_{орг}$ в слое 0–50 см. В верхнем 20-см слое почв залежных участков запасы $C_{орг}$ были чуть ниже — 30,8 ± 1,4 т С/га, что составляет 62% от общих запасов $C_{орг}$ в 50-см толще. По этому показателю залежные почвы под луговой растительностью схожи с почвами участков молодого леса. В 50-см слое почвы средние запасы $C_{орг}$ в почвах пашни значимо ($p = 0,05$) превышают соответствующие запасы $C_{орг}$ в почвах залежей.

Средние запасы N в верхнем 20 см слое пахотных участков составляют 3,00 ± 0,14 т N/га, а в почвах залежей они в 1,3 раза ниже – 2,64 ± 0,14 г N/га, что связано, по-видимому, с различиями в составе поступающих на поверхность почв растительных остатков. В слое 0–50 см разница запасов N в почвах пашни и залежей становится ещё более существенной (в 1,6 раза) и значимой при $p = 0,02$.

Запасы углерода в фитомассе и мортмассе лесных участков Карбонового полигона «Угра». Прекращение сельскохозяйственной деятельности на бывших пахотных угодьях в пределах территории КП «Угра» привело к их активному лесозарастанию и формированию на них через 25–30 лет молодых сосново-березовых древостоев с примесью осины (табл. 8). Их образование обуславливается близким расположением более возрастных (60–65 и 75–80 лет) лесных насаждений, которые обеспечивают поступление семян, достаточное для возобновления на залежах древесной растительности. В результате к возрасту 25–30 лет древостой, сформированный на бывших сельхозугодьях, фактически представляет собой полностью покрытые лесом земли.

Формулы древостоя и запасы C в фитомассе древостоя и мортмассе сухостоя лесных участков

Параметр	Лесные участки 25-30 лет				Вторичный лес 75-80 лет			
	F1	F2	F3	среднее	F4	F5	F6	Среднее
Формула древостоя*	10Б+С	9Б1С ед.Ос	9Б1С		9С1Б+Ос ед. Е	10С+Д+Б ед. Кл, Е, Ос, Рб	6С3Б1Е ед. Д, Ив	
Фитомасса древостоя, т С/га	69,8	64,3	42,5	58,9 ± 8,3	150,8	214,8	159,6	175 ± 20
Мортмасса сухостоя, т С/га	0,3	0,1	0	0,1 ± 0,1	4,0	13,7	0,8	6,2 ± 3,9
Всего, т С/га	70,1	64,5	42,5	59,0 ± 8,4	154,8	228,5	160,4	181 ± 24

Примечание. *Б – береза повислая (*B. pendula*), С – сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), Ос – осина (*P. tremula*), Е – ель европейская (*Picea abies*), Д – дуб черешчатый (*Quercus robur*), Кл – клён остролиственный (*Acer platanoides*), Рб – рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), Ив – ива козья (*Salix caprea*).

Процесс лесовосстановления на бывших сельхозугодьях сопровождается активным накоплением углерода, аккумулируемого в фитомассе древесной растительности (Люри и др., 2011; Telesnina et al., 2017; 2019). На территории КП «Угра» деревья к 25–30-ти летнему возрасту достигали среднего диаметра 10–12 см и средней высоты 15–17 м. Расчёты, проведённые по национальным методическим указаниям, разработанным в соответствии с рекомендациями МГЭИК, показали, что общие запасы С (с учётом сухостоя) на лесных участках 25–30-ти летнего возраста варьируют от 42,5 до 70,1 т С/га, составляя в среднем $59,0 \pm 8,4$ т С/га. Более 99% накопленного углерода сосредоточено здесь в фитомассе растущих деревьев, а доля сухостоя в молодых лесонасаждениях ничтожно мала. Запасы углерода в верхнем 50-см слое почв на участках с 25–30 летней древесной растительностью примерно в 1,5 раза ниже, чем запасы углерода в фитомассе древостоя.

Лесные насаждения 75–80-ти летнего возраста отличаются более высоким разнообразием породного состава, хотя сосна обыкновенная по-прежнему остаётся доминирующей породой (см. табл. 8). Таким образом, на этих лесных участках идёт формирование зональных лесных экосистем – смешанных лесов. Оно включает в себя процессы, типичные для лесных насаждений данной природно-климатической зоны: естественное изреживание древостоя (уменьшение густоты стояния деревьев), изменение породного состава насаждения и усиление его дифференциации. В результате этих процессов лесной массив становится менее однородным по породному составу и запасу древесины. С одной стороны, это может быть сопряжено с влиянием условий произрастания древесных растений (различия в почвенно-геоморфологических и гидрологических условиях), а с другой – с уменьшением количества деревьев на единицу площади в результате конкурентного отбора, что приводит к увеличению влияния на общий запас древесины в насаждении отдельных деревьев старших возрастов. Также на данном этапе на запас древесины и состав древостоя начинают оказывать существенное влияние нарушающие воздействия – низовые пожары, ветровалы, буреломы, вспышки болезней и колебания численности насекомых-вредителей. По этим причинам общие запасы С в древостоях 75–80-ти летнего возраста варьируют в более широком диапазоне величин – от 155 до 229 т С/га, составляя в среднем 181 ± 24 т С/га. Доля мёртвой древесины в общем запасе С здесь невысока и составляет около 3,4%, а более 95% депонированного углерода приходится на фитомассу растущих деревьев. Можно полагать, что данный возрастной интервал для древостоев не является возрастом максимального накопления углерода, и дальнейшее развитие экосистем по зональному типу приведёт к увеличению депонирования углерода в фитомассе лесных насаждений Карбонового полигона «Угра». Общие запасы С в смешанном лесу 75–80-летнего возраста в 3 раза превышают запасы в древостоях 25–30-летнего возраста. Однако, возрастная динамика древостоев сопровождается не только ростом запасов углерода, депонированного в фитомассе и мортмассе рассматриваемых насаждений, но и уменьшением в общем углеродном бюджете доли (но не общего запаса) углерода, депонированного в почве. Количество $S_{орг}$ в верхнем 50-см слое почв смешанного леса 75–80-ти летнего возраста в 4 раза меньше, чем общие запасы С в древесной фитомассе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преобладающим типом почв на Карбоновом полигоне «Угра» являются дерново-подзолистые глубоко оглеенные почвы, сформированные на флювиогляциальных отложениях. Их свойства в значительной степени зависят от типа современного землепользования, который, в свою очередь, определяет характер поступающих на поверхность почвы растительных остатков. Почвы характеризуются супесчаным гранулометрическим составом, слабокислой (пашня и залежи) или кислой (лесные участки) реакцией среды. Различия по содержанию $S_{орг}$ и N, отношению C/N и микробным характеристикам (скорость базального дыхания и $S_{мик}$) почв наиболее выражены в верхнем 20-см слое.

Содержание $S_{орг}$ и N в почвах всех типов землепользования, кроме пахотных участков, резко убывает вниз по профилю, демонстрируя классический гумусо-аккумулятивный характер распределения $S_{орг}$ и N в почвенном слое 0–50 см. Соотношение C/N в изученных почвах широко варьирует и зависит от состава поступающего на поверхность почвы растительного опада. Микробная активность в слое 0–20 см почв КП «Угра» убывает в следующем ряду: залежь под луговой растительностью > 25–30-летние лесные насаждения > пашня > смешанный лес. Показано, что варьирование скорости базального дыхания на 86–90% определяется содержанием $S_{мик}$ в почве.

Максимальные запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0–50 см характерны для почв пашни ($65,4 \pm 4,4$ т С/га), а минимальные ($41,4 \pm 0,4$ т С/га) – для почв 25–30-летних лесных участков. Процесс лесовосстановления на бывших сельхозугодьях сопровождается активным накоплением углерода, аккумулированного в фитомассе древесной растительности. Превалирующим пулом С в лесных экосистемах, независимо от их возраста, является фитомасса древесных растений. Её запасы в лесных насаждениях 25–30-летнего возраста и смешанного леса превосходили суммарные запасы $C_{\text{орг}}$ в 50-см слое почв в 1,6 и 4 раза, соответственно. Общие запасы С в смешанном лесу были в 3 раза выше, чем в 25–30-ти летних древостоях, свидетельствуя о том, что возраст лесных насаждений является ключевым фактором, определяющим суммарные запасы С в почве и фитомассе.

В перспективе, развитие научных исследований на Пилотном Карбоновом полигоне «Угра» будет включать следующие направления: (1) анализ влияния композиций азот- и бор- содержащих удобрений и прореживания древостоя на запасы надземной и подземной фитомассы, а также основных составляющих углеродного баланса лесных экосистем; (2) оценка эффективности технологий регенеративного земледелия с целью увеличения углерод-секвестрирующей способности почв; (3) испытание технологий дистанционного мониторинга углеродного баланса лесных территорий и сельскохозяйственных земель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Независимой аккредитованной лаборатории Института Биологии Коми «Коми научный центр Уральского отделения Российской Академии наук» за качественно выполненное определение содержания углерода и азота в почвенных образцах.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Авторы признательны руководству ООО «Контролтугоу.Ру» за финансирование исследовательских работ на Пилотном Карбоновом полигоне «Угра». Публикация подготовлена в рамках Государственного задания ФИЦ ПНЦБИ РАН (рег. № 121040800126-5) при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 075-15-2021-610) и Правительства Тюменской области (проект Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН (1)).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России* // Экспертный доклад / под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова (рук-ли авт. кол.); М.П. Орлов, К.В. Пиксендеев, Ю.Е. Ровнов и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с. (e-book).
2. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
3. *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. № 107. С. 5–32. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-107-5-32](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32)
4. *Карбоновые полигоны*. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (дата обращения 07.02.2022)
5. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. *Курганова И.Н., Кудяров В.Н.* Экосистемы России и глобальный бюджет углерода // *Наука в России*. 2012. № 5. С. 25–33.
7. *Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес де Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Каганов В.В.* Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опавов в модельном эксперименте // *Лесоведение*. 2017. № 2. С. 128–139.
8. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. *Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв*. М.: ГЕОС, 2010. 415 с.
9. *Макаров И.А.* Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // *Экономический журнал ВШЭ*. 2013. № 3. С. 470–495.
10. *Методические указания по количественному определению поглощения парниковых газов*. 2017. Утверждены Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Распоряжение от 30 июня 2017 г. N 20-р.

11. *Общесоюзные нормативы для таксации лесов* (утв. приказом Госкомлеса СССР от 28 февраля 1989 г. N 38)
12. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филиппук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепций ФАО) // *Агрехимия*. 2019. № 5. С. 3–20. DOI: 10.1134/S000218811905003X
13. Шейн Е.В. *Курс физики почв*. М.: Изд-во Моск.ун-та, 2005. 432 с.
14. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221. DOI: 10.1016/0038-0717(78)90099-8
15. Kudryarov V.N. Soil-Biogeochemical Aspects of Arable Farming in the Russian Federation // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. P. 94–104. DOI: 10.1134/S1064229319010095
16. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates // *Eurasian Soil Science*. 2012. Vol. 45. No. 1. P. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229312010085>
17. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. The Effect of Reforestation on Microbial Activity in Post-Agrogenic Soils in European Part of Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 7. P. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425518070089>
18. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 337–351. DOI: 10.1134/S1064229321030108
19. Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., Stolnikova E.V. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity // *European Journal of Soil Biology*. 2011. Vol. 47. P. 169–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.04.002>
20. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dynamics of Soil Properties and Plant Composition during Postagrogenic Evolution in Different Bioclimatic Zones // *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50, No. 12. P. 1458–1477. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317120109>
21. Telesnina V.M., Zhukov M.A. The Influence of Agricultural Land Use on the Dynamics of biological Cycling and Soil Properties in the Course of Postagrogenic Succession (Kostroma Oblast) // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1114–1129. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319070135>

Поступила в редакцию 08.02.2022

Принята 16.02.2022

Опубликована 17.02.2022

Сведения об авторах:

Курганова Ирина Николаевна – доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушчинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); ikurg@mail.ru

Лопес де Гереню Валентин Овидиович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушчинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); vlopes@mail.ru

Ипп Сергей Леонидович – управляющий директор блока «Агро» ООО «Контролтугоу.Ру» (г. Москва, Россия); s.ipp@ctrl2go.com

Каганов Владимир Владимирович – научный сотрудник лаборатории структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем ФГБУН «Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН» (г. Москва, Россия); kaganov.vl@gmail.ru

Хорошаев Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушчинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); d.khoroshaev@gmail.com

Рухович Дмитрий Иосифович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией почвенной информатики ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); landmap@yandex.ru

Сумин Юрий Витальевич – кандидат технических наук, заместитель управляющего директора Блока «Агро» ООО «Контролтугоу.Ру» (г. Москва, Россия); y.sumin@ctrl2go.com

Дурманов Николай Дмитриевич – доктор медицинских наук, специальный представитель Министерства высшего образования и науки РФ по вопросам биологической и экологической безопасности, вице-президент по научно-техническому развитию ООО «Контролтугоу.Ру» (г. Москва, Россия); n.durmanov@ctrl2go.com


Кузяков Яков Викторович – профессор, доктор биологических наук, руководитель отдела почвоведения экосистем умеренных широт и профессор отдела агрономического почвоведения Гёттингенского университета (г. Гёттинген, Германия); ykuzyakov@yandex.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

PILOT CARBON POLYGON IN RUSSIA: ANALYSIS OF CARBON STOCKS IN SOILS AND VEGETATION

© 2022 I. N. Kurganova ^{1,2}, V. O. Lopes de Gerenyu ¹, S. L. Ipp³, V. V. Kaganov ⁴, D. A. Khoroshaev ¹, D. I. Rukhovich⁵, Yu. V. Sumin³, N. D. Durmanov³, Ya. V. Kuzyakov ⁶

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Science, Pushchino, Russia. E-mail: ikurg@mail.ru*

²*University of Tyumen, Tyumen, Russia.*

³*LLC «Ctrl2Go.Ru», Moscow, Russia.*

⁴*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.*

⁵*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia.*

⁶*University of Göttingen, Göttingen, Germany.*

The aim of the study: Analysis of carbon stocks in soils and vegetation on the territory of the Pilot Carbon Polygon “Ugra”.

Location and time of the study. Kaluga region, Ugra National Park, March–October, 2020.

Methodology. The study was carried out on soils of four land use types: i) arable lands, ii) abandoned arable lands under grassland vegetation, iii) young forest vegetation (25–30 years old), and iv) mature mixed forest (75–80 years old). Two–four plots were located in each land use type. Soil samples were taken up to 50 cm by 10 cm layers. The content of organic carbon (C_{org}), total nitrogen (N), and the C/N ratio were determined. Considering soil density, the C_{org} and N stocks were calculated in the top 20 and top 50 cm. In the top 20 cm, the particle size distribution, pH(KCl), water holding capacity (WHC), and microbial properties (basal respiration, BR and content of microbial biomass, C_{mic}) were determined. Based on the forest inventory, the carbon stocks in phytomass and mortmass (dead trees) were estimated.

Main results. The Retisols of the Carbon Polygon “Ugra” are characterized by a sandy loamy texture and slightly acidic (arable and abandoned lands) or acidic (forest areas) reaction. Microbial activity in the top 20 cm of soil decreases in the following order: abandoned lands under grassland > young forest stands (25–30 years old) > arable lands > mature mixed forest. The BR variability was determined by 86–90 % by the C_{mic} content. The highest C_{org} stock in the 0–50 cm layer was in the arable soils (65.4 ± 4.4 t C/ha), and the lowest C_{org} stock (41.4 ± 0.4 t C/ha) was observed in the soils under young forest. The C/N ratio in the top 10 cm varied from 8.9 to 17.6 and depended on the composition of plant litter at the soil surface. The main C pool in the forest ecosystems, regardless of their age, was the phytomass of woody plants. This C pool exceeded the total C_{org} stocks in the 50-cm soil layer by 1.6 and 4 times in young forest and mature mixed forest, respectively. The total C stocks in the mature mixed forest were 3 times larger than in young forest stands.

Conclusions. The C stocks and the state of the soils of the Carbon Polygon “Ugra” depend on the current land use type, which in turn determines the composition of plant residues input on and in the soil. This is the reason for the most distinct differences between the studied soils in terms of C_{org} and N content, C/N ratio, and microbial characteristics. The age of forest stands is a key factor determining the total C stocks in soils and forest biomass.

Key words: Carbon polygons; forest and agricultural lands; Retisols; carbon and nitrogen content; microbial activity; carbon stock in forest biomass

How to cite: Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(2). e169. DOI: [10.31251/pos.v5i2.169](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. *The battle for climate: carbon farming as Russia's bid* // Expert report / ed. A.Yu. Ivanov, N.D. Durmanov; M.P. Orlov, K.V. Piksendeev, Yu.E. Rovnov et al.; National research university «Higher school of economics». Moscow, 2021. 120 p. (e-book, in Russian).
2. *The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation*. Moscow, Roshydromet, 2014, 1009 p. (in Russian)
3. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovov V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M. Global climate and soil cover – implications for land use in Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 107, p. 5–32. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-107-5-32](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32) (in Russian)
4. *Carbon polygons*. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation [Electronic resource]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (appeal date 07/02/2022) (in Russian)
5. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. *Classification and diagnosis of soils in Russia*. Smolensk, Ojkumena Publ., 2004, 342 p. (in Russian)
6. Kurganova I.N., Kuderyarov V.N. Russian ecosystems and global carbon budget, *Science in Russia*, 2012, No. 5, p. 25–33. (in Russian)
7. Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes de Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V. The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study, *Russian Journal of Forest Science*, 2017, No. 2, p. 128–139. (in Russian)
8. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Agricultural land dynamics in Russia in the twentieth century and postagrogenic recovery of vegetation and soils*. Moscow, GEOS Publ., 2010, 415 p. (in Russian)
9. Makarov I.A. Global climate change as a challenge for the global economy and economic science, *Higher School of Economics Economic Journal*, 2013, Vol. 17, No. 3, p. 479–496. (in Russian)
10. *Methodological guidelines for quantitative determination of greenhouse gas absorption*. 2017. Approved by the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. Order dated June 30, 2017. N 20-p. (in Russian)
11. *USSR Norms for Forest Inventory (approved by the Ministry of Forestry)*. Order of the State Committee for Forestry of the USSR of February 28, 1989. N 38) (in Russian)
12. Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Filipchuk O.D. Technological features of soil-protective resource-saving agriculture (in the development of the FAO concept), *Agrochemistry*, 2019, No. 5, p. 3–20. DOI: [10.1134/S000218811905003X](https://doi.org/10.1134/S000218811905003X) (in Russian)
13. Shein E.V. *Soil physics course*. Moscow, MSU Publ., 2005, 432 p. (in Russian)
14. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, Vol. 10, No. 3, p. 215–221. DOI: [10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
15. Kuderyarov V.N. Soil-Biogeochemical Aspects of Arable Farming in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, p. 94–104. DOI: [10.1134/s1064229319010095](https://doi.org/10.1134/s1064229319010095)
16. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, Mediterranean, and tropical monsoon climates, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45, No. 1, p. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229312010085>
17. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. The Effect of Reforestation on Microbial Activity in Post-Agrogenic Soils in European Part of Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 7, p. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425518070089>
18. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, p. 337–351. DOI: [10.1134/S1064229321030108](https://doi.org/10.1134/S1064229321030108)
19. Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., Stolnikova E.V. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity, *European Journal of Soil Biology*, 2011, Vol. 47., p. 169–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.04.002>
20. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dynamics of Soil Properties and Plant Composition during Postagrogenic Evolution in Different Bioclimatic Zones, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 12, p. 1458–1477. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317120109>
21. Telesnina V.M., Zhukov M.A. The Influence of Agricultural Land Use on the Dynamics of biological Cycling and Soil Properties in the Course of Postagrogenic Succession (Kostroma Oblast), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 9, p. 1114–1129. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319070135>

Received 08 February 2022

Accepted 16 February 2022

Published 17 February 2022

About the author(s):

Kurganova Irina N. – Doctor of Biological Sciences, Habil, Associate Professor, Principal Researcher, laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ikurg@mail.ru

Lopes de Gerenuy Valentin O. – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); vlopes@mail.ru

Ipp Sergei L. – Managing Director of Agro Block of LLC «Ctrl2Go.Ru» (Moscow, Russia); s.ipp@ctrl2go.com

Kaganov Vladimir V. – Researcher, Laboratory of structural and functional organization and resilience of forest ecosystems, Center of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia); kaganov.vl@gmail.ru

Khoroshaev Dmitry A. – Junior Researcher, Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); d.khoroshaev@gmail.com

Rukhovich Dmitry I. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of laboratory of soil informatics, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); landmap@yandex.ru

Sumin Yuri V. – Candidate of Technical Sciences, Deputy Managing Director of Agro Block of LLC «Ctrl2Go.Ru » (Moscow, Russia); y.sumin@ctrl2go.com

Durmanov Nikolai D. – Doctor of Medical Sciences, Habil., Special Representative of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Biological and Environmental Safety, Vice President for Science and Technology Development of LLC «Ctrl2Go.Ru» (Moscow, Russia); n.durmanov@ctrl2go.com

Kuzyakov Yakov V. – Doctor of Biological Sciences, Habil, Full Professor, Head of the Department of Soil Science of Temperate Ecosystems, Professor of the Department of Agricultural Soil Science (Göttingen, Germany); ykuzyakov@yandex.com

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ УГЛЕРОД-СЕКВЕСТРИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПАХОТНЫХ ПОЧВ

© 2022 И. Н. Шарков , П. В. Антипина 

ФГБУН Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, а/я 356, Новосибирский район, Новосибирская область, 630501, Россия. E-mail: humus3@yandex.ru

В статье рассмотрены возможности пахотных почв, используемых по современным агротехнологиям, при секвестрации атмосферного CO₂. Показано, что эти возможности весьма ограничены – обеспечивают абсолютный прирост содержания органического вещества (ОВ) в верхнем слое почвы до 0,1% С. Для лесостепных черноземов это составляет не более 10% от количества C_{орг}, которое было потеряно ими после вовлечения в пашню и использования до достижения равновесного уровня содержания ОВ. Невысокая углерод-секвестрирующая способность почв агроценозов объясняется, во-первых, резким, в 3 раза и более, уменьшением поступления в них растительных остатков в сравнении с целинными аналогами и, во-вторых, неспособностью прочно закреплять свежесформированные гумусовые вещества, делая их труднодоступными для почвенных микроорганизмов. Показано, что при ежегодном внесении меченых ¹⁴C растительных остатков прирост углерода в почве прекращался уже к 5-му году опыта, свидетельствуя об установлении равновесия между процессами минерализации и закрепления в почве меченых ¹⁴C соединений. Сделан предварительный вывод о том, что способность к прочной фиксации свежесформированных гумусовых веществ является исключительной особенностью целинных (залежных) почв. Пахотные земли могут играть существенную роль в секвестрации атмосферного CO₂, только после их перевода в залежь. Однако, по понятным причинам, это может быть осуществлено в весьма ограниченных масштабах и, в основном, на землях, которые нецелесообразно использовать для получения сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: пахотная почва; секвестрация CO₂ атмосферы; агротехнологии; минеральные удобрения; минимизация обработки почвы; эмиссия CO₂ почвой

Цитирование: Шарков И.Г., Антипина П.В. Некоторые аспекты углерод-секвестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. е175. DOI: [10.31251/pos.v5i2.175](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175)

ВВЕДЕНИЕ

Исследование органического вещества (ОВ) пахотных почв и его основного компонента – гумуса – имеет длительную историю, прежде всего, в связи с познанием их многогранной роли в формировании почвенного плодородия. Традиционно принято считать, что различные агротехнологические мероприятия, способствующие увеличению содержания ОВ в почве, оказывают благотворное влияние и на почвенное плодородие. Такие мероприятия достаточно хорошо изучены, поскольку повышение плодородия почвы всегда рассматривали, особенно в отечественном земледелии, в качестве обязательного условия формирования высокопродуктивных агрофитоценозов. После принятия ООН в 1992 году Рамочной конвенции об изменении климата, активно начинают заниматься проблемой накопления в атмосфере Земли «парниковых» газов, одним из которых является CO₂. В результате исследования почвенного органического вещества получили новый импульс, поскольку в почве постоянно происходит переработка накопленного и поступающего свежего ОВ, т.е. в агроэкосистемах почва одновременно выступает и как источник, и как хранилище атмосферного CO₂.

Примечательно то, что основные приоритеты при изучении органического вещества как фактора почвенного плодородия и потенциального регулятора содержания CO₂ в атмосфере полностью совпадают. Так, для улучшения агрофизических, агрохимических и биологических свойств почв земледельцы стремятся накапливать ОВ, что одновременно способствует снижению концентрации CO₂ в атмосфере и, как следствие, ослаблению «парникового» эффекта. Поэтому большинство ранее полученных результатов по изучению почвенного органического вещества представляет интерес и для решения вопросов секвестрации почвами атмосферного CO₂.

Под почвенной секвестрацией углерода понимают целенаправленный перевод атмосферного CO₂ в органическое вещество почв с целью длительного его сохранения в

почвенном резервуаре. Важно знать, при каких состояниях почва является нетто-источником, а при каких – нетто-стоком в обмене углерода с атмосферой (Семенов, Когут, 2015).

Цель статьи заключается в оценке возможностей почв агроценозов секвестрировать (депонировать) CO_2 атмосферы при использовании современных технологий выращивания сельскохозяйственных культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статья написана по результатам собственных исследований и литературным материалам авторов, изучавших закономерности изменения содержания почвенного органического вещества после распашки целинных почв и их использования с применением современных агротехнологий. Полевые опыты по оценке минерализации в почве меченой ^{14}C соломы, сравнительному определению состава ОВ на целинных и залежных участках, учету эмиссии CO_2 под влиянием разных приемов механической обработки почвы проведены на черноземе выщелоченном (Luvic Chernozem) среднесуглинистого гранулометрического состава в центральной лесостепи Новосибирского Приобья. Климат района исследования резко континентальный – с продолжительной и холодной зимой, коротким и относительно теплым летом. Среднегодовое количество осадков составляет примерно 400 мм, сумма температур воздуха выше 10°C – около $1800^\circ\text{C}\times\text{сут}$ при продолжительности периода 120 дней.

Общий углерод в почве определяли традиционным методом (Никитин, 1999), подвижный гумус – в непосредственной вытяжке 0,1 н. NaOH (Пономарева, Плотнокова, 1980), детрит – путем отделения от почвы с помощью «тяжелой» жидкости (Ганжара и др., 1985). Определение эмиссии CO_2 из почвы, получение тотально меченых ^{14}C растительных остатков и проведение полевого эксперимента с ними проводили с помощью разработанных авторских методик (Шарков, 2005а; 2005б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Существует три основных подхода к регулированию CO_2 -секвестрирующей способности пахотных почв: 1) управление процессами минерализации и гумификации ОВ в почве, 2) выращивание культур для получения продукции с длительным (десятилетия) периодом использования, 3) ресурсосбережение в агротехнологиях, позволяющее получать урожаи с наименьшей техногенной эмиссией CO_2 . Первый из них является наиболее значимым и, как уже говорилось, достаточно хорошо разработан в настоящее время в связи с актуальностью вопросов воспроизводства плодородия почв в агроценозах.

Протекание процессов минерализации и гумификации, безусловно, зависит от свойств самих почв, видов выращиваемых культур, а также климатических особенностей территории, уровня интенсификации агротехнологий, определяющих урожайность и, следовательно, количество поступающего в почву растительного вещества. Однако уже довольно давно исследователями выявлены общие закономерности изменения запасов ОВ в почвах после их вовлечения в пашню и использования с применением различных агротехнологических приемов. Эти результаты позволяют судить о возможных масштабах углерод-секвестрирующей способности пахотных почв.

Первые схемы, показывающие изменение содержания гумуса в целинных и залежных почвах после их вовлечения в пашню, были представлены несколько десятилетий назад (Иени, 1948; Орлов, 1981). В дальнейшем, на основании обобщения результатов длительных полевых опытов, эти схемы были конкретизированы с указанием количественных параметров изменения содержания углерода в пахотных почвах под влиянием ряда агротехнологических приемов (Шарков, 1987; Шарков, Данилова, 2010).

Ниже приведена одна из таких схем, несколько адаптированная к рассмотрению вопросов секвестрации углерода черноземами (рис. 1). На ней показано, что основные минерализационные потери $S_{\text{орг}}$ происходят в первые десятилетия после распашки целины. В дальнейшем, если отсутствует эрозия и не происходит существенных изменений в использовании почвы, потери ОВ замедляются, и его содержание постепенно приближается к равновесному (стационарному) уровню. Черноземные почвы до достижения стационарного уровня теряют в среднем около 25% $S_{\text{орг}}$. Почву, в которой достигнут такой уровень, предложено называть старопашотной (Шарков,

1997). Равновесный уровень может поддерживаться неограниченно долго за счет растительных остатков, если не будет значительных эрозионных потерь почвы.

Возможности земледельцев повышать содержание $C_{орг}$ в старопахотных почвах за счет применения агротехнологий, в том числе интенсивных, весьма ограничены. На схеме (см. рис. 1) это показано линией 2: под влиянием агротехнологий, основанных на применении минеральных удобрений и (или) минимизации обработки почвы, абсолютное увеличение содержания углерода в верхнем слое (обычно 0–25 см) составляет не более чем 0,1%.

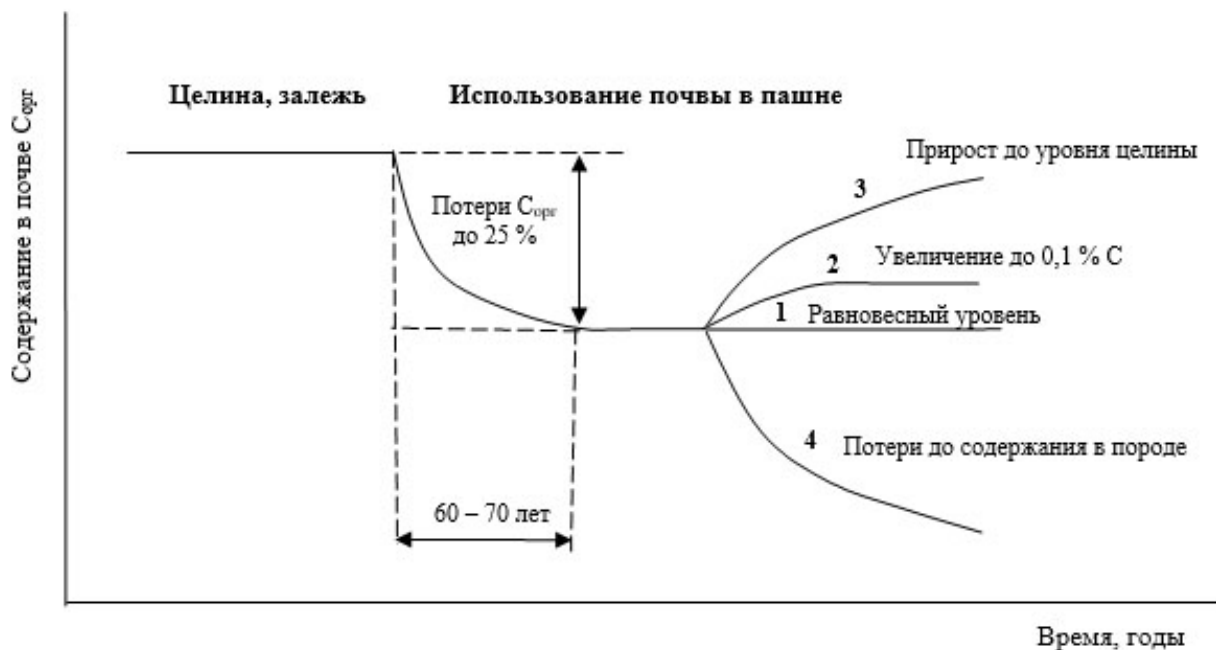


Рисунок 1. Обобщенная схема основных изменений содержания органического вещества в пахотном слое в процессе освоения и использования черноземов: 1 – при использовании почвы в пашне более 60–70 лет без значительного проявления эрозии; 2 – при применении минеральных удобрений и (или) минимизации обработки почвы; 3 – при переводе почвы в залежь; 4 – при прогрессирующей эрозии (Шарков, 2009а).

Для лесостепных пахотных незероированных черноземов, содержание углерода в которых в настоящее время, как правило, находится в пределах 3–4%, это агротехнологическое повышение содержания элемента является, в общем-то, незначительным – всего лишь 2–3% относительных. По этому поводу ранее американский агрохимик У.Б. Эндрюс (1959) замечал, что севооборот поддерживает содержание органического вещества в почве на определенном уровне, который не может быть повышен внесением зеленых удобрений, навоза или минеральных удобрений, если применять эти удобрения в экономически оправданных дозах. Такого же мнения придерживаются и некоторые другие авторы (Дебрук и др., 1981), сделавшие вывод о невозможности накопления углерода в почве за счет соломыстых и сидеральных удобрений, даже если их поступление превышает потребности почвы для поддержания бездефицитного баланса гумуса. Аналогичную позицию отстаивал и немецкий агрохимик М. Кершенс (1992).

Пахотные земли могут играть существенную роль в секвестрации атмосферного CO_2 , если их перевести в залежь (см. рис. 1). Можно ожидать, что постепенно, за многие десятилетия, будет достигнут исходный запас органического вещества, который был присущ целинной почве. Например, за первые 20 лет залужения бессменного пара на типичном черноземе в Курской области содержание гумуса увеличилось на 0,78% (прирост составлял 0,039% в год), но при этом его количество в черноземе залежи достигло только 62% от показателя в целинном аналоге (Мамонтов и др., 2020). Однако вполне понятно, что такой способ секвестрации атмосферного CO_2 может использоваться в весьма ограниченных масштабах и преимущественно на землях, которые по тем или иным причинам нецелесообразно использовать для получения сельскохозяйственной продукции.

Таким образом, под влиянием агротехнологий, основанных на применении минеральных удобрений и минимизации обработки почвы, почва способна депонировать до 0,1% С от массы верхнего слоя. По мнению исследователей (Ганжара, Васильев, 1985), минимальное повышение содержания гумуса, при котором становится заметным изменение свойств почвы, составляет 0,3% С. Однако, если 0,1% С пересчитать на 1 га, то для слоя 0–25 см массой 2500 т/га это составит примерно 2,5 т С, что, казалось бы, немало. Но, по нашему мнению, эту величину необходимо оценивать в сравнении с тем количеством углерода, которое почва уже потеряла до установления равновесного уровня содержания ОВ. Для черноземных почв оно составляет в среднем 25% от количества углерода в целинной почве (см. рис. 1), и, следовательно, при обычном содержании $S_{орг}$ в целинном черноземе 5% (около 8,5% гумуса) почва до достижения равновесного уровня содержания ОВ теряет примерно 31 т С/га. То есть, под влиянием агротехнологий почва способна вернуть обратно (секвестрировать) не более 10% углерода, утраченного в процессе освоения и использования целинных черноземов.

Заметим, что фактические величины секвестрированного углерода будут еще меньше. Дело в том, что осуществление всякой агротехнологии сопряжено с выбросами в атмосферу определенных количеств CO_2 вследствие использования горючего, а также удобрений и пестицидов, производство которых невозможно без дополнительной эмиссии CO_2 . Поэтому, как отмечено выше, ресурсосбережение в агротехнологиях, связанное с минимизацией обработки почвы, снижением энергетических затрат при уборке, сушке, подработке продукции и др., важно не только для повышения экономической эффективности растениеводства, но и для уменьшения выбросов CO_2 в атмосферу.

Почему агротехнологии, обеспечивающие ежегодное образование достаточно большого количества растительных остатков, не способны восполнить в почве ОВ, утраченное после распашки целинных почв? По мнению исследователей (Титлянова и др., 1982; 2005), основной причиной потерь органического вещества целинными почвами после вовлечения их в пашню является резкое сокращение (в три раза и более) поступления растительных остатков. Это приводит к постепенной утрате легкоминерализуемых фракций, в результате чего органическое вещество пахотных почв становится значительно более консервативным в сравнении с их целинными аналогами.

Сравнительное определение состава органического вещества чернозема выщелоченного на смежных пахотном и целинном (залежном) участках в лесостепи Новосибирского Приобья подтверждает вывод об утрате пахотными почвами, прежде всего, лабильных фракций (Шарков, 2009а). Целинный чернозем выщелоченный в слое 0–25 см в среднем содержал $S_{орг}$ в 1,1 раза, углерода подвижного гумуса – 1,2 и углерода детрита – в 3,8 раза больше в сравнении с пахотной почвой (табл. 1). При этом доля углерода детрита в составе $S_{орг}$ снизилась с 16,7% в целинной почве до 4,9% – в ее пахотном аналоге. Эти данные показывают, что содержание детрита более значительно, чем подвижного гумуса, отражало различия в составе ОВ целинных и пахотных почв.

Таблица 1

Обобщенные показатели содержания общего и лабильного органического вещества в черноземе выщелоченном (слой 0–25 см), % С от массы почвы (Шарков, 2009а)

Использование почвы, количество определений	$S_{орг}$		Детрит		Подвижный гумус		Доля в $S_{орг}$, %	
	среднее	lim	среднее	lim	среднее	lim	детрита	подвижного гумуса
Пашня под зерновыми не менее 60 лет, n = 7	3,00	2,65–3,35	0,147	0,125–0,170	0,514	0,366–0,758	4,9	17,1
Целина или многолетняя залежь, n = 7	3,37	2,65–3,85	0,563	0,319–0,845	0,634	0,471–0,967	16,7	18,8

Вероятно, еще более чувствительным сравнительным показателем консервативности органического вещества пахотных и целинных почв является содержание в них мортмассы. Так, показано (Титлянова и др. 2005), что отношение запасов углерода гумуса к углероду фитомассы и мортмассы в почвах агроценозов составляет примерно 42, а в степях и лугах – только около 15.

Другая причина недостаточной углерод-секвестрирующей способности пахотных почв связана с их слабой способностью прочно закреплять свежесформированные гумусовые вещества, что не предохраняет их от дальнейшей минерализации. Об этом свидетельствуют результаты микрополевого опыта с тотально меченой ^{14}C пшеничной соломой (Шарков и др. 2010). В этом опыте на протяжении 7 лет в слой 0–20 см чернозема выщелоченного среднесуглинистого состава ежегодно вносили измельченную солому из расчета 3, 6 и 9 т/га. Результаты опыта показывают, что уже к 5-му году опыта, независимо от дозы соломы, прирост углерода в почве практически прекращался (рис. 2). Следовательно, к этому времени устанавливалось равновесие между процессами минерализации и закрепления в почве меченого ^{14}C органического вещества. При этом максимальное накопление углерода соломы в почве при ежегодном применении ее в дозах 3, 6 и 9 т/га соответственно составило 0,08, 0,18 и 0,27% С от массы верхнего слоя.

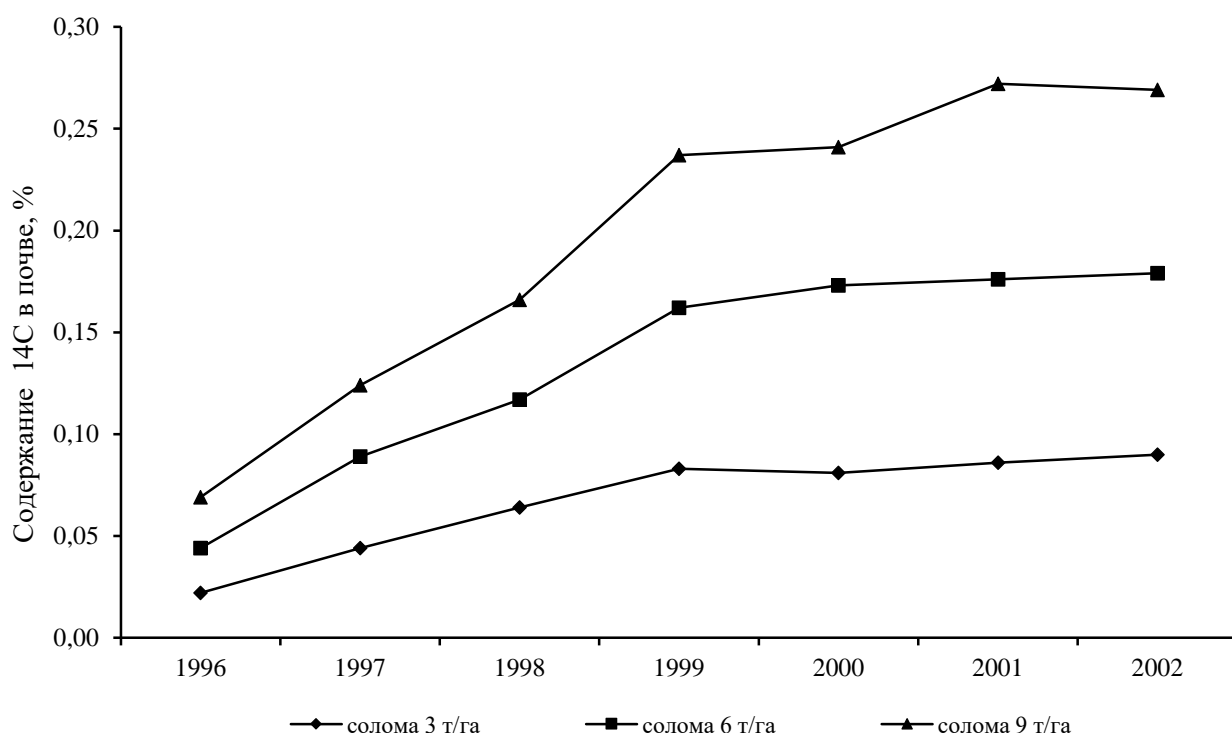


Рисунок 2. Увеличение содержания углерода в пахотном слое чернозема выщелоченного под влиянием ежегодного внесения возрастающих доз меченой ^{14}C пшеничной соломы (Шарков, 2009б).

По-видимому, способность к прочной фиксации свежесформированных гумусовых соединений является исключительной особенностью целинных (залежных) почв, точнее, тех условий, которые в них складываются. В почве, которая не нарушается механическими обработками, продукты разложения растительных остатков и свежие гумусовые вещества ежегодно осаждаются слой за слоем на поверхности почвенных частиц, создавая прочные органоминеральные комплексы. Наслаиваясь одна на другую, пленки гумусовых веществ препятствуют разрушительной деятельности микроорганизмов, в том числе, возможно, и за счет ограничения диффузии кислорода. Обрабатывая почву либо просто подвергая ее деформациям колесами транспортных средств, мы в значительной степени исключаем свойственные целинной почве условия для закрепления гумусовых веществ. В результате довольно быстро наступает момент, когда поступающего сравнительно большого количества растительного вещества становится

недостаточно, чтобы обеспечивать непрерывное накопление углерода в почве.

Относительное повышение углерод-секвестрирующей способности пахотных почв часто связывают с минимизацией их механической обработки (Шарков, 2009б; Кудеяров, 2019). Как уже говорилось (см. рис. 1), в целом под влиянием минимизации обработки содержание $C_{орг}$ в пахотной почве повышается незначительно. Оно может вообще не изменяться либо даже снижаться – это зависит от изменения под влиянием приемов обработки урожайности культур и, следовательно, поступления в почву растительной массы (Шарков, 2006). Если минимизация обработки не сопровождается увеличением поступления в почву растительного вещества, то при этом не будет происходить и дополнительное накопление в почве $C_{орг}$.

Это подтверждают результаты полевого опыта, в котором пшеницу возделывали в течение 9 лет на двух фонах зяблевой обработки: при вспашке на глубину 25–27 см и культивации на 6–8 см (Шарков и др., 2016). В одном из вариантов опыта солому пшеницы удаляли с поля, в другом – измельчали и заделывали в почву. Количество поступавшего в почву надземного растительного вещества практически не зависело от приема обработки, но при оставлении соломы на поле оно было в 4,7 раза больше (табл. 2).

Таблица 2

Среднегодовое поступление надземного растительного вещества и углерода в почву при различных приемах обработки почвы, т/га пашни (Шарков и др., 2016)

Севооборот	Вспашка		Культивация	
	сухое вещество	углерод	сухое вещество	углерод
1. Чистый пар–пшеница–пшеница (солому удаляли с поля)	0,73	0,29	0,75	0,30
2. Чистый пар–пшеница–пшеница (солому оставляли на поле)	3,41	1,36	3,32	1,33

Как показали результаты трехлетнего исследования (Антипина, 2017), гетеротрофная эмиссия CO_2 за вегетационный период определялась среднегодовым поступлением растительного вещества в почву и практически не зависела от приема зяблевой обработки (табл. 3). Следовательно, при одинаковом среднегодовом поступлении на этих фонах обработки свежего растительного вещества, депонирование углерода в почве было также близким.

Таблица 3

Потери углерода из органического вещества парующейся почвы за вегетационные периоды, кг $C-CO_2$ /га (Антипина, 2017)

Обработка почвы	Суммарные потери углерода за годы			Среднее за три года
	2011	2012	2013	
Солому удаляли с поля				
Вспашка	1602	1325	1636	1521
Поверхностная	1596	1278	1697	1524
НСР ₀₅	168	56	146	
Солому оставляли на поле				
Вспашка	2103	1742	2434	2093
Поверхностная	1971	1651	2215	1946
НСР ₀₅	105	136	216	

Таким образом, в пахотных почвах, достигших равновесного уровня содержания OB , среднегодовые гетеротрофные потери $C-CO_2$ за вегетационный период всецело определяются количеством поступающих растительных остатков и практически не зависят от степени минимизации механической обработки почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ собственных и литературных данных показал возможности пахотных почв по секвестрации атмосферного CO₂ при использовании современных агротехнологий, основанных на применении минеральных удобрений и минимизации обработки почвы. Благодаря повышению урожайности и, соответственно, количества растительных остатков эти технологии обеспечивают сравнительно небольшой абсолютный прирост C_{орг} в верхнем слое почвы – до 0,1% С. Ориентировочные оценки показывают, что для лесостепных черноземов это составляет не более 10% от количества C_{орг}, которое было потеряно ими после распашки до достижения равновесного уровня ОВ. Имеются, по крайней мере, две причины, не позволяющие с помощью агротехнологий восстановить большую часть утраченного целинными почвами органического вещества. Первая связана с резким, в три раза и более, уменьшением поступления растительной массы в пахотные почвы в сравнении с их целинными аналогами. Вследствие этого теряются, прежде всего, легкоминерализуемые фракции ОВ, что наиболее заметно по изменению содержания в почве детрита или мортмассы. Вторая причина недостаточной углерод-секвестрирующей способности пахотных почв связана с их слабой способностью прочно закреплять свежесформированные гумусовые вещества, а такое закрепление предохраняет гумусовые вещества от дальнейшей минерализации почвенными микроорганизмами. Показано, что при ежегодном внесении меченых ¹⁴C растительных остатков к пятому году опыта прирост углерода в почве прекращался благодаря установлению равновесия между процессами минерализации и закрепления в почве меченых ¹⁴C соединений. Вероятно, способность к прочной фиксации свежесформированных гумусовых веществ является исключительной особенностью целинных (залежных) почв.

Следовательно, пахотные земли могут играть существенную роль в секвестрации атмосферного CO₂ только после их перевода в залежь. Однако, по понятным причинам, такой способ секвестрации CO₂ может использоваться в весьма ограниченных масштабах, главным образом, на землях, которые по тем или иным причинам нецелесообразно использовать для получения растениеводческой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипина П.В. Влияние минимизации обработки почвы на поступление органического вещества и его минерализацию в лесостепи Западной Сибири // Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века. Сб. матер. Всерос. науч. конф. (Новосибирск, 4–8 декабря 2017 г.). Изд-во ТГУ. 2017. С. 161–165. DOI:10.17223/9785946216456/37.
2. Ганжара Н.Ф., Борисов Б.А., Шевченко А.В., Деревягин В.А. Метод определения содержания и состава мобильных форм органических веществ в почвах // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1987. Вып. 1. С. 173–177.
3. Дебрук И., Фишбек Г., Кампе В. *Зерновые культуры. Актуальные проблемы* // Пер. с нем. и предисл. В.И. Пономарева. М.: Колос, 1981. 127 с.
4. Ганжара Н.Ф., Васильев В.А. Влияние органических веществ на свойства почв и урожай // *Агрехимия*. 1985. № 2. С. 70–74.
5. Иени Г. *Факторы почвообразования* // Пер. с англ. М.: ИЛ, 1948. 347 с.
6. Кершенс М. Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота // *Почвоведение*. 1992. № 10. С. 122–131.
7. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современной земледелии России // *Агрехимия*. 2019. № 12. С. 3–15. DOI: 10.1134/S000218811912007X.
8. Мамонтов В.Г., Артемьева З.С., Лазарев В.И., Родионова Л.П., Крылов В.А., Ахмедзянова Р.Р. Сравнительная характеристика свойств целинного, пахотного и залежного чернозема типичного Курской области // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 101. С. 182–201. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-182-201.
9. Никитин Б.А. Метод определения гумуса почвы // *Агрехимия*. 1999. № 5. С. 91–93.
10. Орлов Д.С. Проблема контроля и улучшения гумусного состояния почв // *Научные доклады высшей школы. Биологические науки*. 1981. № 2. С. 9–20.
11. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. *Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения)*. Л.: Наука, 1980. 222 с.
12. Семенов В.М., Когут Б.М. *Почвенное органическое вещество*. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
13. Титлянова А. А., Кудряшова С. Я., Косых Н. П., Шибарева С. В. Биологический круговорот углерода и его изменение под влиянием деятельности человека на территории Южной Сибири // *Почвоведение*. 2005. № 10. С. 1240–1250.
14. Шарков И.Н. Удобрения и проблема гумуса в почве // *Почвоведение*. 1987. № 11. С. 70–81.

15. Шарков И.Н. *Минерализация и баланс органического вещества в почвах агроценозов Западной Сибири*. Автореф. дис. ... доктора биол. наук. Новосибирск, 1997. 37 с.
16. Шарков И.Н. *Абсорбционный метод определения эмиссии CO₂ из почв* // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ, 2005а. С. 401–407.
17. Шарков И.Н. *Изучение минерализации и баланса органического вещества в почвах агроценозов* // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ, 2005б. С. 359–376.
18. Шарков И.Н. *Минимизация обработки почвы, запас органического вещества и минерализация почвенного азота* // Роль современных технологий в устойчивом развитии АПК: матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения Т.С. Мальцева. 2006. С. 305–311.
19. Шарков И.Н. *Почвенное плодородие в свете современных представлений об органическом веществе почвы* // Агрохимические свойства почв и приемы их регулирования. IV Сибирские агрохимические Прянишниковские чтения: матер. междунар. практ. конф. (Иркутск, 16–21 июля 2007 г.) / Россельхозакадемия. Сиб. отд-ние. Новосибирск, 2009а. С. 60–72.
20. Шарков И.Н. *Минимизация обработки и ее влияние на плодородие почвы* // *Земледелие*. 2009б. № 3. С. 24–27.
21. Шарков И.Н., Данилова А.А. *Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах* // *Агрохимия*. 2010. № 12. С. 72–81.
22. Шарков И.Н., Данилова А.А., Прозоров А.С., Самохвалова Л.М., Бушмелева Т.И., Шепелев А.Г. *Воспроизводство гумуса как составная часть системы управления плодородием почвы: методическое пособие*. Россельхозакадемия. ГНУ СибНИИЗиХ. Новосибирск, 2010. 36 с.
23. Шарков И.Н., Самохвалова Л.М., Мишина П.В. *Изменения органического вещества чернозема выщелоченного при минимизации обработки в лесостепи Западной Сибири* // *Почвоведение*. 2016. № 7. С. 892–899. DOI: 10.7868/S0032180X16070091.
24. Эндриус У.Б. *Применение органических и минеральных удобрений* / Пер. с англ. М.: ИЛ., 1959. 399 с.

Поступила в редакцию 29.03.2022

Принята 27.04.2022

Опубликована 04.05.2022

Сведения об авторах:

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, руководитель Сибирского научно-исследовательского института земледелия и химизации Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий (СибНИИЗиХ СФНЦА) РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); humus3@yandex.ru

Антипина Полина Викторовна – научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института земледелия и химизации Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий (СибНИИЗиХ СФНЦА) РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); polyshka@cn.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SOME ASPECTS OF CARBON SEQUESTRATION CAPACITY OF ARABLE SOILS

© 2022 I. N. Sharkov , P. V. Antipina 

Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia, E-mail: humus3@yandex.ru

The article analyzes the possibilities of arable soils for atmospheric CO₂ sequestration by using modern agricultural technologies. Such possibilities are concluded to be very limited, as they increase the content of organic matter (OM) in the topsoil up to 0.1% C use until an OM equilibrium level is reached. For chernozems (Phaeozems) in the forest-steppe region this value accounts for not more than 10% of the soil organic carbon, lost since the soils started to be used for agricultural production till they reached equilibrium in carbon content. The reasons for the poor atmospheric carbon sequestration capacity of agricultural soils are explained, firstly, by a sharp, three-fold or more, decrease in the plant residues input to soils in comparison with undisturbed soils and, secondly, by the inability to firmly fix freshly formed humus substances: firm fixation of humus substances makes them inaccessible to soil microorganisms. It was shown that with the annual application of ¹⁴C labeled plant residues, soil carbon content stopped increasing already

by the fifth year of the experiment, which indicated the establishment of a balance between carbon mineralization and fixation of ^{14}C labeled compounds in soil. A preliminary conclusion was made that the ability to firmly fix freshly formed humus substances is an exclusive feature of undisturbed or abandoned arable soils. Arable land can play a significant role in atmospheric carbon sequestration only if abandoned after use. Such approach can be employed to a very limited extent on the lands that are not suitable any more for agricultural production.

Key words: arable soil; atmospheric CO_2 sequestration; agricultural technologies; mineral fertilizers; minimization of tillage; soil CO_2 emission

How to cite: Sharkov I.N., Antipina P.V. Some aspects of carbon sequestration capacity of arable soils // *Soils and Environment*. 2022. 5(2). e175. DOI: [10.31251/pos.v5i2.175](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Antipina P.V. Impact minimized treatment of soil on the flow of organic matter and its mineralization in conditions of forest-steppe of West Siberia. In book: Soil resources of Siberia: challenges of the XXI century. Proc. of the Rus. Sci. Conf. (Novosibirsk, 4–8 December, 2017). Tomsk: Publishing House of TSU, 2017, p. 161–165. DOI:10.17223/9785946216456/37. (in Russian)
2. Ganzhara N.F., Borisov B.A., Shevchenko A.V., Derevyagin V.A. Method for determining the content and composition of mobile forms of organic matter in soils, *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 1987, Vol. 1, p. 173–177. (in Russian)
3. Debruck I., Fishback G., Kampe W. *Cereal crops. Actual problems* / Translated from German and preface V.I. Ponomarev. Moscow: Kolos, 1981, 127 p. (in Russian)
4. Ganzhara N.F., Vasiliev V.A. Influence of organic substances on soil properties and yield, *Agrokhimia*, 1985, No. 2, p. 70–74. (in Russian)
5. Ieni G. *Factors of soil formation* / Translated from English. Moscow: IL Publ., 347 p. (in Russian)
6. Kerschens M. Significance of humus content for soil fertility and nitrogen cycle, *Pochvovedenie*, 1992, No. 10, p. 122–131. (in Russian)
7. Kuderyarov V.N. The agrobiogeochemical cycles of carbon and nitrogen of Russian croplands, *Agrokhimia*, 2019, No. 12, p. 3–15. DOI: 10.1134/S000218811912007X. (in Russian)
8. Mamontov V.G., Artemyeva Z.S., Lazarev V.I., Rodionova L.P., Krylov V.A., Ahmetzyanova R.R. Comparative characteristics of the properties of Halpic Chernozem of the Kursk Region of different land use, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, Vol. 101, p. 182–201. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-101-182-201. (in Russian)
9. Nikitin B.A. Method of determination of soil humus, *Agrokhimia*, 1999, No. 5, p. 91–93. (in Russian)
10. Orlov D.S. Problem of control and improvement of humus condition of soils, *Scientific reports of higher school. Biological Sciences*, 1981, No. 2, p. 9–20. (in Russian)
11. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Humus and soil formation (methods and results of study)*. Leningrad: Nauka Publ., 1980, 222 p. (in Russian)
12. Semenov V.M., Kogut B.M. *Soil organic matter*. Moscow: GEOS Publ., 2015, 233 p. (in Russian)
13. Titlyanova A.A., Kudryashova S.Ya., Kosykh N.P., Shibareva S.V. Biological carbon cycle and its human-induced changes in Southern Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2005, Vol. 38, No. 10, p. 1098–1107.
14. Sharkov I.N. Fertilizers and the problem of humus in soil, *Pochvovedenie*, 1987, No. 11, p. 70–81. (in Russian)
15. Sharkov I.N. *Mineralization and balance of organic matter in soils of agrocenoses of Western Siberia*, Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Novosibirsk, 1997, 37 p. (in Russian)
16. Sharkov I.N. *Absorption method of determining CO_2 emission from soils*. In book: Methods of research of soil organic matter. Moscow: Rosselkhozakademiya - GNU VNIPTIOU, 2005a, p. 401–407. (in Russian)
17. Sharkov I.N. *The study of mineralization and balance of organic matter in soils of agrocenoses*. In book: Methods of research of organic matter of soils. Moscow: Rosselkhozakademiya - GNU VNIPTIOU, 2005b. p. 359–376. (in Russian)
18. Sharkov I.N. *Minimization of tillage, organic matter stock and mineralization of soil nitrogen*. In book: The role of modern technologies in the sustainable development of agriculture: Mater. Intern. Sci. and Prac. Conf., 2006, p. 305–311. (in Russian)
19. Sharkov I.N. *Soil fertility in the light of modern concepts of soil organic matter*. In book: Agrochemical properties of soils and methods of their regulation. IV Siberian agrochemical Pryanishnikov readings: Mater. Intern. Sci. and Prac. Conf. (Irkutsk, July 16-21, 2007) / Rosselkhozakademiya. Siberian Branch. Novosibirsk, 2009a, p. 60–72. (in Russian)
20. Sharkov I.N. Minimization of soil cultivation and it's influence on fertility, *Zemledelie*, 2009b, No. 3, p. 24–27. (in Russian)
21. Sharkov I.N., Danilova A.A. Effect of different agricultural technologies on soil organic matter content, *Agrokhimia*, 2010, No. 12, p. 72–81. (in Russian)

22. Sharkov I.N., Danilova A.A., Prozorov A.S., Samokhvalova L.M., Bushmeleva T.I., Shepelev A.G. *Reproduction of humus as a component of soil fertility management system: a manual*. SibNIIZhiH. Novosibirsk, 2010. 36 p. (in Russian)
23. Sharkov I.N., Samokhvalova L.M., Mishina P.V. Transformation of soil organic matter in leached Chernozems under minimized treatment in the forest-steppe of West Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 49, No. 7, p. 824–830.
24. Andrews U.B. Application of organic and mineral fertilizers / Translated from English. Moscow: IL Publ., 1959, 399 p. (in Russian)

Received 29 March 2022

Accepted 27 April 2022

Published 04 May 2022

About the authors:

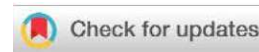
Sharkov Ivan Nikolaevich – Doctor of Biological Sciences, Head of the Siberian Research Institute of Agriculture and Agricultural Chemization of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia); humus3@yandex.ru

Antipina Polina Viktorovna – Researcher of the Siberian Research Institute of Agriculture and Agricultural Chemization of the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia); polyshka@cn.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ БОЛОТНЫХ И ТРАВЯНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ШИРОТНОМУ ГРАДИЕНТУ

© 2022 А. А. Титлянова , Е. К. Вишнякова 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: argenta@issa-siberia.ru

Цель исследования: анализ изменения продуктивности экосистем кустарничково-мохово-лишайниковых, сосново-кустарничково-сфагновых, осоково-сфагновых и травяных болот вдоль широтного градиента.

Методология. Для ряда болотных и травяных экосистем, лежащих на широтном градиенте от 65 до 50° с.ш. и расположенных в интервале долгот от 63 до 95° в.д., рассмотрены величины запасов живой и мертвой, надземной и подземной фитомассы, а также величины надземной (ANP), подземной (BNP) и общей продукции (NPP). Данные приведены для 45 экосистем, сгруппированных в 12 типов от болот лесотундры до опустыненных степей. Растительность экосистем меняется от болотной (мхи, кустарнички и травы) до степной (мезоксерофитные и ксерофитные травы). Приведены усредненные данные для разных типов экосистем.

Основные результаты. Наибольший запас зеленой фитомассы характерен для пойменных лугов (7 т/га), наименьший – для опустыненных степей (0,8 т/га). Запас мертвой надземной фитомассы максимален в низинных болотах лесостепной зоны (10 т/га) и минимален в олиготрофных мочажинах бореальных болот (0,3 т/га). Запас живых подземных органов понижается вдоль широтного градиента от 20 (настоящие степи) до 3 т/га (опустыненные степи), мертвых подземных органов – от 79 (травяные болота лесостепной зоны) до 4 т/га (в рьях средней тайги и опустыненных степях). Надземная продукция наиболее высока в травяных болотах лесостепной зоны (12 т/га в год) и снижается по широтному градиенту вплоть до опустыненных степей (1 т/га в год). Подземная продукция во всех изученных типах экосистем выше надземной и варьирует от 45 (травяные болота лесостепной зоны) до 3 т/га в год (болота в лесотундре). Величина NPP в ряде рассмотренных экосистем изменяется от 57 (травяные болота лесостепной зоны) до 5 т/га в год (болота в лесотундре). Отношение BNP/ANP максимально в опустыненных степях (5,9) и минимально в пойменных лугах (1,9). В интервале широт 56–52° с.ш. находятся экосистемы остепненных лугов, луговых и настоящих степей. Усредненные величины чистой первичной продукции для этих экосистем меняются незначительно – от 22 до 24 т/га в год. В этих же экосистемах формируются наиболее плодородные для данного региона почвы – лугово-черноземные и черноземы обыкновенные. На север и на юг от данной области величина NPP снижается: на север вследствие недостатка тепла, на юг вследствие недостатка влаги.

Заключение. В биотическом круговороте болота отличаются от лугов и степей ежегодным закреплением части входного потока углерода (около 10% от NPP болотной экосистемы) в образующемся торфе. В климатических травяных экосистемах входной поток углерода равен его выходному потоку. Эти экосистемы представляют собой механизм громадного газообмена между почвенно-растительным покровом и атмосферой. Болотные экосистемы в отличие от травяных (не болотных) являются накопителями углерода, понижающими содержание CO₂ в воздухе.

Ключевые слова: запасы растительного вещества; чистая первичная продукция; тайга; луга; степи

Цитирование: Титлянова А.А., Вишнякова Е.К. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e176. DOI: [10.31251/pos.v5i2.176](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.176)

ВВЕДЕНИЕ

Продукционный процесс стоит в центре потоков вещества и энергии и обеспечивает жизнь на планете Земля. Что создает продукционный процесс? Это ежегодно образующаяся фитомасса тундр, лесов, лугов, степей и пустынь. Интенсивность продукционного процесса измеряется его производительностью, которая называется чистой первичной продукцией. Оценка продукции естественных экосистем показывает максимальную меру ежегодного создания фитомассы без нарушения экосистемы. Первичный продукционный процесс создает зеленые растения, потребляющие солнечную энергию, двуокись углерода и воду из атмосферы, воду и питательные элементы из почвы. В травяных экосистемах в течение вегетационного сезона и в конце его

надземная и частично подземная фитомасса отмирают, образуется мертвое растительное вещество (подстилка, мертвые подземные органы растений). Растительные остатки со временем минерализуются с выделением двуокси углерода и воды. Часть растительных остатков гумифицируется и поступает в почвенное органическое вещество.

По-другому развиваются процессы в болотных экосистемах. Основная масса ежегодного прироста растений переходит в мортмассу, которая в основном минерализуется, но небольшая часть ее закрепляется в экосистеме в виде торфа. В большей части болотных экосистем нет равновесия. Ежегодное потребление углерода (CO₂) растительностью больше, чем эмиссия CO₂ в атмосферу. Существуют ежегодные колебания интенсивности продукционно-деструкционных процессов. То прирост фитомассы больше интенсивности минерализации мортмассы, то интенсивность минерализации больше прироста. Для получения средних величин продукции и минерализации в травяных экосистемах требуется 5–10 лет наблюдений, в болотных экосистемах – еще больше.

Таким образом, целью нашего исследования было проанализировать изменения продуктивности экосистем кустарничково-мохово-лишайниковых, сосново-кустарничково-сфагновых, осоково-сфагновых и травяных болот вдоль широтного градиента.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрены запасы растительного вещества и чистая первичная продукция болотных, луговых и степных экосистем, лежащих в пределах 65–50° с.ш. (от лесотундры до опустыненных степей) и 63–95° в.д. (от Зауралья до Енисея).

Растительный покров в лесотундре представлен лиственничными, березовыми редколесьями и плоскобугристыми болотами. Объектами исследования в лесотундре являлись плоскобугристые болотные комплексы, включающие плоские мерзлые бугры, олиготрофные и мезотрофные мочажины. Бугры приподняты над уровнем мочагин на 30–50 см. Глубина протаивания торфа на буграх в конце лета колеблется от 30 до 50 см. Уровень залегания болотных вод в мочажинах варьирует от 0 до 15 см. Заболоченность лесотундры в среднем 27% (Kosykh et al., 2008b).

На буграх развиты кустарничково-лишайниковые и кустарничково-сфагново-лишайниковые растительные сообщества. Преобладающими видами являются *Ledum palustre* и *Cladonia sp.* Олиготрофные мочажины заняты осоково-сфагновыми и пушицево-сфагновыми сообществами. Травяной ярус представлен *Eriophorum russeolum* и *Carex rotundata*. В моховом покрове доминирует *Sphagnum balticum*. Мезотрофные мочажины занимают небольшие площади в плоскобугристых комплексах, характеризуются высоким и густым травостоем из *Carex rostrata* и *Eriophorum angustifolium*. Виды сфагновых мхов с преобладанием *Sphagnum lindbergii* (Kosykh et al., 2021).

В северной тайге исходная растительность представлена елово-пихтовыми лесами с участием кедра, вторичная – березово-осиновыми лесами. Болота занимают около 30% территории, больше половины болот приходится на плоскобугристые болота (Peregon et al., 2008). От лесотундровых болот они отличаются высотой бугров, достигающей 1 м. Растительность бугров и мочагин сходна с растительностью данных элементов рельефа в лесотундре.

В средней и южной тайге основная территория занята темнохвойными лесами. Болотные комплексы занимают 32–34% территории (Kosykh et al., 2008b). Болота средней и южной тайги похожи и по элементам рельефа и по растительности. Обширные водораздельные олиготрофные болотные массивы включают в себя рямы, грядово-мочажинно-озерковые, грядово-мочажинные комплексы и мезотрофные мочажины. В настоящей статье приведены оценки продуктивности для следующих элементов рельефа болот: рямов, гряд, олиготрофных и мезотрофных мочагин. Рямы и гряды – повышенные элементы рельефа, мочажины – пониженные.

Рям представлен сосново-кустарничково-сфагновым сообществом. Древесный ярус состоит из низких сосен с небольшой примесью кедра. Микрорельеф хорошо выражен: кочки высотой до 30 см и диаметром до 1,5 м занимают 50% площади ряма. Кочки покрыты кустарничками *Chamaedaphne calyculata*, *Ledum palustre*, *Andromeda polifolia* и *Vaccinium uliginosum*. Доминантом мохового яруса является *Sphagnum fuscum*. Уровень болотных вод большую часть вегетационного периода колеблется в пределах 20–40 см ниже мохового покрова в межкочьях (Косых и др., 2003).

Гряды в грядово-мочажинном комплексе возвышаются над уровнем мочагин на 20–30 см. Соотношение гряд и мочагин варьирует, но в среднем они занимают примерно равные площади.

Растительность гряд очень похожа на растительность рьяма, но находится в более угнетенном состоянии. Уровень болотных вод колеблется в пределах от 20 до 30 см ниже мохового покрова.

В олиготрофных мочажинах преобладающим сообществом является шейхцириево-сфагновое. Доминант – *Scheuchzeria palustris*, моховой покров сложен *Sphagnum balticum* и *S. papillosum*. Уровень болотной воды – на глубине 5–10 см. Осоково-сфагновые мезотрофные мочажины представляют собой ложбины стока, по которым происходит сброс болотных вод со склонов в озера и ручьи. В мезотрофных мочажинах преобладают крупные осоки (*Carex rostrata* и *C. lasiocarpa*), встречаются *Menyanthes trifoliata*, *C. limosa*, *Rhynchospora alba* и *Scheuchzeria palustris*. Моховой покров отличается рыхлым сложением и обычно состоит из *Sphagnum lindbergii* и *S. fallax* (Косых и др., 2017).

Травяные болота в лесостепной зоне Западной Сибири многочисленны, но не занимают больших площадей. Они приурочены к аккумулятивным позициям рельефа, часто к глубоким впадинам. Почвы торфяно- или торфянисто-болотные. Растительность травяных болот представлена *Phragmites communis*, *Calamagrostis neglecta*, *Scolochloa festucaceae*, *Carex gracilis*.

Экосистемами, наиболее близкими к травяным болотам, являются луга, которые по степени увлажнения ранжируются от заболоченных до остепненных. Луга распространены в лесной, лесостепной и степной зонах. Различают луга пойменные, материковые, и горные. Пойменные луга характерны для долин рек, заливаемых во время половодий. Доминантами пойменных лугов являются *Agrostis gigantea*, *Trifolium repens*, *Poa pratensis*, *Festuca pratensis* и *Carex sp.* Материковые луга расположены на равнинах (вне пойм) и делятся на суходольные и низинные. Растительность материковых лугов обычно представлена *Calamagrostis sp.*, *Poa sp.*, *Alopecurus ventricosus* и *Medicago falcata*. Почвы черноземно-луговые и лугово-черноземные, в степной зоне часто в некоторой степени засоленные.

Остепненные луга характеризуются преобладанием ксеромезофитных луговых корневищных злаков и многочисленных видов разнотравья (*Calamagrostis epigeios*, *Stipa pennata*, *Poa angustifolia*, *Festuca valesiaca*, *Phlomis tuberosa*, *Lathyrus sp.*). Почвы – лугово-черноземные и черноземы обыкновенные (Вагина и др., 1974).

Луговые степи более ксерофильны по сравнению с остепненными лугами. Ранее они были широко представлены в Западной Сибири, в настоящее время сохранились лишь отдельными массивами. Доминантами луговых степей являются *Stipa pennata*, *S. capillata*, *Poa angustifolia*, *Phleum phleoides*, *Bromopsis inermis*, *Carex precox*. Почвы под ними – черноземы обыкновенные, выщелоченные и солонцеватые.

Настоящие степи распространены на юге Западной Сибири и в Казахстане, где они ранее занимали большие площади. Эти разнотравно-дерновинно-злаковые степи подразделяются на умеренно засушливые и засушливые. В травостое умеренно засушливых степей преобладают *Stipa lessingiana*, *S. rubens*, *Helictotrichon desertorum*. Доминантами засушливых степей являются *Stipa lessingiana* и *Festuca valesiaca*. Настоящие степи расположены обычно на обыкновенных, южных черноземах и темно-каштановых почвах.

Сухие степи образованы дерновинными злаками и полукустарничками. Основу травостоя составляют *Stipa sp.*, *Festuca sp.*, *Koeleria cristata*, *Cleistogenes squarrosa* и *Artemisia frigida*. Сухие степи приурочены к каштановым почвам как тяжелого, так и легкого механического состава.

Наиболее ксерофитным вариантом степей являются опустыненные степи, расположенные на светло-каштановых почвах. Для этих степей характерны следующие доминанты: *Stipa glareosa*, *Cleistogenes squarrosa*, *Artemisia frigida*, *Nanophyton erinaceum*. Эти степи отличаются очень низкими величинами запаса и продукции надземной фитомассы (Титлянова, Шибарева, 2017).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обозначения. Обозначим фракции фитомассы определенными символами. Зеленая фитомасса – G , максимальная – G_{max} ; живые нефотосинтезирующие ветви кустарничков и древесина деревьев – W ; сухая, стоящая на корню трава и сухостой кустарничков – ветошь, D ; мертвые органы растений, лежащие на почве или на моховом покрове, – подстилка, L ; живые корни и корневища трав и кустарничков, стволы кустарничков, расположенные ниже поверхности мха, – B ; подземная мортмасса, состоящая из мертвых подземных органов трав и кустарничков, очеса, – V . Очес – это отмершие части мхов и лишайников, еще сохранившие связь с живой частью растения. Во фракцию V не включен торф, поскольку его относят к торфяно-болотной почве. Все величины данного ряда имеют размерность т/га или г/м² (с указанием

глубины отбора образцов). Эти величины косвенно характеризуют продукционный процесс. Чистая первичная продукция *NPP* (*net primary production*) состоит из двух частей: *ANP* (*above-ground production*) – надземная продукция и *BNP* (*below-ground production*) – подземная продукция. Величина продукции измеряется в г/м² в год или т/га в год, либо в углероде, либо в абсолютно сухом веществе.

Полевые методы. Методы определения запасов растительного вещества и оценки *ANP* и *BNP* в травяных экосистемах многократно описаны и приведены ранее в изданиях (Базилевич и др., 1978; Титлянова, Шибарева, 2020).

При работе на всех болотных участках применяли одну и ту же методику отбора образцов фитомассы (Косых и др., 2003; Kosykh et al., 2008a). В результатах приведены средние данные за шесть лет наблюдений. В лесотундре и северной тайге было заложено по одному ключевому участку, который включал три пробные площади: на бугре, в олиготрофной мочажине и в мезотрофной мочажине. На пробной площади размером 10×10 м, проводили полное описание растительности. В пределах пробной площади закладывали по 10 площадок размером 40×40 см. С площадки срезалась фитомасса на уровне мохово-лишайникового покрова. В центре площадки вырезали колонку размером 10×10 см до глубины 30 см, и разделяли ее на слои 0–10, 10–20 и 20–30 см. В лабораторных условиях отобранные образцы разделяли на следующие фракции: фотосинтезирующие части трав, кустарничков, мхов (головки и стебли), лишайников; однолетние, многолетние побеги кустарничков; живые и мертвые органы трав и кустарничков; очес; торф. Всю зеленую часть мхов независимо от глубины считали живой (*G*). Очес отнесли к мортмассе (*V*). Все фракции высушивали при температуре 60 °С и взвешивали. Таким образом, были определены запасы фитомассы и мортмассы растений.

На основании полученных данных рассчитывали величины продукции. Чистая первичная продукция складывается из надземной продукции трав, кустарничков и мхов и продукции подземных органов трав и кустарничков. За надземную продукцию трав принимали максимальный запас зеленой фитомассы. Надземная продукция кустарничков состоит из фитомассы побегов текущего года с растущими на них листьями и прироста стволиков. Прирост стволиков кустарничков принимали равным 0,1 от их запаса, следуя Н.И. Базилевич (1993). Продукцию сфагновых мхов определяли по методике «индивидуальных меток» (Косых, 1999). Подземную продукцию трав и кустарничков оценивали по приросту текущего года корней, корневищ и узлов кущения (Косых и др., 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как указывалось выше, продуктивность – сложное понятие, характеризующееся двумя параметрами: запасом фитомассы и продукцией. В таблице 1 приведены значения этих показателей для болот лесотундры, северной, средней, южной тайги и лесостепи.

В лесотундре самый большой запас зеленой фитомассы характерен для олиготрофных мочажин. Ветошь и подстилка в наибольшей степени накапливаются в мезотрофных мочажинах. Максимальный запас живых и мертвых подземных органов установлен для мезотрофных мочажин. Таким образом, распределение запасов фитомассы по элементам рельефа отражает условия роста растений. Рост растений максимален при повышении концентрации питательных элементов (мезотрофные мочажины) (Kosykh et al., 2021). Соотношение между массой живых и мертвых подземных органов растений меняется в зависимости от элементов рельефа. На буграх масса живых подземных органов больше массы мертвых, в мочажинах запас мертвых органов больше, чем живых. В лесотундре на различных элементах рельефа величина общей продукции меняется от 5 до 8 т/га в год. Величина *NPP* минимальна на буграх и максимальна в мезотрофных мочажинах. На буграх подземная продукция больше надземной почти в два раза. В надземном ярусе половину продукции дают мхи и лишайники, в подземном она целиком приходится на корни и корневища трав и кустарничков, дающие достаточно высокую продукцию.

В олиготрофных мочажинах величины надземной и подземной продукции практически одинаковы, при этом сложение надземной и подземной продукции различно. Первая на 90% образована сфагновыми мхами, подземная – исключительно травами. В мезотрофных мочажинах самая высокая продукция, при этом *BNP* составляет 65% от *NPP* сообщества. Надземная продукция в основном образована за счет мхов. Величина подземной продукции в ряду бугор – олиготрофная мочажина – мезотрофная мочажина нарастает за счет увеличения обилия трав.

Таблица 1

Запасы и чистая первичная продукция болот (глубина взятия образца – см; запасы – т/га; продукция – т/га в год)

Местоположение, тип болота, координаты	Характеристика экосистемы	Тип использования	Почва (глубина взятия образца)	G_{max}	W	$D+L$	B	V	ANP	BNP	NPP	Литературный источник
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Лесотундра												
ЯНАО, Пангоды, плоскобугристое болото, 65° с.ш., 75° в.д.	Бугры	Олень пастбище, умеренный выпас	Торфяная олиготрофная мерзлотная (0–30)	4,8±0,3	1,1±0,1	0,7±0,3	12,4±1,1	6,7±0,9	1,6±0,1	3,2±0,2	4,8±0,4	Kosykh et al., 2021
	Олиготрофные мочажины	Заповеданы	Торфяная олиготрофная (0–30)	5,6±0,3	0,0	0,3±0,1	5,3±0,6	7,2±1,3	2,6±0,1	2,8±0,3	5,3±0,3	
	Мезотрофные мочажины	«	Торфяная мезотрофная (0–30)	5,3±0,6	0,0	1,0±0,1	17,1±3,1	19,6±1,7	2,7±0,1	5,1±1,5	7,8±1,5	
Северная тайга												
ЯНАО, Ноябрьск, плоскобугристое болото, 63° с.ш., 76° в.д.	Бугры	Олень пастбище, умеренный выпас	Торфяная олиготрофная мерзлотная (0–30)	8,0±0,8	0,6±0,0	0,3±0,1	10,9±0,9	5,0±0,9	3,6±0,4	3,4±0,2	7,0±0,5	Kosykh et al., 2021
	Олиготрофные мочажины	Заповеданы	Торфяная олиготрофная (0–30)	4,6±0,3	0,0	0,2±0,0	4,8±0,5	5,4±0,5	2,3±0,2	3,2±0,4	5,5±0,5	
	Мезотрофные мочажины	«	Торфяная мезотрофная (0–30)	4,1±0,3	0,0	0,8±0,1	14,6±2,1	11,2±0,9	2,8±0,2	8,1±0,4	10,9±0,5	
Средняя тайга												
ХМАО, Ханты-Мансийск, выпуклое олиготрофное болото, 61° с.ш., 70° в.д.	Гряды	Заповеданы	Торфяная олиготрофная (0–30)	4,2±0,2	1,2±0,1	0,9±0,1	10,4±0,4	4,8±1,0	2,7±0,1	3,2±0,2	5,9±0,2	Kosykh et al., 2008b
	Рямы	«	Торфяная олиготрофная (0–30)	4,9±0,2	1,4±0,1	1,0±0,1	10,1±0,5	4,0±0,4	2,8±0,1	3,4±0,2	6,2±0,2	
	Олиготрофные мочажины	«	Торфяная олиготрофная (0–30)	4,4±0,3	0,1±0,0	0,2±0,0	7,7±0,8	11,1±0,9	2,9±0,2	3,8±0,5	6,7±0,5	
	Мезотрофные мочажины	«	Торфяная олиготрофная (0–30)	5,0±0,4	0,1±0,0	0,6±0,1	12,5±1,0	24,1±1,2	3,0±0,3	6,3±0,6	9,3±0,6	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Южная тайга												
Томская область, Плотниково, выпуклое олиготрофное болото, 57° с.ш., 82° в.д.	Гряды	Заповеданы	Торфяная олиготрофная (0–30)	6,2±0,7	1,1±0,1	0,7±0,1	9,0±0,9	16,0±1,0	4,4±0,5	7,4±0,7	11,8±2,0	Косых и др., 2003
	Рямы	«	Торфяная олиготрофная (0–30)	7,0±0,8	2,3±0,5	1,0±0,1	13,0±1,1	17,7±1,1	3,4±0,3	7,1±0,6	10,5±0,5	
	Олиготрофные мочажины	«	Торфяная олиготрофная (0–30)	5,1±0,5	0,5±0,1	0,2±0,0	4,2±0,4	9,5±0,6	2,7±0,2	5,0±0,5	7,7±0,8	
	Мезотрофные мочажины	«	Торфяная олиготрофная (0–30)	5,2±0,3	0,2±0,1	0,6±0,1	11,7±1,0	22,3±2,1	2,8±0,3	8,0±1,2	10,8±1,0	
Лесостепь												
Красноярский край, Назарово, 56° с.ш., 90° в.д.	Низинное ла- базниково-осо- ковое болото (днище лога)	Заповедано	Торфяно-болотная иловатая слоистая (0–20)	8,6	–	14,7	7,8	70,8	11,2	23,4	34,6	Снытко и др., 1988
НСО, Карачи, 54° с.ш., 75° в.д.	Осоково-свет- лухово-вейни- ковое болото	«	Торфяно-болотная слабосолончаковатая (0–60)	4,7	–	5,7	25,2	87,3	11,8	67,0	78,8	Вагина, Шатохина, 1976

Таблица 2

Запасы и чистая первичная продукция лугов (глубина взятия образца – см; запасы – т/га; продукция – т/га в год)

Местоположение, координаты	Характеристика экосистемы	Тип использования	Почва (глубина взятия образца)	G_{max}	$D+L$	B	V	ANP	BNP	NPP	Литературный источник
Тайга											
Томская обл., 58° с.ш., 82° в.д.	Пойменный луг в элювиальной позиции	Заповедан	Аллювиальная луговая (0–20)	6,4	2,8	8,7	12,1	8,5	10,9	19,4	Титлянова и др., 1994
	Пойменный луг в транзитной позиции	«	Аллювиальная луговая глеевая (0–20)	6,3	4,3	14,1	12,6	9,1	15,6	24,7	
	Пойменный луг в аккумулятивной позиции	«	Лугово-болотная (0–20)	8,5	3,3	15,8	16,0	11,0	18,0	29,0	
Лесостепь											
Красноярский край, Назарово, 56° с.ш., 90° в.д.	Пойменный луг	Заповедан	Аллювиальная луговая карбонатная (0–20)	2,7	2,7	10,4	14,9	5,0	19,4	24,4	Снытко и др., 1988
Красноярский край, Березовский участок, 55° с.ш., 86° в.д.	Лесной низинный луг	«	Темно-серая лесная контактно-луговая глубококовскипающая тяжелосуглинистая на двучленных отложениях (0–20)	4,0	1,9	7,0	11,8	4,9	14,0	18,9	«
Красноярский край, Березовский участок, 55° с.ш., 86° в.д.	Настоящий низинный луг	«	Лугово-черноземная мощная среднесуглинистая (0–20)	6,7	2,9	8,2	22,7	9,3	21,0	30,3	«
НСО, Карачи, 54° с.ш., 75° в.д.	Суходольный вейниковый луг (верхняя часть склона гривы)	«	Черноземно-луговая солонцевато-солончакватая (0–50)	2,4	4,2	15,3	8,0	4,4	23,6	28,0	Титлянова, 1977
	Увлажненный луг (средняя часть склона гривы)	«	Луговая осолодевшая солонцевато-солончакватая (0–60)	2,6	3,6	11,5	34,7	4,1	22,0	26,1	Вагина, Шатохина, 1976
Степь											
Казахстан, Шортанды, 52° с.ш., 71° в.д.	Увлажненный луг	Заповедан	Лугово-болотная (0–50)	2,4	2,1	21,9	26,7	3,7	26,3	30,0	Мордкович и др., 1985

Таблица 3

Запасы и чистая первичная продукция остепненных лугов и луговых степей (глубина взятия образца – см; запасы – т/га; продукция – т/га в год)

Местоположение, координаты	Характеристика экосистемы	Тип использования	Почва, глубина взятия образца	G_{max}	$D+L$	B	V	ANP	BNP	NPP	Литературный источник
Остепненные луга											
Красноярский край, Назарово, 56° с.ш., 90° в.д.	Полынно-ковыльный	Заповедан	Лугово-черноземная (0–20)	3,6	4,2	11,4	7,1	5,3	9,9	15,2	Титлянова и др., 1993
НСО, Карачи, 54° с.ш., 75° в.д.	Типчаково-вейниковый	«	Лугово-степной глубо-костолбчатый солонец (0–60)	2,0	3,3	16,8	8,8	4,2	20,3	24,5	Шатохина, Вагина, 1976
НСО, Приобье, 54° с.ш., 83° в.д.	Злаково-разнотравный	«	Лугово-черноземная (0–60)	3,5	5,4	18,6	26,0	6,1	18,4	24,5	Шатохина, 1988
Казахстан, Шортанды, 52° с.ш., 71° в.д.	Разнотравно-ковыльно-типчаковый	«	Черноземно-луговая (0–50)	1,7	3,9	20,0	24,6	3,7	24,1	27,8	Мордкович и др., 1985
Луговые степи											
Красноярский край, Назарово, 56° с.ш., 90° в.д.	Осоково-злаковая	Заповедана	Чернозем обыкновен-ный луговатый мощ-ный (0–20)	4,5	3,1	8,0	12,1	7,5	15,3	22,8	Снытко и др., 1988
Зауралье, Шадринский р-н, 56° с.ш., 63° в.д.	Злаково-разнотравная	«	Чернозем выщелочен-ный (0–50)	3,3	2,3	15,5	7,0	4,8	15,2	20,0	Титлянова, Шибарева, 2017
НСО, Карачи, 54° с.ш., 75° в.д.	Разнотравно-бобово-злаковая (вершина гривы)	«	Чернозем обыкновенный (0–60)	3,1	2,8	15,2	8,5	3,6	18,3	21,9	Титлянова, Шатохина, 1976
Тува, Турано-Уюкская котловина, 52° с.ш., 93° в.д.	Ковыльно-кострецовая	«	Чернозем обыкновен-ный (0–40)	1,6	2,5	16,7	25,7	1,9	21,7	23,6	Титлянова, Самбуу, 2016

Таблица 4

Запасы и чистая первичная продукция настоящих, сухих и опустыненных степей (глубина взятия образца – см; запасы – т/га; продукция – т/га в год)

Местоположение, координаты	Характеристика экосистемы	Тип использования	Почва, глубина взятия образца	G_{max}	$D+L$	B	V	ANP	BNP	NPP	Литературный источник
Настоящие степи											
Казахстан, Петропавловская обл., 54° с.ш., 69° в.д.	Разнотравно-дерновинно-злаковая (умеренно засушливая)	Заповедана	Чернозем обыкновенный (0–50)	2,5	3,5	24,2	17,6	4,4	25,7	30,1	Титлянова, Шибарева, 2017
Хакасия, Шушенское, 53° с.ш., 91° в.д.	Осоково-овсецово-тырсовая (умеренно засушливая)	«	Чернозем южный солонцеватый (0–20)	1,9	1,7	18,2	19,7	3,6	11,6	15,2	Хакимзянова, 1988
Казахстан, Шортанды, 52° с.ш., 70° в.д.	Разнотравно-красноковыльно-ковылковая (умеренно засушливая)	«	Лугово-черноземная (0–50)	1,4	4,7	22,0	14,9	3,8	23,1	26,9	Мордкович и др., 1985
	Типчаково-ковылковая (засушливая)	«	Чернозем южный карбонатный (0–50)	1,2	4,5	18,3	14,9	3,5	19,9	23,4	
Тува, Тувинская котловина, 51° с.ш., 94° в.д.	Злаково-разнотравная с <i>Carragana pugnata</i> (засушливая)	«	Чернозем южный (0–40)	2,4	3,9	15,0	22,0	4,7	19,4	24,1	Титлянова, Самбуу, 2016
Сухие степи											
Алтайский край, 52° с.ш., 82° в.д.	Полынно-разнотравно-злаковая	Заповедана	Каштановая	1,6	1,5	5,4	4,9	2,3	5,2	7,5	Базилевич, 1993
Казахстан, Коргалжынский р-н, 50° с.ш., 70° в.д.	Типчаково-ковылковая	«	Каштановая (0–40)	0,7	3,2	15,6	13,6	1,8	14,0	15,8	Титлянова, 1988
Казахстан, Коргалжынский р-н, 50° с.ш., 70° в.д.	Злаково-полынная	Пастбище с легкой нагрузкой	Каштановая солонцеватая	0,6	1,3	5,5	6,3	0,7	5,4	6,1	Базилевич, 1993
Тува, Ончаалан, 50° с.ш., 95° в.д.	Змеевко-полынно-ковыльная	Зимнее пастбище с умеренным выпасом	Каштановая щебнисто-песчаная (0–20)	1,0	2,5	10,8	17,8	2,2	12,0	14,2	Титлянова и др., 2020
Тува, Чоогей, 50° с.ш., 95° в.д.	Осоково-житняково-ковыльная	Пастбище со сменой пастбищной нагрузки	Каштановая суглинистая (0–20)	1,1	2,0	11,1	18,2	1,4	12,0	13,4	«
Опустыненные степи											
Тува, Убсунурская котловина, 50° с.ш., 93° в.д.	Разнотравно-змеевковая	Пастбище с сильной нагрузкой	Светло-каштановая щебнистая (0–10)	0,7	0,5	3,3	4,0	1,0	5,8	6,8	Титлянова и др., 2020
Тува, Убсунурская котловина, окр. оз. Тере-Холь, 50° с.ш., 93° в.д.	Нанофитоновая	«	Светло-каштановая супесчаная (0–20)	0,8	1,2	3,5	10,0	1,4	8,4	9,8	Титлянова, Шибарева, 2020

В северной тайге самый большой запас зеленой фитомассы характерен для бугров в связи с очень высокой фитомассой мхов и лишайников (6,4 т/га). Как и в лесотундре, наибольшее накопление ветоши, подстилки, живых и мертвых подземных органов растений установлено для мезотрофных мочажин. Запасы зеленой фитомассы в олиготрофных и мезотрофных мочажинах почти одинаковы и в два раза меньше, чем на бугре. В олиготрофной мочажине надземная фитомасса на 95% сложена мхами. В мезотрофной мочажине доля мхов снижается до 55%, доля трав достигает 40% (см. табл. 1). Чистая первичная продукция на буграх и в мезотрофных мочажинах выше, чем в лесотундре, в олиготрофных мочажинах лесотундры и северной тайги продукция одинакова. В северной тайге *NPP* меняется от 6 (олиготрофная мочажина) до 11 т/га в год (мезотрофная мочажина). Надземная продукция на буграх на 80% состоит из прироста мхов и лишайников, в олиготрофных мочажинах на 90% – из мхов. В мезотрофных мочажинах резко возрастает роль трав, на их долю приходится 60% *ANP*.

По одним показателям болота лесотундры и северной тайги сильно различаются, по другим – почти одинаковы. Надземная продукция на буграх в северной тайге в два раза выше, чем в лесотундре. Величины *ANP* мочажин в лесотундре и северной тайге близки. Подземная продукция, сложенная корнями и корневищами трав и кустарничков, на буграх и в олиготрофных мочажинах лесотундры и северной тайги почти одинакова. В мезотрофных мочажинах величина *BNP* выше в северной тайге.

На болотах средней тайги выделено четыре основных элемента рельефа: рям, гряда, олиготрофная и мезотрофная мочажины. Отличительной чертой болот средней, как и южной, тайги от северной является отсутствие мерзлоты и залесенность рямов и гряд. Запасы фитомассы и продукция древесного яруса, представленного в основном соснами, даны в таблице 5. Исследования показали, что запасы хвои, древесины и веток в ряме и на грядах практически одинаковы. Величины *ANP* и *BNP* древостоев для этих двух экосистем близки. Деревья вносят большой вклад в общую фитомассу экосистемы (80%) и значительно меньше – в надземную продукцию (8%). Подземная продукция древесного яруса без учета прироста крупных корней оценивается в 1 т/га в год, что составляет 20% от *BNP* экосистемы. Определенные значения запасов фитомассы и продукции древостоев, оцененные для рямов и гряд, мало отличаются от данных, приводимых Н.И. Базилевич (1993) для сосново-кустарничково-сфагнового болота в Европейской территории России.

Анализ надземного растительного вещества кустарничково-травяно-мохового яруса в рямах и на грядах показал, что сфагновые мхи дают наибольший вклад в зеленую фитомассу (80%), остальная масса приходится на травы и кустарнички, причем трав намного меньше, чем кустарничков. Величина надземной мортмассы меньше надземной фитомассы. Запас живой подземной фитомассы в два раза больше запаса надземной и состоит в основном из погребенных стволиков кустарничков (см. табл. 1). Запасы зеленой фитомассы в олиготрофных и мезотрофных мочажинах близки и мало отличаются от таковых на повышенных элементах рельефа. Незначительно отличаясь по запасам зеленой фитомассы, мочажины резко отличаются по составу фитомассы: главным компонентом зеленой фитомассы в олиготрофных мочажинах являются сфагновые мхи, в мезотрофных – травы.

Таблица 5

Запасы (т/га) и чистая первичная продукция (т/га в год) *Pinus sylvestris* на болотах средней тайги (Коронатова, Косых, 2014)

Показатели	<i>G</i>	<i>W</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>ANP</i>	<i>BNP</i>	<i>NPP</i>
Рям	1,0	5,6	2,0	2,0	0,3	1,0	1,3
Гряды	1,1	6,5	1,2	1,2	0,3	0,7	1,0

Весьма различен видовой состав травяного яруса мочажин в северной и средней тайге. В олиготрофных мочажинах в северной тайге преобладают *Carex rotundata* и *Eriophorum russeolum*, в мочажинах средней тайги доминируют *Shechzeria palustris*, *Carex limosa* и *Rhinospora alba*. В мезотрофных мочажинах на севере преобладают высокие травы *Carex rostrata* и *Eriophorum angustifolium*, в средней тайге крупная пушица почти не встречается и заменяется на *Carex lasiocarpa*.

На повышенных элементах рельефа основная фитомасса представлена деревьями, зеленая фитомасса – мхами. В олиготрофных мочажинах, так же как и в ряме и на грядах, основная часть зеленой фитомассы состоит из мхов, в мезотрофных – из трав. Надземная продукция в ряме, на грядах и в олиготрофных мочажинах на 80–90% обусловлена мхами, в мезотрофных мочажинах – травами. Величина чистой первичной продукции приблизительно одинакова в рямах, на грядах и в олиготрофных мочажинах, колеблясь на уровне 7–8 т/га в год, и повышается в мезотрофных мочажинах до 9 т/га в год. Следовательно, продукция верховых болот в средней тайге несколько выше, чем в северной, и составляет 7 т/га в год.

Как в средней, так и в южной тайге на болотах выделяются те же четыре элемента рельефа, древостой рямов и гряд представлен болотными соснами. Видовой состав растительности как на повышенных, так и на пониженных элементах рельефа подобен составу растительности болот средней тайги. Запасы и надземная продукция сосняков определялась на грядах. Запас хвой составил 2,7 т/га, древесины – 13, сухостоя – 2,5 т/га. Прирост хвой и веток текущего года определен в 1 т/га в год (Коронатова, Миляева, 2011).

Запасы зеленой фитомассы кустарничково-травяно-мохового яруса близки в рямах и на грядах, доля сфагновых мхов составляет 60% (см. табл. 1). Запасы надземной мортмассы колеблются около 1 т/га. Подземная фитомасса лежит в пределах от 9 до 13 т/га и определяется в основном кустарничками. Олиготрофные и мезотрофные мочажины близки по запасу зеленой фитомассы, резко отличаясь по преобладанию жизненных форм растений. В олиготрофных мочажинах основной вклад в фитомассу вносят мхи (70%), в мезотрофных – травы (60%). Подземная фитомасса в обеих мочажинах состоит из живых корней и корневищ трав. Запас последних в мезотрофных мочажинах почти в три раза больше, чем в олиготрофных.

На повышенных элементах рельефа в связи с увеличением доли трав как надземная, так и подземная продукция возрастают и *BNP* в два раза превышает *ANP* (см. табл. 1). Продукция в южной тайге в олиготрофных и мезотрофных мочажинах возрастает по сравнению с продукцией тех же экосистем средней тайги на 15%, в то время как на грядах и рямах это повышение составляет 50–60%. Значительное увеличение продукции на повышенных элементах рельефа связано с их лучшей прогреваемостью по сравнению с мочажинами.

Переход от южной тайги к лесостепи характеризуется изменением болотной растительности. В лесостепи болота обычно лежат в нижней части рельефа, занимая аккумулятивные позиции. Растительность этих болот в основном представлена травами, в связи с чем продукция резко возрастает (см. табл. 1). Живая надземная фитомасса в низинном болоте в Назарово очень высока за счет листьев и мощных стеблей лабазника. Мертвая надземная фитомасса в два раза превосходит живую, что говорит о замедленном разложении надземной мортмассы. Масса живых подземных органов близка к массе живых надземных. Масса мертвых подземных органов достигает 70 т/га. Подземная продукция в два раза превосходит надземную и составляет 23 т/га в год. Общая продукция в три раза превышает продукцию болот южной тайги.

В травяном болоте, лежащем южнее, запас зеленой фитомассы ниже, чем в низинном болоте в Назарово, в то время как запас живых подземных органов в три раза выше и достигает 25 т/га. В соответствии с запасом зеленой фитомассы запас надземной мортмассы выше на низинном болоте. Масса мертвых подземных органов очень высока на обоих травяных болотах и достигает в осоково-светлухово-вейниковом болоте 87 т/га. Надземная продукция на обоих болотах близка и превышает 11 т/га в год. Большие различия между болотами наблюдаются в величине подземной продукции. В осоково-светлухово-вейниковом болоте величина *BNP* почти в три раза выше, чем в лабазниково-осоковом (см. табл. 1).

Луговые экосистемы развиваются при меньшей обводненности, чем болотные. Луга чрезвычайно разнообразны, их видовой состав различается в зависимости от положения в рельефе, степени увлажнения, типа почвы, степени ее засоления и от сенокосной и пастбищной нагрузки. Три изученных нами пойменных луга (табл. 2) расположены в районе средней тайги в долине реки Обь на катене от террасы по склону до уровня реки. Почвы меняются от аллювиально-луговых до лугово-болотных. В зависимости от положения почвы в рельефе и состава травяного сообщества изменяется продуктивность этих лугов. Все показатели продуктивности фитомассы как в надземной, так и в подземной сфере увеличиваются от элювиальной позиции к аккумулятивной. Надземная продукция возрастает в этом ряду от 8,5 до 11 т/га в год, подземная – от 11 до 18 т/га в год. Отношение величины *ANP* луга в аккумулятивной позиции к таковой в элювиальной составляет 1,3. Это же отношение для *BNP* достигает 1,7, что говорит о большем влиянии

увлажнения на подземную фитомассу по сравнению с надземной. Общая продукция пойменных лугов очень высока и меняется по склону от 20 до 30 т/га в год. По величине NPP заливной луг в аккумулятивной позиции близок к низинному болоту. Пойменный луг, лежащий в лесостепной зоне, характеризуется пониженным запасом зеленой фитомассы и ее продукции и повышенными величинами тех же показателей в подземной сфере.

Материковые луга приурочены к различным элементам рельефа и размещаются на разных почвах: от темно-серой лесной до лугово-болотной (см. табл. 2). Низинный луг в Красноярском крае по всем показателям продуктивности близок к пойменному лугу, лежащему намного севернее, в его в аккумулятивной позиции. Из этого сопоставления следует, что продуктивность лугов зависит прежде всего от обводненности и в меньшей степени – от теплообеспеченности. Два луга, расположенные на катене Карачи на различных элементах рельефа, отличаются друг от друга почвами и составом доминантов. Несмотря на эти различия, почти по всем показателям продуктивности эти луга близки, исключением является лишь запас мертвых подземных органов (V), который в четыре раза выше в увлажненном лугу. Увеличение запаса V связано с медленной минерализацией подземной мортмассы, обусловленной, вероятно, переувлажнением почвы.

Увлажненный луг в степи находится в нижней части катены Шортанды и не испытывает постоянного недостатка влаги. Почти по всем показателям продуктивности он близок к лугам лесостепи в Карачи, но отличается по соотношению BNP/ANP . Если в лесостепной зоне это отношение равно 5, то в степной зоне оно повышается до 7. Даже временный недостаток влаги в начале или середине сезона вызывает усиленный рост подземных органов растений, обеспечивающий зеленую фитомассу водой и питательными элементами.

Величины надземной и подземной продукции в рассматриваемых лугах в зависимости от места расположения луга и почвы меняются в два раза. Отношение BNP/ANP не постоянно и лежит в пределах от 2 до 7. Продукция чрезвычайно изменчива и зависит не только от увлажнения, а в большей степени от сенокосной или пастбищной нагрузки. Например, суходольный мезофитный луг, находящийся под высокой пастбищной нагрузкой, отличается очень низкими показателями B (7 т/га) и BNP (5 т/га в год), в то время как величины G_{max} (2 т/га) и ANP (3 т/га в год) отличаются в меньшей степени от соответствующих показателей лугов без пастбищной нагрузки (Титлянова и др., 1996). Постоянное скусывание трав стимулирует их усиленный прирост, в связи с чем меньшее количество метаболитов поступает в подземные органы растений, а следствием этого являются малые запасы и прирост корней и корневищ трав. Луга отличаются друг от друга как по степени увлажнения и прогревания почвы, так и по показателям биотического круговорота. Общим для всех лугов является высокая чистая первичная продукция, она изменяется в изученных лугах от 19 до 30 т/га в год. Луговые экосистемы чрезвычайно ценны, так как они обеспечивают животноводство кормами: летом травой, зимой сеном.

Остепненные луга и луговые степи похожи по общему облику и часто по составу растительности. Но обычно отличаются по набору растений-доминантов и почв, на которых они расположены. В остепненных лугах G_{max} лежит в пределах 2–4 т/га, запас мертвой надземной фитомассы выше запаса зеленой (табл. 3). Запас B варьирует от 11 до 20 т/га, запас V от 7 до 26 т/га. В остепненных лугах не наблюдается общего превалирования B или V , что говорит о том, что процессы минерализации в среднем идут с такой же скоростью, как и прирост корней и корневищ. Надземная продукция изменяется от 4 (Казахстан) до 6 т/га в год (Приобье), подземная продукция – от 10 (Назарово) до 24 т/га в год (Казахстан).

Луговые степи лежат в тех же пределах широт, что и остепненные луга, отличаясь от последних своей приуроченностью к повышенным элементам рельефа. Величина G_{max} находится в пределах от 2 до 5 т/га и отличается, по сравнению с остепненными лугами, большим разбросом значений. Средние величины G_{max} одинаковы (см. табл. 3). Равенство запасов зеленой и мертвой надземной фитомассы говорит о равновесии процессов: прирост $G \rightarrow$ накопление $D+L \rightarrow$ минерализация $D+L$. Запасы живых подземных органов изменяются от 8 до 21 т/га, составляя в среднем 15 т/га, запас мертвых – в пределах от 7 до 26 т/га, составляя в среднем 15,5 т/га. Равенство средних величин B и V свидетельствует о близкой скорости процессов: прирост $B \rightarrow$ образование $V \rightarrow$ минерализация V . Величина ANP колеблется от 2 до 8 т/га в год, BNP – от 15 до 22 т/га в год. С севера на юг (56–52° с.ш.) в остепненных лугах отношение BNP/ANP нарастает от 2 до 7, в луговых степях – от 2 до 11, хотя по средним показателям продуктивности остепненные луга и луговые степи очень близки.

Изученные нами настоящие степи лежат в пределах 54–51° с.ш. и 69–94° в.д. (табл. 4). Запас зеленой фитомассы в этих степях варьирует от 1,2 до 2,5 т/га, ветоши и подстилки – от 1,7 до 4,7 т/га. Как B , так и V изменяются в пределах от 15 до 24 т/га. Надземная продукция составляет 3,5–4,7 т/га в год, подземная – 12–26 т/га в год. На условной границе раздела луговых и настоящих степей происходит изменение в запасах растительного вещества и интенсивности процессов биотического круговорота. Средние значения G_{max} и ANP в настоящих степях ниже, чем в луговых, а средние значения запасов и интенсивностей в подземной сфере – выше. Величины общей продукции этих степей отличаются в малой степени. Среднее значение отношения BNP/ANP в настоящих степях равно 5 и превышает таковое в луговой степи в 1,3 раза. В настоящих степях нет конкуренции за свет, однако есть конкуренция за влагу, что и вызывает усиленный прирост корней.

Сухие степи отличаются друг от друга очень резко по запасам растительного вещества и величинам чистой первичной продукции, так как лежат на разных элементах рельефа и получают разное количество влаги (см. табл. 4). Так величины ANP и BNP от одной степи к другой могут меняться в три раза. Все показатели биотического круговорота – запасы и продукция растительного вещества – снижены в 2–3 раза по сравнению с соответствующими показателями в настоящих степях. Отношение подземной продукции к надземной в ряду сухих степей изменяется от 2 до 9, что выше, чем в настоящих степях. Нехватка влаги в опустыненных степях резко снижает рост растений и все показатели биотического круговорота. Отношение BNP/ANP такое же, как в сухих степях, что связано со значительным участием в фитоценозе нанофитона – литофитного подушковидного растения с высокой надземной продукцией.

ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку продуктивность зависит прежде всего от суммы температур выше 5 °С и количества осадков за вегетационный период, приводим изменение этих параметров вдоль широтного климатического градиента (рис. 1). Ключевые участки лежат в пределах количества осадков от 320 (подзона средней тайги) до 140 мм (подзона сухих степей). Сумма температур выше 5 °С минимальна в лесотундре (1430 °С×сут) и максимальна в сухих степях в Казахстане (3070 °С×сут). И количество осадков за вегетационный период, и сумма температур от севера к югу меняются в два раза. Пересечение температурной и кривой осадков происходит на 54° с.ш., где количество осадков за вегетационный период составляет 250 мм и сумма температур – 2500 °С×сут.

В зависимости от гидротермических условий меняется чистая первичная продукция экосистем и отношение BNP/ANP . В таблицах 6 и 7 приводятся усредненные данные по типам экосистем. По верховым болотам от лесотундры до южной тайги (табл. 6) даны величины только NPP , для всех травяных экосистем — величины ANP , BNP , NPP и отношение BNP/ANP (табл. 7). В болотах от лесотундры к южной тайге сумма температур непрерывно увеличивается от 1430 до 2230 °С×сут, в то время как количество осадков за вегетационный период колеблется в диапазоне 290–320 мм (см. рис. 1). Величина чистой первичной продукции с севера на юг возрастает от 5 до 10 т/га в год (см. табл. 6), следовательно, величина продукции сфагновых болотных экосистем определяется количеством тепла.

При смене растительности с преимущественно моховой на травяную и повышении суммы температур всего на 100 °С продукция экосистемы возрастает в пять-шесть раз (см. табл. 7). То есть причиной резкого повышения продукции является не изменение климатических условий, а смена кустарничково-травяно-сфагнового покрова болот на травяной. Основную долю суммарной продукции в травяных болотах составляет подземная продукция, достигающая 80% от общей.

Наиболее близки к травяным болотам пойменные луга, которые заливаются водой каждую весну, но на разное время и до разных высотных отметок. Луга являются аazonальной растительностью и встречаются в различных природных зонах. Надземная продукция пойменных лугов, лежащих в пределах 58–56° с.ш., высока и составляет 30–40% от величины чистой первичной продукции, достигающей в среднем по трем лугам 24 т/га в год (см. табл. 7). В группе материковых лугов, лежащих в широком интервале координат (56–52° с.ш., 71–90° в.д.) средняя величина NPP повышается до 27 т/га в год, при этом отношение BNP/ANP увеличивается в два раза. Высокая чистая первичная продукция лугов связана с их постоянным увлажнением не только за счет дождей, но и за счет стока воды с повышенных элементов рельефа.

Таблица 6

Средние величины чистой первичной продукции верховых болот (т/га в год)

Болота	<i>NPP</i>
Плоскобугристые в лесотундре	5,1
Плоскобугристые в северной тайге	6,3
Выпуклые олиготрофные в средней тайге	7,0
Выпуклые олиготрофные в южной тайге	10,0

Таблица 7

Средние величины чистой первичной продукции травяных болот, лугов и степей (т/га в год)

Экосистема	<i>ANP</i>	<i>BNP</i>	<i>NPP</i>	<i>BNP/ANP</i>
Травяные болота в лесостепи	11,5	45,2	56,6	3,9
Луга пойменные	8,4	16,0	24,4	1,9
« материковые	5,3	21,4	26,7	4,0
« остепненные	4,8	18,2	23,0	3,8
Степи луговые	4,5	17,6	22,1	3,9
« настоящие	4,0	19,9	23,9	5,0
« сухие	1,7	9,7	11,4	5,7
« опустыненные	1,2	7,1	8,3	5,9

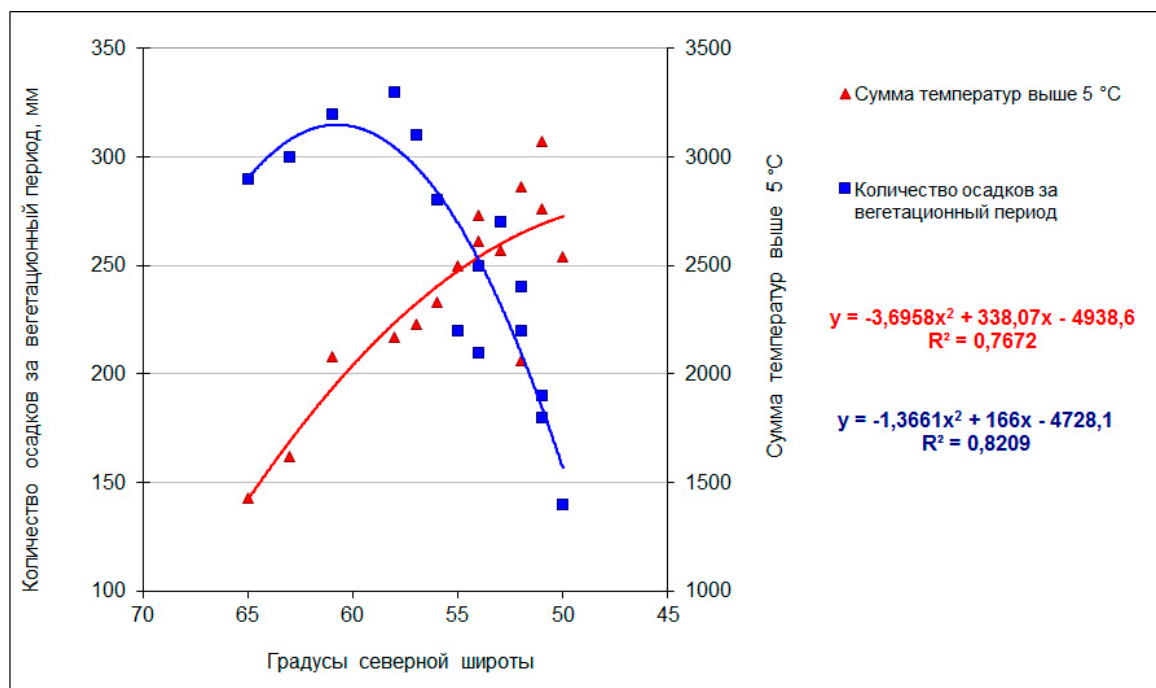


Рисунок 1. Изменение гидротермических условий экосистем вдоль широтного градиента. Точки на рисунке соответствуют координатам ключевых участков по широте (http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=29937&lang=ru, дата обращения 15.03.2022).

В интервале 56–52° с.ш. находятся экосистемы остепненных лугов, луговых и настоящих степей. Эти экосистемы лежат в области, близкой к точке пересечения кривых суммы осадков и суммы температур – 54° с.ш. (см. рис. 1). Данное обстоятельство свидетельствует об оптимальном соотношении тепла и влаги для роста травянистых растений. В этих же экосистемах формируются наиболее плодородные для данного региона почвы – лугово-черноземные и черноземы обыкновенные. Усредненные величины чистой первичной продукции в данном ряду экосистем меняются незначительно: от 22 до 24 т/га в год. Отношение *BNP/ANP* несколько увеличивается и в настоящих степях достигает 5. От пойменных лугов к материковым происходит увеличение отношения *BNP/ANP* от 2 до 4, это отношение колеблется в лугово-степных фитоценозах на уровне 4 (см. табл. 7).

В группе от остепненных лугов вплоть до настоящих степей величина *NPP* меняется незначительно – от 22 до 24 т/га в год, но, как мы показали выше, в настоящих степях

увеличивается доля подземной продукции. На увеличение тепла и уменьшение влаги рассматриваемые экосистемы отвечают не заметным изменением величины *NPP*, а сменой растительности от мезофитной (луга) до ксерофитной (настоящие степи), одновременно происходит смена доминантов и луговые травы (*Calamagrostis sp.*, *Poa sp.*) замещаются на степные (*Stipa sp.*, *Helictotrichon sp.*, *Festuca sp.*, *Artemisia sp.*).

Последнюю группу рассматриваемых экосистем представляют сухие и опустыненные степи, лежащие в пределах 52–50° с.ш. Сумма температур в этих степях повышается от 2730 до 3070 °С, количество осадков за вегетационный период значительно снижается – от 270 до 140 мм.

Чистая первичная продукция, составляющая в настоящих степях 24 т/га в год, резко падает к сухим степям (11), затем плавно снижается в опустыненных степях до 8 т/га в год (см. табл. 7). Отношение *BNP/ANP* в ряду луговые степи – опустыненные степи повышается от 4 до 6, в основном за счет уменьшения надземной продукции. На север и на юг от области координат (56–52° с.ш.) величина *NPP* снижается: на север вследствие недостатка тепла, на юг – вследствие недостатка влаги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если не единственным, то основным процессом, выводящим углерод (CO_2) из атмосферы, является процесс создания чистой первичной продукции. Содержание углерода в надземной фитомассе колеблется около 45%, в подземной – около 40%. Усредненная по всем травяным экосистемам рассматриваемой территории без учета их площади величина *NPP* составляет 24 т/га в год. Исходя из вышеуказанных предположений, можно считать, что растительный покров одного километра квадратного травяных экосистем ежегодно потребляет из воздуха 940 т С, т. е. 3400 т углекислого газа, и выделяет в воздух 2500 т кислорода. Естественно, что в биотическом круговороте в процессах минерализации растительных остатков луга и степи ежегодно потребляют 2500 т O_2 и выделяют 3400 т CO_2 . Таким образом, травяной покров лугов и степей является интерфейсом громадного обмена газами между атмосферой и травяно-почвенным покровом.

Если в климатических травяных экосистемах вход углерода в атмосферу равен его выходу, то в болотах вход углерода больше выхода, так как часть углерода захоранивается в торфе. Показано, что скорость накопления торфа для болот Западной Сибири составляет около 40 г С/м² в год (Lapshina et al., 2001). Следовательно, в лесотундре, где чистая первичная продукция колеблется около 250 г С/м² в год, часть ее, переходящая в торф, составляет 14–16%. Эта же величина для сфагновых болот южной тайги приблизительно равна 8% от *NPP*. Средняя продукция верховых болот равна 7 т/га в год. Растительный покров 1 км² усредненного болота ежегодно потребляет из воздуха 1000 т углекислого газа, т.е. 275 т углерода, и выделяет в воздух 730 т кислорода. В процессе разложения растительных остатков часть углерода закрепляется в торфе. Эта величина составляет 40 т С/км² в год. В атмосферу в виде CO_2 возвращается 235 т С. Следовательно, растительный покров верховых болот, как и растущие леса, возвращая основную часть углерода в атмосферу, часть его закрепляет в органическом веществе торфа и древесины и таким образом в определенной степени снижают содержание двуокиси углерода в атмосфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Н.П. Косых и Н.Г. Коронатовой за помощь в сборе данных.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Базилевич Н.И. *Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии*. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Смирнов В.В., Родин Л.Е., Нечаева Н.Т., Левин Ф.И. *Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах*. М.: Мысль, 1978. 184 с.
3. Вагина Т.А., Базилевич Н.И., Курачев В.М. *Почвы и растительность // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. Т. 1. С. 40–45.

4. Вагина Т.А., Шатохина Н.Г. *Динамика запасов надземной и подземной органической массы степных, луговых и болотных фитоценозов* // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. Т. 2. С. 217–264.
5. Коронатова Н.Г., Косых Н.П. *Соотношение продуктивности древесного и мохово-травяно-кустарничкового ярусов на среднетаежных выпуклых олиготрофных болотах* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Сб. матер. IV Междунар. полевого симпозиума (Новосибирск, 04–17 августа 2014 г.). Томск: Изд-во ТГУ, 2014. С. 182–185.
6. Коронатова Н.Г., Миляева Е.В. *Продуктивность болотных сосняков южной тайги Западной Сибири* // ГЕО-Сибирь-2011: Сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011» (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 4. С. 259–262.
7. Косых Н.П. *К методике определения линейного прироста и продукции сфагновых мхов на мезо-олиготрофных болотах Западной Сибири* // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования: Сб. матер. науч. конф. (Москва, 01 июля 1999 г.) / Вомперский С.Э., Сирин А.А. (отв.ред.). М.: ГЕОС, 1999. С. 121–122.
8. Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Лапина Е.Д., Филиппова Н.В., Вишнякова Е.К., Степанова В.А. *Линейный прирост и продукция сфагновых мхов в средней тайге Западной Сибири* // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2017. Т. 8. № 1 (15). С. 3–13.*
9. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Блейтен В. *Продуктивность болот южной тайги Западной Сибири* // *Вестник Томского университета. Сер. биол. наук. 2003. № 7. Приложение. С. 142–152.*
10. Мордкович В.Г., Шатохина Н.Г., Титлянова А.А. *Степные катены*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. 117 с.
11. Снытко В.А., Нефедьева Л.Г., Дубынина С.С. *Травяные экосистемы Назаровской впадины, Красноярский край* // Биологическая продуктивность травяных экосистем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. С. 88–97.
12. Титлянова А.А. *Биологический круговорот углерода в травяных биогеоценозах*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 220 с.
13. Титлянова А.А. *Сухая степь Казахстана, Целиноградская область* // Биологическая продуктивность травяных экосистем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. С. 25–31.
14. Титлянова А.А., Косых Н.П., Кыргыз Ч.С., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П., Самбуу А.Д., Шибарева С.В. *Продуктивность травяных экосистем Тувы* // *Почвы и окружающая среда. 2020. Т. 3. № 2. e110. DOI: 10.31251/pos.v3i2.110.*
15. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. *Корни как компонент биоты почв Сибири в травяных экосистемах* // *Почвоведение. 1994. № 12. С. 43–50.*
16. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П. *Подземные органы растений в травяных экосистемах*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1996. 128 с.
17. Титлянова А.А., Наумова Н.Б., Косых Н.П. *Круговорот углерода в луговых экосистемах* // *Почвоведение. 1993. № 3. С. 32–39.*
18. Титлянова А.А., Самбуу А.Д. *Сукцессии в травяных экосистемах*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 191 с.
19. Титлянова А.А., Шатохина Н.Г. *Продукционный процесс в степном и луговом биогеоценозах* // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. Т. 2. С. 303–314.
20. Титлянова А.А., Шибарева С.В. *Новые оценки запасов фитомассы и чистая первичная продукция степных экосистем Сибири и Казахстана* // *Известия РАН. Сер. географ. 2017. № 4. С. 43–55. DOI: 10.7868/S0373244417040041.*
21. Титлянова А.А., Шибарева С.В. *Продуктивность травяных экосистем: Справочник*. М.: Изд-во МБА, 2020. 100 с.
22. Хакимзянова Ф.И. *Сукцессия восстановления в настоящей степи Хакасии* // Биологическая продуктивность травяных экосистем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. С. 42–48.
23. Шатохина Н.Г. *Луговые степи и остепненные луга Западной Сибири, Новосибирская область* // Биологическая продуктивность травяных экосистем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. С. 76–87.
24. Шатохина Н.Г., Вагина Т.А. *Чистая первичная продукция степных, луговых и болотных фитоценозов* // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. Т. 2. С. 265–299.
25. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. *Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems* // *Wetlands Ecology and Management. 2008a. No. 16. P. 139–153. DOI: 10.1007/s11273-007-9061-7.*

26. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Peregon A.M., Parshina E.K. Biological productivity of bogs in the middle taiga subzone of Western Siberia // *Russian Journal of Ecology*. 2008b. Vol. 39. No. 7. P. 8–16. DOI: [10.1134/S1067413608070023](https://doi.org/10.1134/S1067413608070023).
27. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Stepanova V.A., Kolesnychenko L.G., Khovalyg A.O., Peregon A.M. Plant organic matter in palsa and khasyrei type mires: direct observations in West Siberian Sub-Arctic // *Atmosphere*. 2021. No. 12. 1612. DOI: [10.3390/atmos12121612](https://doi.org/10.3390/atmos12121612).
28. Lapshina E.D., Pologova N.N., Mouldiyarov E.Ya. *Pattern of Development and Carbon Accumulation in homogenous Sphagnum fuscum-peat Deposit on the South of West Siberia* // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. Proc. of the International Field Symposium (Noyabrsk, 18–22 August, 2001). Novosibirsk: ООО "Agenstvo Sibprint", 2001. P. 101–104.
29. Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in Western Siberia // *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*. 2008. Vol. 113. G01007. DOI: [10.1029/2007JG000441](https://doi.org/10.1029/2007JG000441).

Поступила в редакцию 04.04.2022

Принята 11.04.2022

Опубликована 04.05.2022

Сведения об авторах:

Титлянова Аргента Антониновна – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); argenta@issa-siberia.ru, atitlyanova@mail.ru

Вишнякова Евгения Константиновна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); vishnyakova@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

PRODUCTIVITY CHANGES OF WETLAND AND GRASSLAND ECOSYSTEMS ALONG A LATITUDINAL GRADIENT

© 2022 A. A. Tinlyanova , E. K. Vishnyakova 

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: argenta@issa-siberia.ru

The aim of the study. Analysis of changes in the productivity of dwarf shrub-moss-lichen, pine-dwarf shrub-sphagnum and sedge-sphagnum and grass ecosystems along the latitudinal gradient.

Methodology. For a number of bog and grass ecosystems located along a latitudinal gradient from 65 to 50° N in the range of longitudes from 63 to 95° E the stocks of live and dead, aboveground and belowground phytomass, as well as the values of aboveground (ANP), belowground (BNP) and total production (NPP) were analyzed. The data are given for 45 ecosystems grouped into 12 types from forest-tundra mires to desert steppes. The vegetation of ecosystems is represented by bog one (mosses, shrubs and grasses) to the steppe (mesoxerophytic and xerophytic grasses). Since the spread of data on stocks and production for individual ecosystems is large, we present averaged data for ecosystem types.

Main results. The largest stock of green phytomass was obtained for floodplain meadows (7 t/ha), the smallest stock was found in the desert steppes (0.8 t/ha). The stock of dead aboveground phytomass was maximal in the fens of the forest-steppe zone (10 t/ha) and minimal in the oligotrophic hollows of boreal bogs (0.3 t/ha). The stock of living belowground organs decreases along a latitudinal gradient from 20 (true steppes) to 3 t/ha (desert steppes), whereas the stock of dead belowground organs decreased from 79 (fens of the forest-steppe zone) to 4 t/ha (in the ryams of the middle taiga and desert steppes). Above-ground production was estimated as highest in the fens of the forest-steppe zone (12), decreasing along the latitudinal gradient down to the desert steppes (1 t/ha per year). Belowground production in all types of ecosystems studied was higher than the above-ground one, ranging from 45 (fens of the forest-steppe zone) to 3 t/ha per year (mires in the forest-tundra). The NPP value in some of the studied ecosystems varied from 57

(fens of the forest-steppe zone) to 5 t/ha per year (mires in the forest-tundra). The BNP/ANP ratio averaged over ecosystem types was maximal in the desert steppes (5.9) and minimal in floodplain meadows (1.9). In the range of latitudes 56-52°N, where steppe meadows, meadow steppes and true steppes located, the NPP, averaged over these ecosystems, varied from 22 to 24 t/ha per year. These ecosystems the most fertile soils of the region, i.e. meadow chernozem and ordinary chernozem (Phaeozems) were developed. To the north and south of this area, the NPP value decreases: to the north due to the lack of heat, and to the south due to lack of moisture.

Conclusions. In the biotic cycle in mires differs from that in meadows and steppes by the annual sequestration of a part of the carbon influx in the forming peat. This amount of carbon sequestration is about 10% of the NPP of the wetland ecosystem. In the climax grass ecosystems, the carbon influx is equal to its outflux. These ecosystems are acting as gas exchangers between plants, soil and atmosphere. In contrast to grasslands, wetlands are acting as carbon accumulators that lower the CO₂ in the air.

Key words: plant matter stock; net primary production; taiga; meadow; steppe

How to cite: Titlyanova A.A., Vishnyakova E.K. Productivity changes of wetland and grassland ecosystems along a latitudinal gradient // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(2). e176. DOI: [10.31251/pos.v5i2.176](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.176) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Bazilevich N.I. *Biological productivity of the ecosystems of Northern Eurasia*. Moscow: Nauka Publ., 1993, 293 p. (in Russian)
2. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., Smirnov V.V., Rodin L.E., Nechaeva N.T., Levin F.I. *Methods for biological cycle studying in different natural zones*. Moscow: Mysl', 1978, 184 p. (in Russian)
3. Vagina T.A., Bazilevich N.I., Kurachev V.M. *Soils and vegetation*. In book: Structure, functioning and evolution of biocenoses system in Baraba. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1974, Vol. 1, p. 40–45. (in Russian)
4. Vagina T.A., Shatokhina N.G. *Dynamics of aboveground and underground organic matter stocks of steppe, meadow and mire phytocenoses*. In book: Structure, functioning and evolution of biocenoses system in Baraba. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1976, Vol. 2, p. 217–264. (in Russian)
5. Koronatova N.G., Kosykh N.P. *Ratio between productivity of tree and moss-grass-dwarf shrub storeys in ombrotrophic raised bogs in the middle taiga*. In book: West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. Proc. of the Fourth International Field Symposium (Novosibirsk, 19–29 April, 2011), Tomsk: Publishing House of TSU, 2014, p. 182–185. (in Russian)
6. Koronatova N.G., Milyaeva E.V. *Productivity of bog pine forests in the southern taiga of Western Siberia*. In book: GEO-Siberia-2011. Proc. of the VII International Science Congress (Novosibirsk, 4–17 August, 2014), Novosibirsk: SSGA, 2011, Vol. 4, p. 259–262. (in Russian)
7. Kosykh N.P. *The method for determining the linear growth and production of sphagnum mosses in meso-oligotrophic bogs of Western Siberia*. In book: Wetlands and bog forests in connection of sustainable nature management. Proc. Sci. Conf. (Moscow, 1 July, 1999). Moscow: GEOS, 1999, p. 121–122. (in Russian)
8. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Lapshina E.D., Filippova N.V., Vishnyakova E.K., Stepanova V.A. *Linear growth and production of Sphagnum mosses in the middle taiga zone of West Siberia, Environmental dynamics and global climate change, 2017, Vol. 8, No. 1, p. 3–13*. (in Russian)
9. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Bleuten V. *Productivity of mire of the south taiga of West Siberia, Vestnik of Tomsk State University, The Series Biological Sciences, 2003, No. 7, Appendix, p. 142–152*. (in Russian)
10. Mordkovich V.G., Shatokhina N.G., Titlyanova A.A. *Steppe catenas*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1985, 117 p. (in Russian)
11. Snytko V.A., Nefedyeva L.G., Dubynina S.S. *Grassland ecosystems of the Nazarovskaya depression, Krasnoyarsk region*. In book: Biological productivity of grassland ecosystems. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1988, p. 88–97. (in Russian)
12. Titlyanova A.A. *Biological carbon cycle in grass biogeocenoses*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1977, 220 p. (in Russian)
13. Titlyanova A.A. *Dry steppe of Kazakhstan, Tselinograd region*. In book: Biological productivity of grassland ecosystems. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1988, p. 25–31. (in Russian)
14. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Kyrgys Ch.S., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P., Sambuu A.D., Shibareva S.V. *Productivity of grassland ecosystems in the Tyva Republic, Russia, The Journal of Soils and Environment, 2020, Vol. 3, No. 2, e110*. DOI: [10.31251/pos.v3i2.110](https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.110) (in Russian)
15. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. *Roots as soils biota component in Siberian grassland ecosystems, Pochvovedenie, 1994, No. 12, p. 43–50*. (in Russian)
16. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P. *Below ground organs of plants in grassland ecosystems*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1996, 128 p. (in Russian)

17. Titlyanova A.A., Naumova N.B., Kosykh N.P. Carbon cycling in meadow ecosystems, *Pochvovedenie*, 1993, No. 3, p. 32–39. (in Russian)
18. Titlyanova A.A., Sambuu A.D. *Succession in grasslands*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2016, 191 p. (in Russian)
19. Titlyanova A.A., Shatokhina N.G. *Production process in steppe and meadow biogeocenoses* // In book: Structure, functioning and evolution of biocenoses system in Baraba. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1976, Vol. 2, p. 303–314. (in Russian)
20. Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Phytomass stocks and net primary production in the steppe ecosystems of Siberia and Kazakhstan, *Izvestiya RAS, Seriya Geograficheskaya*, 2017, No. 4, p. 43–55. DOI: [10.7868/S0373244417040041](https://doi.org/10.7868/S0373244417040041) (in Russian)
21. Titlyanova A.A., Shibareva S.V. *Productivity of grassland ecosystems: a reference book*. Moscow: Publishing House MBA, 2020, 100 p. (in Russian)
22. Khakimzyanova F.I. *Recovery succession in the true steppe of Khakasia*. In book: Biological productivity of grassland ecosystems. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1988, p. 42–48. (in Russian)
23. Shatokhina N.G. *Meadow steppes and steppe meadows of Western Siberia, Novosibirsk region*. In book: Biological productivity of grassland ecosystems. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1988, p. 76–87. (in Russian)
24. Shatokhina N.G., Vagina T.A. *Net primary production of steppe, meadow and mire phytocenoses*. In book: Structure, functioning and evolution of biocenoses system in Baraba. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1976, Vol. 2, p. 265–299. (in Russian)
25. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems, *Wetlands Ecology and Management*, 2008a, No. 16, p. 139–153. DOI: [10.1007/s11273-007-9061-7](https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7).
26. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Peregon A.M., Parshina E.K. Biological productivity of bogs in the middle taiga subzone of Western Siberia, *Russian Journal of Ecology*, 2008b, Vol. 39, No. 7, p. 8–16. DOI: [10.1134/S1067413608070023](https://doi.org/10.1134/S1067413608070023).
27. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Stepanova V.A., Kolesnychenko L.G., Khovalyg A.O., Peregon A.M. Plant organic matter in palsa and khasyrei type mires: direct observations in West Siberian Sub-Arctic, *Atmosphere*, 2021, No. 12, 1612. DOI: [10.3390/atmos12121612](https://doi.org/10.3390/atmos12121612).
28. Lapshina E.D., Pologova N.N., Mouldiyarov E.Ya. *Pattern of Development and Carbon Accumulation in homogenous Sphagnum fuscum-peat Deposit on the South of West Siberia*. In book: West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present. Book abstracts of the International Field Symposium (18–22 August, 2001), Novosibirsk: OOO "Agenstvo Sibprint", 2001, p. 101–104.
29. Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in Western Siberia, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2008, Vol. 113, G01007. DOI: [10.1029/2007JG000441](https://doi.org/10.1029/2007JG000441).

Received 04 April 2022

Accepted 11 April 2022

Published 04 May 2022

About the authors:

Titlyanova Argenta Antoninovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia), argenta@issa-siberia.ru, atitlyanova@mail.ru

Vishnyakova Evgeniya Konstantinovna – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); vishnyakova@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В БОЛОТАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2022 Н. Г. Корнатова 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2,
г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: kornatova@issa-siberia.ru

В обзорной статье рассмотрены результаты исследований продукционно-деструкционных показателей углеродного цикла в верховых болотах Западной Сибири, проведенных сотрудниками ИПА СО РАН. Установлены особенности круговорота углерода в болотах, описаны применяемые методы, показан географический охват исследованной территории. На основе ранее опубликованных результатов охарактеризованы некоторые закономерности изменения фитомассы, первичной продукции и деструкции вдоль широтного градиента, проведено сравнение продуктивности болот с другими биогеоценозами региона.

Ключевые слова: первичная продукция; деструкция; фитомасса; круговорот углерода; верховое сфагновое болото; мерзлотное плоскобугристое болото; Западная Сибирь

Цитирование: Корнатова Н.Г. Обзор исследований продукционно-деструкционных процессов в болотах Западной Сибири: методы и результаты // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e170. DOI: [10.31251/pos.v5i2.170](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.170)

ВВЕДЕНИЕ

В рамках Парижского соглашения 2016 г. Россия взяла курс на низкоуглеродное развитие и приняла обязательство снизить выбросы парниковых газов к 2030 г. до 70% от уровня 1990 г. Основные газы, увеличение концентрации которых приводит к парниковому эффекту, – это углекислый газ (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O). В результате человеческой деятельности больше всего выделяется углекислого газа, при этом он же необходим растениям для фотосинтеза и производства органического вещества. Поэтому биосфера является природным уловителем углекислого газа, который выделяется в результате природных процессов и антропогенной деятельности. В настоящее время изучение цикла углерода и продукционно-деструкционных процессов в экосистемах приобретает не только научную, но и политико-экономическую актуальность.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Принцип изучения биотического круговорота углерода и других элементов на основе количественного учёта фракций растительности, их прироста и опада был обоснован в работах Л.Е. Родина и Н.И. Базилевич (1965), Л.Е. Родина, Н.П. Ремезова и Н.И. Базилевич (1967). Центральное место авторы отвели изучению годовых циклов на основе динамики органического вещества растительного покрова биогеоценозов в различных фракциях, подчеркнули необходимость применения специфичных методик учёта в зависимости от особенностей строения растительных сообществ и дали описание этих методик, отметили неравномерность прироста и отмирания органической массы как в течение сезона, так и в разные годы.

Основные принципы описания биотического круговорота на основе системного подхода были сформулированы в работах А.А. Ляпунова и А.А. Титляновой (1974), А.А. Титляновой (1977). В предложенной схеме есть блоки или компоненты экосистем (зелёная фитомасса, ветошь, подстилка, подземные органы растений, микроббиомасса и другие), а также потоки или обменные процессы (фотосинтез, дыхание, транслокация, отмирание и другие). Чистая первичная продукция и гетеротрофное дыхание выделяются как интегральные показатели, которые характеризуют интенсивность биотического круговорота углерода в биогеоценозе. Методология изучения продукционно-деструкционных процессов в биогеоценозах изложена в нескольких монографиях (Титлянова, 1977; Титлянова, Тесаржова, 1991; Титлянова и др., 1988; 1993; 1996) и основана на создании полной системы качественных представлений о продукционно-деструкционных процессах, выделении количественных характеристик и установлении режима круговорота, идентификации положения биогеоценоза на катене и в широтном ряду зональности.

Методы определения первичной продукции зависят от характера роста растений. В травяных экосистемах фитомасса постоянно нарастает и отмирает. Поэтому запас, который мы можем измерить в определённый момент времени, будет меньше годовой первичной продукции. Для расчёта первичной продукции А.А. Титляновой был предложен балансовый метод, который основан на динамике изменения запасов и требует повторных измерений в течение сезона (Титлянова, 1977; Титлянова и др., 1988; 1993; 1996). В недавно выпущенном А.А. Титляновой и С.В. Шибаревой справочнике по продуктивности травяных экосистем содержатся количественные данные запасов и продукции, обоснована необходимость учёта продукции экосистем, приведена методика и даны методические рекомендации для полевых исследований, показаны способы расчета продукции по неполным данным (Продуктивность..., 2020).

Верховые болота характеризуются специфическими особенностями круговорота углерода. Во-первых, к ним относится незамкнутость, которая приводит к накоплению органического вещества в виде торфа. Во-вторых, типичен вынос вместе с болотными водами части органических веществ, оценку содержания которых в водах южнотаёжных болот Западной Сибири можно найти в работах томских исследователей О.В. Серебrenниковой с соавт. (2019), И.В. Русских с соавт. (2020). Третья особенность – это выделение в атмосферу, помимо углекислого газа, метана, оценку эмиссии которого из Западно-Сибирских болот можно найти в работах А.В. Наумова (2002; 2009). В-четвёртых, для сфагновых болот обосновано наличие внутреннего цикла углерода, который заключается в том, что выделяющийся из почвы углекислый газ не достигает поверхности болота и не поступает в атмосферу, т.к. перехватывается сфагновым ковром и вновь включается в фотосинтез (Наумов, 2009).

Особенностью круговорота верховых болот является также его замедленность по сравнению с травяными экосистемами, связанная с составом фитоценозов. Доминирующими группами растений верховых болот являются сфагновые мхи, кустарнички и, на повышенных элементах рельефа, болотная форма сосны обыкновенной. Травы могут присутствовать, но в олиготрофных условиях их вклад в продуктивность невелик. В отличие от травянистых растений, фитомасса которых постоянно прирастает и отмирает в течение вегетационного сезона, надземные органы сфагновых мхов, кустарничков и сосен прирастают в течение всего вегетационного сезона, а отмирают через несколько лет или десятилетий. Поэтому для определения продукции не требуется динамических наблюдений в течение лета, т.к. запас их надземной фитомассы, который прирост к осени, будет соответствовать надземной первичной продукции.

Есть методы, которые позволяют определить прирост за вегетационный сезон у различных групп болотных растений (Титлянова и др., 2000). Для определения прироста сфагновых мхов существуют различные метки, которые закрепляют на самих растениях или в сфагновом ковре. Метод «ёршиков» (brush-wire method) (Rydin and Jeglum, 2013) является модификацией метода коленчатых проволок (cranked wire method) (Clymo, 1970) и применяется для измерения линейного прироста вертикально растущих мхов с плотной дерниной (рис. 1 А). Метод индивидуальных меток был разработан Н.П. Косых (Kosykh et al., 2008a) на базе метода перевязок (Бегак, 1927; Родин и др., 1967) для сфагновых мхов с рыхлой дерниной и наклонным ростом (рис. 1 Б). У всех групп болотных растений можно определять прирост текущего года по морфологическим признакам. Так, у сфагновых мхов стебель, приросший в текущем году, часто отличается более ярким цветом и расположен выше изгиба и/или сгущения веточек, которые идентифицируют место прошлогоднего расположения головки (капитулы). Текущий прирост побегов кустарничков можно определить по более яркому цвету молодой части стебля и кольцам на месте отпавших почечных чешуй, которые разделяют участки стебля текущего, прошлого года и предыдущих лет (рис. 1 В). Определение прироста текущего года у кустарничков может осложняться наличием двух фаз прироста в течение вегетационного сезона. Прирост текущего года и предыдущих лет у болотных сосен легко устанавливается по наличию кольца на побеге на месте бывших почек, структуре и окраске коры, частоте расположения и длине хвои, которые варьируются в разные годы (рис. 1 Г). Таким образом, морфологические признаки позволяют не только определить приросты разных лет, но и служат индикаторами различных условий среды в разные годы и наличия связи между этими функциональными показателями, в том числе погодными флуктуациями и климатическим трендом; их установление является актуальной задачей будущих исследований.

Для учёта подземной продуктивности, в лаборатории биогеоценологии ИПА СО РАН разработана методика определения видового и фракционного состава подземных органов

болотных растений на основе морфологических признаков (Kosykh et al., 2008a). В то же время, высокая скорость оборота мелких сосущих корней предполагает применение отборов в динамике за вегетационный период, что сопряжено с организационными трудностями и значительным увеличением времени и трудозатрат на разбор образцов. Обычно практикуемый единовременный отбор образцов приводит к занижению оценки подземной первичной продукции болот.

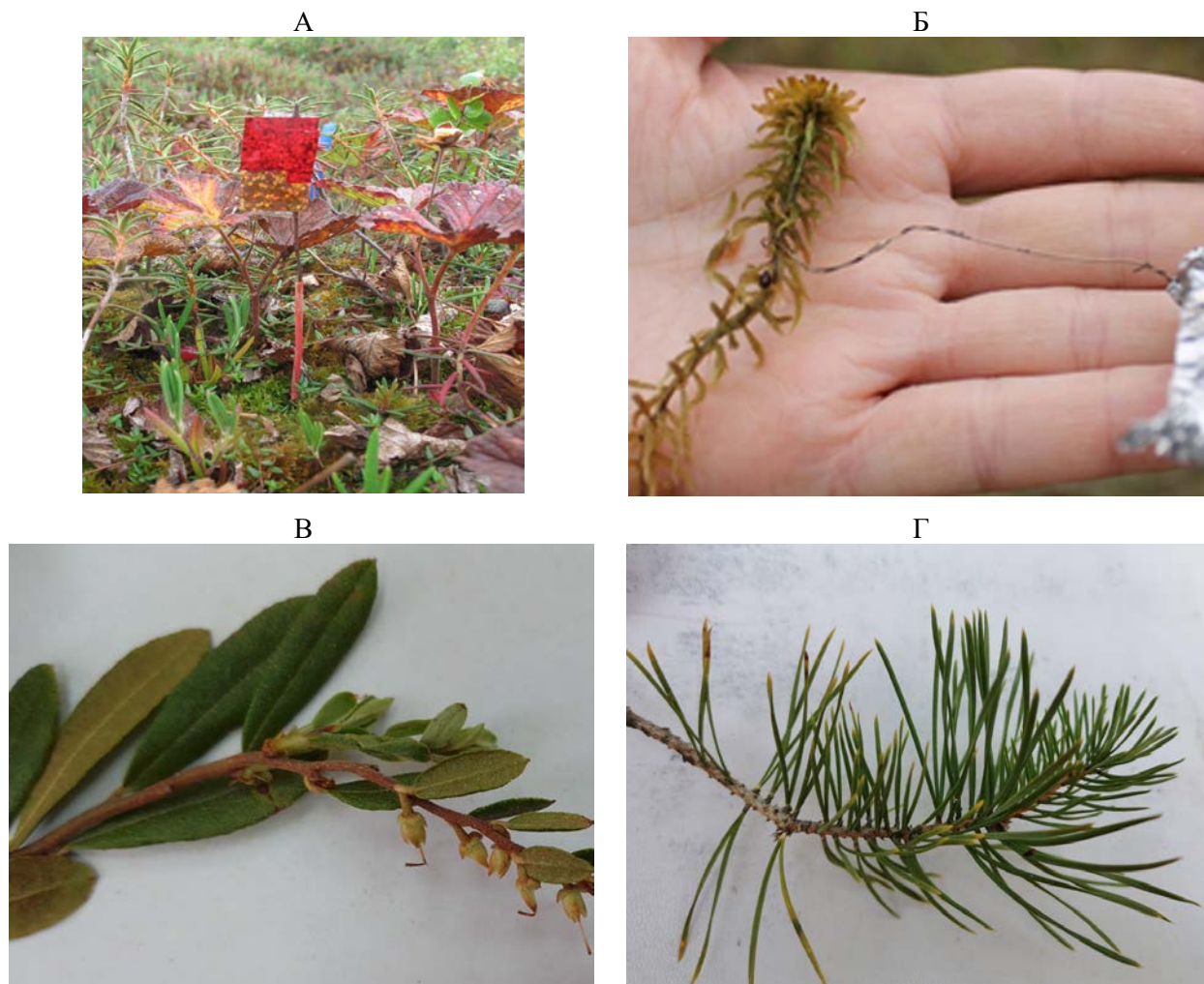


Рисунок 1. Методы определения прироста болотных растений: А – «ёршик», установленный в плотную сфагновую дернину; Б – «индивидуальная метка» на мочажинном мхе *Sphagnum lindbergii* Schimp. ex Lindb.; В – ветка кустарничка *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench в мае 2021 г. с молодым побегом, который развивается в пазухе прошлогоднего листа; Д – ветка болотной формы сосны *Pinus sylvestris* L. f. *uliginosa* Abol. в сентябре 2021 г., длина хвои чётко различается в разные годы.

Для изучения деструкции одним из общепринятых методов является проведение полевого эксперимента, в ходе которого закладывают образцы растительного материала заданной массы в мешочках из устойчивого к разрушению синтетического материала с размером ячеек 0,2-0,3 мм (litter-bag method) (Козловская и др., 1978). Эту методику применяли в лаборатории биогеоценологии ИПА СО РАН для оценки скорости деструкции разных видов болотных растений и их фракций в зависимости от типа болота, глубины закладки образцов в почву и географической широты (Косых и др., 2009; Вишнякова и др., 2012; Vishnyakova, Mironycheva-Tokareva, 2018) и была модифицирована. Во-первых, установлено, что в болотах с заметной долей осок и пушиц в составе фитоценоза, корни и корневища трав проникают внутрь синтетических мешочков, увеличивая массу образца, что привело к необходимости извлекать живые органы из образцов после их отбора в поле (Коронатова, Шибарева, 2010). Во-вторых, обоснована закладка в эксперимент образцов мохового очёса и торфа в естественном, не высушенном состоянии при условии определения влажности исходного материала (Коронатова, 2010). Кроме того, предложен

лабораторно-инкубационный опыт оценки скорости минерализации торфа, который заключается в определении углекислого газа и метана методом газовой хроматографии в контролируемых лабораторных условиях (Наумов, 2017; 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ СОТРУДНИКАМИ ИПА СО РАН

В результате исследования продукционно-деструкционных процессов в болотах Западной Сибири в течение нескольких десятилетий в лаборатории биогеоценологии ИПА СО РАН накоплен значительный первичный материал (табл. 1), получены количественные данные, часть которых вошла в опубликованные работы. Полученный материал может служить базой для дальнейших экспериментов, анализов и выявления локальных и региональных закономерностей в структуре и функционировании болотных биогеоценозов Западной Сибири, а также быть востребованным в современных климатических проектах.

Таблица 1

Масштаб исследований, проведенных сотрудниками ИПА СО РАН, при изучении продукционно-деструкционных процессов в болотах (данные предоставлены Н.П. Косых и Е.К. Вишняковой)

Зона / подзона	Число ключевых болотных массивов	Географический охват	Годы исследования	
			Запасов и продукции	Деструкции
Лесостепь	5	55°09' – 55°39' с.ш. 79°03' – 81°19' в.д.	2004, 2008, 2010, 2014–2021	2010–2015
Подтайга и южная тайга	5	56°48' – 56°86' с.ш. 78°63' – 82°51' в.д.	1993, 1994, 1997, 1998, 2002, 2004, 2010, 2011, 2013–2020	2000–2007, 2012–2015
Средняя тайга	9	59°96' – 61°26' с.ш. 68°41' – 76°43' в.д.	1999–2001, 2004, 2005, 2008, 2010, 2012, 2015–2020	2003–2007, 2012–2015
Северная тайга	8	62°26' – 63°32' с.ш. 74°57' – 81°51' в.д.	1997–2001, 2004, 2006, 2008, 2010, 2013–2018	2012–2015
Лесотундра	3	65°50' – 65°56' с.ш. 74°57' – 80°14' в.д.	2004, 2006, 2008, 2013–2021	2004–2019

В результате проведенных исследований продуктивности установлено, что на верховых болотах фитомасса и первичная продукция определяются гидрологическим режимом и зависят от болотной микроформы: они максимальны в мезотрофных мочажинах, минимальны в олиготрофных мочажинах и занимают промежуточное положение в рямах и на грядах; основными продуцентами являются сфагновые мхи (Косых, Махатков, 2008; Косых и др., 2009). Для величины прироста сфагновых мхов установлена решающая роль температуры в широком географическом охвате и осадков – на подзональном уровне (Косых и др., 2017а; 2017б). В мерзлотных плоскобугристых болотах, в отличие от сфагновых верховых, основной вклад в продукцию вносят подземные органы сосудистых растений, а запасы фитомассы плоскобугристо-мочажинных комплексов зависят от местообитания (кочка, межкочье, мочажина) (Косых и др., 2008; Kosykh et al., 2008a). В пределах подзоны структура растительного органического вещества закономерно меняется с запада на восток, причём к востоку увеличиваются общий запас и мортмасса, но снижаются фитомасса и первичная продукция, что было показано на примере средней тайги (Kosykh et al., 2008b). Изучение рямов, расположенных в лесостепи, выявило роль пирогенного фактора в структуре растительного вещества, значительное снижение продукционного потенциала сфагновых мхов и увеличение скорости минерализации (Косых, 2009; Миронычева-Токарева и др., 2017); это было подтверждено в лабораторном эксперименте и свидетельствует об утрате углеродпоглощающей функции верховыми болотами лесостепи (Наумов, 2018); также обоснована уязвимость, необходимость мониторинга и охраны этих уникальных объектов (Наумов и др., 2009). В то же время, моделирование углеродного цикла лесостепных рямов показало относительную стабильность и автономность их функционирования в будущем при условии стабильности климатических условий (Naumov et al., 2020).

Скорость деструкции в болотах Западной Сибири зависит от вида растений, фракции и гидрологического режима, который связан с болотной микроформой; также установлена зависимость потери массы при разложении от величины чистой первичной продукции, выделены

группы видов по устойчивости к деструкции (Косых и др., 2009; Вишнякова и др., 2012). Показано, что деструкции подвержен не только свежий растительный опад, но и торф, взятый с полуметровой глубины и заложенный в эксперименте в верхнем аэробном слое болот (Коронатова, 2010). Эти потери могут достигать 50% за два вегетационных сезона и свидетельствуют о потенциальном ослаблении углерод-аккумулирующей функции экосистем в случае снижения уровня болотных вод в результате климатических изменений. Для сфагновых болот с заметным участием травянистой растительности показана роль подземных органов трав в пополнении запаса торфа в верхнем полуметровом слое залежи (Коронатова, Шибарева, 2010).

Полученные результаты позволяют установить изменения продукционно-деструкционных показателей вдоль широтного градиента (табл. 2). Так, запас фитомассы увеличивается в верховых болотах от лесостепи к средней тайге и снижается в северной тайге. В то же время, высокий запас получен в лесотундре, что вероятно связано со сменой доминирования сфагновых мхов лишайниками, а наибольшее значение минимальной величины отмечено в лесостепных рямах. Чистая первичная продукция закономерно увеличивается от лесостепных рямов к болотам в южной и средней тайге и затем снижается в северной тайге и ещё более значительно – в лесотундре. Потери массы при деструкции основных торфообразователей – сфагновых мхов – закономерно снижались в направлении с юга на север. Интересно, что эта тенденция нарушилась между южной и средней тайгой, а минимальные потери были почти одинаковы во всех широтно-климатических зонах и подзонах.

Таблица 2

Некоторые показатели углеродного цикла в верховых болотах Западной Сибири

Зона / подзона	Фитомасса, г/м ²	Продукция, г/м ² в год	Деструкция, % потери массы за 2 года*	Ссылка
Лесостепь	1590-1680	650-680	13-78	Косых, 2009; Наумов и др., 2009; Vishnyakova, Mironycheva-Tokareva, 2018
Южная тайга	360-2600	240-1360	13-47	Косых и др., 2003; Вишнякова и др., 2012; Vishnyakova, Mironycheva-Tokareva, 2018
Средняя тайга	800-3800	490-1200	14-60	Kosykh et al., 2008б; Косых и др., 2009; Косых, Коронатова, 2010; Косых и др., 2018; Vishnyakova, Mironycheva-Tokareva, 2018
Северная тайга	650-1830	350-1100	14-29	Kosykh et al., 2008а; Kosykh et al., 2021; Vishnyakova, Mironycheva-Tokareva, 2018
Лесотундра	800-3100	120-800	10-12	Косых и др., 2008; Наумов и др., 2007; Kosykh et al., 2021; Vishnyakova, Mironycheva-Tokareva, 2018

Примечание. *Данные приведены для сфагновых мхов.

До сих пор распространено мнение, что болота – это малопродуктивные территории. Представленные результаты опровергают это мнение. Надземная продукция болот может превышать надземную продукцию луговой степи в Барабе, а подземная продукция сравнима с таковой в сообществе мелколиственного леса южной тайги (рис. 2).

Следует отметить, что изучение продукционно-деструкционных показателей в болотах проведено сотрудниками ИПА СО РАН также вместе с коллегами из других научных учреждений, например, изучение болотных систем Алтая (Волкова и др., 2010; Косых и др., 2010) и болот разных регионов России (Копотева, Косых, 2011), а полученные данные вошли в глобальные оценки продуктивности и элементного состава сфагновых мхов (Bengtsson et al., 2021; Granath et al., 2018). Отметим также, что изучением продукционно-деструкционных процессов в болотах Западной Сибири занимаются учёные Томского научного центра (Головацкая, 2009; Никонова и др., 2019 и др.), Красноярского научного центра (Ефремов, Ефремова, 2000 и др.) и другие исследователи.

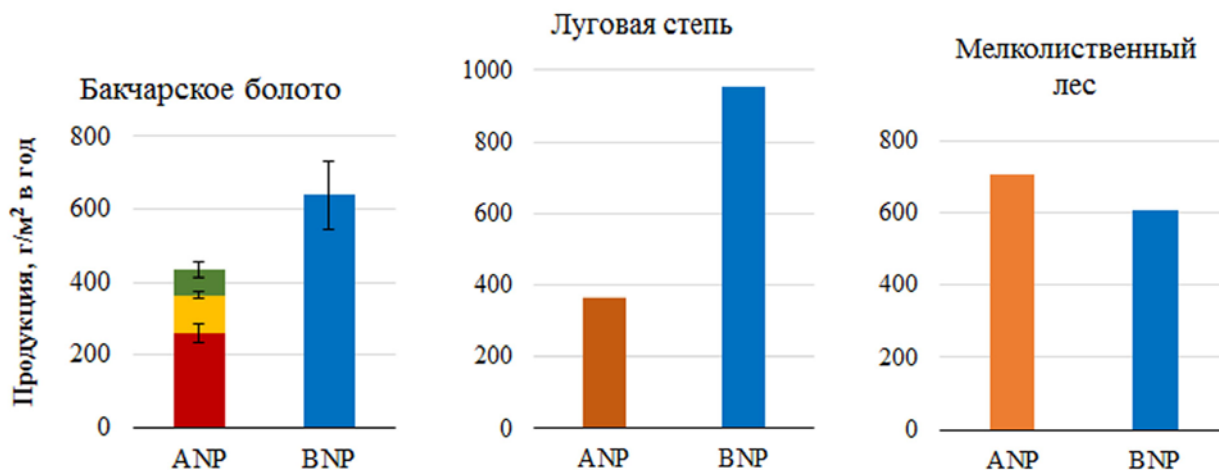


Рисунок 2. Сравнение первичной продукции экосистем юга Западной Сибири. ANP – надземная первичная продукция. BNP – подземная первичная продукция. Бакчарское болото расположено в южной тайге, приведены усреднённые многолетние данные: красным – сфагновые мхи, жёлтым – кустарнички и травы, зелёным – деревья. Луговая степь расположена в лесостепи (Бараба), данные А.А. Титляновой с соавт. (1988), А.А. Титляновой, С.В. Шибаревой (Продуктивность..., 2020). Мелколиственный лес расположен в южной тайге, данные А.А. Титляновой с соавт. (1988), А.А. Титляновой, С.В. Шибаревой (Продуктивность..., 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сотрудниками ИПА СО РАН были дополнены или модифицированы имеющиеся методики определения составляющих углеродного цикла в экосистемах, в частности для определения прироста сфагновых мхов, запасов и продукции подземных органов сосудистых растений, деструкции растительного органического вещества в болотах. Выявлены факторы и закономерности изменения запасов растительного органического вещества, первичной продукции и деструкции вдоль широтного градиента, на региональном подзональном уровне и на локальном уровне одного болотного массива в связи с разницей местообитаний. Продуктивность болот Западной Сибири сравнима с другими экосистемами региона и играет существенную роль в глобальном углеродном цикле.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бегак Д.А. О приросте торфяников // *Торфяное дело*. 1927. № 11. С. 300–306.
2. Вишнякова Е.К., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Динамика разложения растений на болотах Васюганья // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2012. Вып. 7 (122). С. 87–93.
3. Волкова И.И., Волков И.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Кирпотина Л.В., Земцов В.А., Колмакова М.В., Кураев А.В., Захарова Е.А., Кирпотин С.Н. Горная озёрно-болотная система урочища Ештыккель (Горный Алтай) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2010. Т. 1 (9). С. 118–137.
4. Головацкая Е.А. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южнотаёжной подзоны Западной Сибири // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*. 2009. Т. 2. № 1. С. 38–53.
5. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т. Строение и продуктивность сообществ сфагновых мхов на болотах Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2000. Т. 7. № 5. С. 615–626.
6. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. *Динамика органического вещества в процессе торфообразования*. Л.: Наука, 1978. 176 с.
7. Копотева Т.А., Косых Н.П. Сравнительная оценка структуры фитомассы и продуктивности мезотрофных кустарничково-сфагновых болот зоны тайги // *Сибирский экологический журнал*. 2011. № 2. С. 301–307.
8. Коронатова Н.Г. Исследование разложения торфа в болотах методом инкубации сухих и влажных образцов // *Динамика окружающей среды и глобальное изменение климата*. 2010. Т. 1, № 1. С. 65–71.

9. Коронатова Н.Г., Шибарева С.В. Изменение массы торфа в процессе его разложения на болотах Польши и Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Том 3. С. 445–451.
10. Косых Н.П. Биологическая продуктивность болот лесостепной зоны // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2009. Вып. 3 (81). С. 87–90.
11. Косых Н.П., Коронатова Н.Г. Запасы общей фитомассы и чистая первичная продукция болотных экосистем Сургутского Полесья // *Динамика окружающей среды и глобальное изменение климата*. 2010. № 2. С. 79–84.
12. Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Гранат Г. Влияние температуры и осадков на линейный прирост *Sphagnum fuscum* и *S. magellanicum* на территории Западной Сибири // *Экология*. 2017а. № 3. С. 161–170. DOI: [10.7868/S0367059717030088](https://doi.org/10.7868/S0367059717030088)
13. Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Лапина Е.Д., Филиппова Н.В., Вишнякова Е.К., Степанова В.А. Линейный прирост и продукция сфагновых мхов в средней тайге Западной Сибири // *Динамика окружающей среды и глобальное изменение климата*. 2017б. Т. 8, № 1 (15). С. 3–13. DOI: [10.17816/edgcc813-13](https://doi.org/10.17816/edgcc813-13)
14. Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Степанова В.А. Растительность и продуктивность болотных экосистем заповедника «Юганский» // *Динамика окружающей среды и глобальное изменение климата*. 2018. Т. 9. № 1. С. 53–61. DOI: [10.17816/edgcc8950](https://doi.org/10.17816/edgcc8950)
15. Косых Н.П., Махатков И.Д. Структура растительного вещества в лесо-болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2008. Вып. 4 (78). С. 77–80.
16. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Блейтен В. Продуктивность болот южной тайги Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Сер. Биологические науки*. 2003. Приложение № 7. С. 142–152.
17. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Кирпотина Л.В. Продуктивность осоковых болот Горного Алтая // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2010. Вып. 3 (93). С. 87–91.
18. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Биологическая продуктивность болот лесотундры Западной Сибири // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2008. Вып. 4 (78). С. 53–57.
19. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Фитомасса, продукция и разложение растительных остатков в олиготрофных болотах средней тайги Западной Сибири // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2009. Вып. 3 (81). С. 63–69.
20. Ляпунов А.А., Титлянова А.А. Системный подход к описанию обменных процессов в биогеоценозе // *Ботанический журнал*. 1974. Т. 59. № 8. С. 1081–1092.
21. Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П., Вишнякова Е.К., Коронатова Н.Г., Степанова В.А., Сайб Е.А., Покровский О.С. Растительность и растительное вещество лесостепных рямов юга Западной Сибири // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2017. № 3 (203). С. 73–77.
22. Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
23. Наумов А.В. Минерализация торфа в болотных экосистемах (подходы, модели, эксперимент) // Углеродный баланс болот Западной Сибири в контексте изменения климата: сб. матер. Междунар. конф. (Ханты-Мансийск, 19-29 июня 2017 г.) / Под ред. Е.Д. Лапшиной, Н.П. Миронычевой-Токаревой. Томск: Изд-во ТГУ, 2017. С. 88–90.
24. Наумов А.В. Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2002. Т. 9. № 2. С. 313–318.
25. Наумов А.В. Бюджет углерода и выбросы парниковых газов в болотных экосистемах лесостепной зоны (Западная Сибирь) // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. / Под ред. В.Г. Сычева, Л. Мюллера. М.: Изд-во Всероссийского НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2018. Том 1. С. 278–282.
26. Наумов А.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2007. Т. 14. № 5. С. 771–781.
27. Наумов А.В., Косых Н.П., Паршина Е.К., Артымук С.Ю. Верховые болота лесостепной зоны, их состояние и мониторинг // *Сибирский экологический журнал*. 2009. № 2. С. 521–529.
28. Никонова Л.Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таёжной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // *Почвоведение*. 2019. № 9. С. 1092–1103. DOI: [10.1134/S0032180X19090065](https://doi.org/10.1134/S0032180X19090065)
29. *Продуктивность травяных экосистем: справочник* / Составители: А.А. Титлянова, С.В. Шибарева; Почвенный институт имени В.В. Докучаева; Институт почвоведения и агрохимии СО РАН. М.: ООО «Издательство МБА», 2020. 100 с.
30. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.-Л.: Наука, 1965. 251 с.

31. Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. *Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах*. Л.: Наука, 1967. 145 с.
32. Русских И.В., Стрельникова Е.Б., Серебренникова Р.В., Воистинова Е.С., Харанжевская Ю.А. Идентификация углеводов в водах болот южной тайги Западной Сибири // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 4. С. 405–414. DOI: [10.31857/S001675252004007X](https://doi.org/10.31857/S001675252004007X)
33. Серебренникова О.В., Стрельникова Е.Б., Русских И.В., Харанжевская Ю.А., Воистинова Е.С. Сезонная динамика распределения органических соединений в болотных водах южной тайги (Западная Сибирь) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2019. Т. 27 (1). С. 65–72. DOI: [10.15372/KhUR20190110](https://doi.org/10.15372/KhUR20190110)
34. Титлянова А.А. *Биологический круговорот углерода в травяных экосистемах*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 222 с.
35. Титлянова А.А., Афанасьев Н.А., Наумова Н.Б. и др. *Сукцессии и биологический круговорот*. Новосибирск: ВО Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 1993. 157 с.
36. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Снытко В.А. и др. *Биологическая продуктивность травяных экосистем*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 134 с.
37. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Романова И.П. *Подземные органы растений в травяных экосистемах*. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 1996. 128 с.
38. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. Прирост болотных растений // *Сибирский экологический журнал*. 2000. Т. 7. № 5. С. 653–658.
39. Титлянова А.А., Тесаржова М. *Режимы биологического круговорота*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 150 с.
40. Bengtsson F., Rydin H., Baltzer J.L., Bragazza L., Bu Zh.-J., Caporn S.J.M., Dorrepaal E., Flatberg K. I., Galanina O., Galka M., Ganeva A., Goia I., Goncharova N., Hajek M., Haraguchi A., Harris L.I., Humphreys E., Jiroušek M., Kajukalo K., Karofeld E., Koronatova N.G., Kosykh N. P., Laine A.M., Lamentowicz M., Lapshina E., Limpens J., Linkosalmi M., Ma J.-Z., Mauritz M., Mitchell E.A.D., Munir T.M., Natali S.M., Natcheva R., Payne R.J., Philippov D.A., Rice S.K., Robinson S., Robroek B.J.M., Rochefort L., Singer D., Stenøien H.K., Tuittila E.-S., Vellak K., Waddington J.M., and Granath G. Environmental drivers of *Sphagnum* growth in mires across the Holarctic region // *Journal of Ecology*. 2021. V. 109 (1) P. 417–431. DOI: [10.1111/1365-2745.13499](https://doi.org/10.1111/1365-2745.13499)
41. Clymo R.S. The growth of *Sphagnum*: methods of measurement // *Journal of Ecology*. 1970. V. 58(1). P. 13–50.
42. Granath G., Rydin H., Baltzer, J. L., Bengtsson, F., Boncek, N., Bragazza, L., Bu, Z.-J., Caporn, S. J. M., Dorrepaal, E., Galanina, O., Galka, M., Ganeva, A., Gillikin, D. P., Goia, I., Goncharova, N., Hájek, M., Haraguchi, A., Harris, L. I., Humphreys, E., Jiroušek, M., Kajukalo, K., Karofeld, E., Koronatova, N. G., Kosykh, N. P., Lamentowicz, M., Lapshina, E., Limpens, J., Linkosalmi, M., Ma, J.-Z., Mauritz, M., Munir, T. M., Natali, S. M., Natcheva, R., Noskova, M., Payne, R. J., Pilkington, K., Robinson, S., Robroek, B. J. M., Rochefort, L., Singer, D., Stenøien, H. K., Tuittila, E.-S., Vellak, K., Verheyden, A., Waddington, J. M., and Rice, S. K. Environmental and taxonomic controls of carbon and oxygen stable isotope composition in *Sphagnum* across broad climatic and geographic ranges // *Biogeosciences*. 2018. Vol. 15. P. 5189–5202. DOI: [10.5194/bg-15-5189-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-5189-2018)
43. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems of Western Siberia // *Wetlands Ecology and Management*. 2008a. Vol. 16. P. 139–153. DOI: [10.1007/s11273-007-9061-7](https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7)
44. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Peregon A.M., Parshina E.K. Biological productivity of bogs in the middle taiga subzone of Western Siberia // *Russian Journal of Ecology*. 2008b. Vol. 39. № 7. P. 466–474. DOI: [10.1134/S1067413608070023](https://doi.org/10.1134/S1067413608070023)
45. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Stepanova V.A., Kolesnychenko L.G., Khovalyga A.O., Peregon A.M. Plant Organic Matter in Palsa and Khasyreï Type Mires: Direct Observations in West Siberian Sub-Arctic // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. 1612. DOI: [10.3390/atmos12121612](https://doi.org/10.3390/atmos12121612)
46. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Network environment analysis of a model of carbon flows in a peat bog and fen // *Mires and Peat*. 2020. Vol. 26. Article 24. DOI: [10.19189/Map.2019.OMB.StA.1790](https://doi.org/10.19189/Map.2019.OMB.StA.1790)
47. Rydin H., Jørgensen J.K. *The biology of peatlands*. Oxford: Oxford University Press. 2013. 398 p.
48. Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P. *Moss decomposition in Western Siberian mires // Mosses: ecology, life cycle and significance*. New York: Nova Science Publishres Inc., 2018. P. 217–241.

Поступила в редакцию 14.02.2022

Принята 11.03.2022

Опубликована 18.03.2022

Сведения об авторе:

Коронатова Наталья Геннадьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск, Россия); koronatova@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



REVIEW OF STUDIES OF PRODUCTION AND DESTRUCTION PROCESSES IN THE MIRES OF WEST SIBERIA: METHODS AND RESULTS

© 2022 N. G. Koronatova

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: koronatova@issa-siberia.ru

The review discusses the results of research of production and destruction processes involved in the carbon cycle, which were carried out by the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences the bog and palsa complexes of West Siberia. Some characteristic of the carbon cycle in mires, the methods used, and the geographical coverage of the investigations are described. Based on the published results, specific patterns of changes in phytomass, its primary production and destruction along the latitudinal gradient are characterized, and the productivity of bogs and other biogeocenoses of the region is compared.

Key words: primary production; destruction; phytomass; carbon cycle; bog; palsa; West Siberia

How to cite: Koronatova N.G. Review of studies of production and destruction processes in the mires of West Siberia: methods and results // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(2). e170. DOI: [10.31251/pos.v5i2.170](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.170) (in Russian with an English abstract).

REFERENCES

1. Begak D.A. About the growth of peatlands, *Torfyanae delo*, 1927, No. 11, p. 300–306. (in Russian)
2. Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P. Decomposition dynamics of plants of bogs (data: Vasyugan bog), *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2012, No. 7 (122), p. 87–93. (in Russian)
3. Volkova I.I., Volkov I.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Kirpotina L.V., Zemtsov V.A., Kolmakova M.V., Kouraev A.V., Zakharova E.A., Kirpotin S.N. High-land Eshtykyol lake-mire system, mountain Altai, *Tomsk State University Journal of Biology*, 2010, Vol. 1 (9), p. 118–137. (in Russian)
4. Golovatskaya E.A. Biological productivity of oligotrophic and eutrophic mires in the southern taiga of Western Siberia, *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2009, V. 2, No. 1, p. 38–53. (in Russian)
5. Efremov S.P., Efremova T.T. Structure and productivity of *Sphagnum* communities in mires of Western Siberia, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2000, No. 5, p. 615–626. (in Russian)
6. Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., Pyavchenko N.I. *Dynamics of organic matter in the process of peat formation*. Leningrad: Nauka, 1978, 176 p. (in Russian)
7. Kopoteva T.A., Kosykh N.P. Dwarf-shrub-Sphagnum mires in taiga zone: comparison of phytomass structure and productivity, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, No. 2, p. 301–307. DOI: [10.1134/S1995425511020159](https://doi.org/10.1134/S1995425511020159)
8. Koronatova N.G. Investigation of peat decomposition in bogs by method of dry and wet samples incubation, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2010, V. 1, No. 1, p. 65–71. (in Russian)
9. Koronatova N.G., Shibareva S.V. Change of peat mass during decomposition in mires of Poland and West Siberia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2010, Vol. 3, No. 3, p. 312–317. DOI: [10.1134/S1995425510030094](https://doi.org/10.1134/S1995425510030094)
10. Kosykh N.P. Biology productivity of bog in forest-steppe, *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2009, No. 3 (81), p. 87–90. (in Russian)
11. Kosykh N.P., Koronatova N.G. Phytomass and primary production of mire ecosystems in Surgut Polesie, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2010, No. 2, p. 79–84. (in Russian)
12. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Granath G. Effect of Temperature and Precipitation on Linear Increment of *Sphagnum fuscum* and *S. magellanicum* in Western Siberia, *Russian Journal of Ecology*, 2017, Vol. 48, No. 3, p. 173–181. DOI: [10.1134/S1067413617030080](https://doi.org/10.1134/S1067413617030080)
13. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Lapshina E.D., Filippova N.V., Vishnyakova E.K., Stepanova V.A. Linear growth and production of *Sphagnum* mosses in the middle taiga zone of West Siberia, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2017, Vol. 8, No. 1 (15), p. 3–13. DOI: [10.17816/edgcc813-13](https://doi.org/10.17816/edgcc813-13) (in Russian)
14. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Stepanova V.A. Vegetation and productivity of mire ecosystems in the reserve "Yuganskiy", *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2018, Vol. 9, No. 1, p. 53–61. DOI: [10.17816/edgcc8950](https://doi.org/10.17816/edgcc8950) (in Russian)
15. Kosykh N.P., Makhatkov I.D. The structure of plant matter in the forest-mire ecosystems of the middle taiga of Western Siberia, *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2008, No. 4 (78), p. 77–80. (in Russian)
16. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Bleuten V. Productivity of mires of the southern taiga of Western Siberia, *Tomsk State University Journal of Biology*, 2003, Supplement No. 7, p. 142–152. (in Russian)

17. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Kirpotina L.V. Productivity of fen in Gorno-Altai, *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2010, No. 3 (93), p. 87–91. (in Russian)
18. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. Biological productivity of forest-tundra mires in Western Siberia, *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2008, No. 4 (78), p. 53–57. (in Russian)
19. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. Phytomass, production and decomposition of plant matter in oligotrophic bogs of the middle taiga Western Siberia, *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 2009, No. 3 (81), p. 63–69. (in Russian)
20. Lyapunov A.A., Titlyanova A.A. Systematic approach to the study of exchange processes in biogeocoenosis, *Botanicheskii Zhurnal*, 1974, Vol. 59, No. 8, p. 1081–1092. (in Russian)
21. Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Stepanova V.A., Saib E.A., Pokrovskij O.S. Vegetation and plant matter of raised bogs in forest-steppe zone in the south of Western Siberia, *Vestnik of the Orenburg State University*, 2017, No. 3 (203), p. 73–77. (in Russian)
22. Naumov A.V. *Soil Respiration: constituents, ecological functions, geographical patterns*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House, 2009, 208 p. (in Russian)
23. Naumov A.V. *Peat mineralization in mire ecosystems (approaches, models, experiment)*. In: Carbon Balance of Western Siberian mires in the Context of Climate Change: Proc. of the Intern. Conf. (Khanty-Mansiysk, June 19-29, 2017). E.D. Lapshina, N.P. Mironycheva-Tokareva (eds). Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2017, p. 88–90. (in Russian)
24. Naumov A.V. Carbon dioxide and methane in soils and atmosphere of mire ecosystems of Western Siberia, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2002, Vol. 9, No. 2, p. 313–318. (in Russian)
25. Naumov A.V. *Carbon budget and emission of greenhouse gases in mire ecosystems of the forest-steppe zone (Western Siberia)*. In: New Methods and Results of Landscape Studies in Europe, Central Asia and Siberia. V.G. Sychev, L. Muller (eds). Moscow: Publishing House of Pryanishnikov Institute of Agrochemistry, 2018, Vol. 1, p. 278–282. (in Russian)
26. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. Carbon balance in the peat bog ecosystems of Western Siberia, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2007, Vol. 14, No. 5, p. 771–781. (in Russian)
27. Naumov A.V., Kosykh N.P., Parshina E.K., Artymuk S.Yu. Forest-steppe raised bogs, their condition and monitoring, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2009, No. 2, p. 521–529. (in Russian)
28. Nikonova L.G., Golovatskaya E.A., Kur'ina I.V., Kurganova I.N. Decomposition rate of peat-forming plants in oligotrophic bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia: assessment of the effect of water table level and peat deposit temperature, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 9, p. 1101–1111. DOI: [10.1134/S1064229319090060](https://doi.org/10.1134/S1064229319090060)
29. *Productivity of grass ecosystems: Handbook* / Compiled by: Titlyanova A.A., Shibareva S.V. Moscow: OOO Publishing House MBA, 2020, 100 p. (in Russian)
30. Rodin L.E., Bazilevich N.I. *Dynamics of organic matter and the biological cycle of ash elements and nitrogen in the main types of vegetation on the globe*. Moscow-Leningrad: Nauka, 1965, 251 p. (in Russian)
31. Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. *Guidelines for the study of dynamics and biological cycle in phytocenoses*. Leningrad: Nauka, 1967, 145 p. (in Russian)
32. Russkikh I.V., Strel'nikova E.B., Serebrennikova O.V., Voistinova E.S., Kharanzhevskaya Y.A. Identification of hydrocarbons in the waters of raised bogs in the southern taiga of Western Siberia, *Geochemistry International*, 2020, Vol. 58, No. 4, p. 447–455. DOI: [10.1134/S0016702920040072](https://doi.org/10.1134/S0016702920040072)
33. Serebrennikova O.V., Strel'nikova E.B., Russkikh I.V., Kharanzhevskaya Yu.A., Voistinova E.S. Seasonal dynamics of distribution of organic compounds in bog waters of the southern taiga (Western Siberia), *Chemistry for Sustainable Development*, 2019, Vol. 27 (1), p. 53–60. DOI: [10.15372/CSD20190110](https://doi.org/10.15372/CSD20190110)
34. Titlyanova A.A. *Biological carbon cycle in grass biocenoses*. Novosibirsk: Nauka. Siberian branch, 1977, 222 p. (in Russian)
35. Titlyanova A.A., Afanasev N.A., Naumova N.B. et al. *Succession and biological cycle*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 1993, 157 p. (in Russian)
36. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Snytko V.A. et al. *Biological productivity of grass ecosystems*. Novosibirsk: Nauka. Siberian branch, 1988, 134 p. (in Russian)
37. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Romanova I.P. *Below ground organs of plants in grassland ecosystems*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 1996, 128 p. (in Russian)
38. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Mire plants growth, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2000, Vol. 7, No. 5, p. 653–658. (in Russian)
39. Titlyanova A.A., Tesarzhova M. *Biological cycle modes*. Novosibirsk: Nauka. Siberian branch, 1991, 150 p. (in Russian)
40. Bengtsson F., Rydin H., Baltzer J.L., Bragazza L., Bu Zh.-J., Caporn S.J.M., Dorrepaa E., Flatberg K. I., Galanina O., Galka M., Ganeva A., Goia I., Goncharova N., Hajek M., Haraguchi A., Harris L.I., Humphreys E., Jiroušek M., Kajukalo K., Karofeld E., Koronatova N.G., Kosykh N. P., Laine A.M., Lamentowicz M., Lapshina E., Limpens J., Linkosalmi M., Ma J.-Z., Mauritz M., Mitchell E.A.D., Munir T.M., Natali S.M., Natcheva R., Payne R.J., Philippov D.A., Rice S.K., Robinson S., Robroek B.J.M., Rochefort L., Singer D., Stenøien H.K., Tuittila E.-S.,

- Vellak K., Waddington J.M., and Granath G. Environmental drivers of *Sphagnum* growth in mires across the Holarctic region, *Journal of Ecology*, 2021, Vol. 109 (1), p. 417–431. DOI: [10.1111/1365-2745.13499](https://doi.org/10.1111/1365-2745.13499)
41. Clymo R.S. The growth of *Sphagnum*: methods of measurement, *Journal of Ecology*, 1970, Vol. 58(1), p. 13–50.
42. Granath, G., Rydin, H., Baltzer, J. L., Bengtsson, F., Boncek, N., Bragazza, L., Bu, Z.-J., Caporn, S. J. M., Dorrepaal, E., Galanina, O., Galka, M., Geneva, A., Gillikin, D. P., Goia, I., Goncharova, N., Hájek, M., Haraguchi, A., Harris, L. I., Humphreys, E., Jiroušek, M., Kajukalo, K., Karofeld, E., Koronatova, N. G., Kosykh, N. P., Lamentowicz, M., Lapshina, E., Limpens, J., Linkosalmi, M., Ma, J.-Z., Mauritz, M., Munir, T. M., Natali, S. M., Natcheva, R., Noskova, M., Payne, R. J., Pilkington, K., Robinson, S., Robroek, B. J. M., Rochefort, L., Singer, D., Stenøien, H. K., Tuittila, E.-S., Vellak, K., Verheyden, A., Waddington, J. M., and Rice, S. K. Environmental and taxonomic controls of carbon and oxygen stable isotope composition in *Sphagnum* across broad climatic and geographic ranges, *Biogeosciences*, 2018, Vol. 15, p. 5189–5202. DOI: [10.5194/bg-15-5189-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-5189-2018)
43. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems of Western Siberia, *Wetlands Ecology and Management*, 2008a, Vol. 16, p. 139–153. DOI: [10.1007/s11273-007-9061-7](https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7)
44. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Peregon A.M., Parshina E.K. Biological productivity of bogs in the middle taiga subzone of Western Siberia, *Russian Journal of Ecology*, 2008 б, V. 39, No 7, p. 466–474. DOI: [10.1134/S1067413608070023](https://doi.org/10.1134/S1067413608070023)
45. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G., Stepanova V.A., Kolesnychenko L.G., Khovalyg A.O., Peregon A.M. Plant Organic Matter in Palsa and Khasyreï Type Mires: Direct Observations in West Siberian Sub-Arctic, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, 1612. DOI: [10.3390/atmos12121612](https://doi.org/10.3390/atmos12121612)
46. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Network environment analysis of a model of carbon flows in a peat bog and fen, *Mires and Peat*, 2020, Vol. 26, Article 24. DOI: [10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1790](https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1790)
47. Rydin H., Jeglum J.K. *The biology of peatlands*. Oxford: Oxford University Press, 2013, 398 p.
48. Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P. *Moss decomposition in Western Siberian mires*. In: Mosses: ecology, life cycle and significance. New York: Nova Science Publishers Inc., 2018, p. 217–241.

Received 14 February 2022

Accepted 11 March 2022

Published 18 March 2022

About the author:

Koronatova Natalia Gennadevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Biogeocenology, Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); koronatova@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



УГЛЕРОДНЫЙ СТАТУС РОССИИ И ДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ БИОСФЕРЫ

© 2022 А. В. Наумов 

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: anaumov@issa-siberia.ru

В статье рассмотрены острые дискуссионные вопросы оценки углеродного статуса наземных экосистем. Обоснована концепция динамического углеродного баланса в биосфере. Показана ошибочность положения о наземных экосистемах России как абсолютном стоке атмосферного углекислого газа. В свете новой концепции динамического равновесия углеродного цикла рассматриваются оценки годовой первичной продукции (NPP), эмиссии CO₂ с поверхности почвы (дыхание почвы, SR) и содержания углерода в сухом органическом веществе. В современных условиях соотношение NPP/SR~1 является важным количественным критерием, характеризующим углеродный статус природных наземных экосистем. Относительная стабильность климатических параметров тесно связана с большой емкостью природных резервуаров углерода и механизмом системной адаптации биологического круговорота.

Ключевые слова: углеродный баланс; показатели; наземные экосистемы; адаптация; критерий; концепция

Цитирование: Наумов А.В. Углеродный статус России и динамическое равновесие биосферы // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e166. doi: [10.31251/pos.v5i2.166](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.166)

За последние 25 лет с принятием Рамочной конвенции по изменению климата (РКИК) ООН накал дискуссий о необходимости снижения антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу только возрастает. Политико-экономический аспект решения этой глобальной экологической проблемы со всей очевидностью становится преобладающим. Главной причиной потепления климата считается сжигание ископаемого топлива.

Согласно принципам РКИК ООН политика и меры в области защиты климатической системы должны соответствовать конкретным условиям страны. При этом под «климатической системой» понимается совокупность атмосферы, гидросферы, биосферы и геосферы в их взаимодействии. Основными показателями, характеризующими текущее состояние климатической системы, считаются средняя глобальная температура и концентрация углекислого газа атмосферы. В соответствии с принятыми обязательствами страны-участницы разрабатывают проекты и принимают меры по снижению антропогенных выбросов парниковых газов, сохранению и рациональному использованию леса, океана, наземных, прибрежных и морских экосистем.

В конце 90-х годов прошлого столетия появились первые оценки «полного углеродного баланса» для территории Российской Федерации (Nilsson et al., 2000). По расчетам авторов этого проекта, основанных на разного рода модельных показателях для промышленных секторов и наземных экосистем, Россия в 1990 году была чистым источником 527×10^{12} г С, т.е. 527 Тг С. По мнению составителей баланса диапазон неопределенности составляет около 129%. При этом не учитываются возможные отклонения промежуточных статей баланса. Отмечено, что наземные экосистемы действовали как поглотитель 149 Тг С, но в измерениях каждого отдельного процесса могли существовать неизвестные отклонения. В целом представленные оценки, по-видимому, можно использовать в качестве ориентира для понимания порядка величин отдельных показателей. Однако, на наш взгляд, совокупность разнородных величин с неизвестными отклонениями не может характеризовать «полный углеродный баланс» какой-либо территории.

Работа по оценке составляющих биотического круговорота углерода в наземных экосистемах РФ также выполнялась рядом научных институтов РАН в начале 1990-х годов (Заварзин, 1994). В дальнейшем полученные оценки потоков и запасы углерода в разных природных резервуарах уточнялись, корректировались методики балансовых расчетов. Итогом этой большой и ответственной работы стала коллективная монография (Кудяров и др., 2007). Согласно представленным в этой работе данным, территория России является абсолютным стоком в размере 1×10^9 т С/год (1 Гт/год). Этот результат с небольшой корректировкой был подтвержден и в журнальной публикации (Kurganova et al., 2010). В других работах авторы уточненных оценок, составленных по аналогичной методике, также указывают на значительный дисбаланс, т.е.

абсолютный сток углерода в наземные экосистемы России (Shvidenko et al., 2010; Dolman et al., 2012).

Эта оценка, на наш взгляд, не состоятельна в связи с тем, что природные экосистемы РФ в большинстве являются зрелыми, находящимися в состоянии экологического «климакса». В зрелых экосистемах между связанной энергией и энергией, затрачиваемой на поддержание, со временем устанавливается равновесие, а соотношение между общим фотосинтезом и суммарными тратами на дыхание $P/R \sim 1$ (Одум, 1975). Это соотношение предполагает, что в зрелых экосистемах накопленный углерод чистой первичной продукции (NPP) полностью расходуется в процессе дыхания гетеротрофов (HR). Именно разность между этими показателями составляла основную статью дисбаланса в цитированных выше публикациях. Еще раз отметим, что вывод об абсолютном стоке углерода на территории России не согласуется с представлением о зрелых экосистемах.

Кратко коснемся еще одного подхода к оценке углеродного баланса России, основанного на пространственной математической модели глобального биогеохимического цикла углерода (Тарко, 2005). В описании к модели говорится, что вся поверхность Земли была разбита на ячейки размером $0,5 \times 0,5^\circ$. Предполагается, что в каждой ячейке суши имеется растительность одного типа, согласно выбранной классификации. Рост и отмирание растительности, образование и разложение гумуса в каждой ячейке описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений в терминах обмена углеродом между атмосферой, растительностью и почвой. Предполагается, что годовая продукция зависит от средней годовой температуры, годового количества осадков и количества углекислого газа в атмосфере. Всего модель насчитывает около 100 тысяч дифференциальных уравнений.

Не вдаваясь в детали описания модели и обоснования функциональных зависимостей для разных компонентов углеродного цикла, отметим, что основная цель такого моделирования состояла в прогнозировании поведения глобальной системы или территориальных выделов на увеличение содержания CO_2 в атмосфере. Согласно сделанному прогнозу, на территории России с 2000 по 2050 гг. будет происходить увеличение годовой продукции, увеличение биомассы и поглощение углекислого газа из атмосферы. Во всех типах экосистем будет увеличиваться количество гумуса. По модельным расчетам в 2000 г. экосистемами России было поглощено 0,373 Гт С, а промышленные выбросы составили 0,392 Гт С.

Все же оценки, прогнозы и рекомендации, основанные на столь грандиозных моделях, приходится принимать с осторожностью. Здесь мы исходим из того, что каждое уравнение или функциональная зависимость, положенные в основу модели, представляют собой, по сути, предположение о характере многочисленных взаимосвязей между компонентами системы, о совместном влиянии факторов среды на важнейшие экологические процессы с вероятностью существенно меньшей единицы. Очевидно, что вероятность состояния описываемой системы с огромным количеством условий стремится к нулю. Для экологических систем, на наш взгляд, использование минимальных моделей предпочтительнее.

Мы рассмотрели несколько основных обобщающих публикаций авторитетных ученых из ведущих научных учреждений РАН и иностранных авторов по теме углеродного статуса территории Российской Федерации. Выводы, представленные в процитированных публикациях, однозначно указывают на то, что наземные экосистемы России являются абсолютным стоком атмосферного CO_2 . На этом основании отдельные авторы предлагают включить в зачет исполнения Киотского протокола поглощение CO_2 природными экосистемами (Курбатова, Тарко, 2012) и даже ввести «углеродную ренту» за пользование ресурсом (Федоров, 2016; 2017).

Новая концепция углеродного баланса в биосфере. Не согласившись с выводом об абсолютном стоке углерода порядка 0,9-1 Гт С/год в наземные экосистемы РФ (Кудеяров и др., 2007; Kurganova et al., 2010), мы основывались на собственных исследованиях и наблюдениях. Следует принять во внимание, что за многие сотни и даже тысячи лет существования наземные экосистемы Земного шара достигли своего экологического максимума, накопив в биомассе, органических остатках и почве большое количество углерода. По-видимому, дальнейший сток из атмосферы невозможен из-за ограниченности ресурса. Адаптируясь к низкому уровню концентрации углекислого газа в атмосфере, наземные экосистемы сформировали уникальный компенсаторный механизм, позволяющий эффективно использовать высвобождающийся ресурс для поддержания высокого продукционного потенциала (адаптация экосистемного уровня).

Проведенные нами ранее исследования углеродного обмена болот Западной Сибири показали, что более 60% углерода чистой первичной продукции формируется за счет внутренних ресурсов (Наумов, 2003). Для верховых сфагновых болот лесостепной зоны, в условиях недостаточного атмосферного увлажнения, аналогичная оценка может достигать 97-98% (Naumov et al., 2020).

Будем рассматривать выделение углекислого газа с поверхности почвы (дыхание почвы, SR) в качестве высвобождающегося ресурса. Также предполагается, что между NPP и SR имеет место простая функциональная зависимость. Для оценки взаимосвязи между этими показателями мы использовали базы данных по первичной продуктивности (Базилевич, Титлянова, 2008) и дыханию почвы (Raich, Schlesinger, 1992), составленные для наземных экосистем Земли. Массивы данных разбивали на интервалы с шагом один градус в соответствии с географическими координатами. В пределах каждого интервала находили максимальное и минимальное значение и рассчитывали среднее значение показателя. Соотношение между дыханием почвы и первичной продукцией оценивали значением параметра ξ , который рассчитывали также с шагом один градус в пределах всего диапазона имеющихся в распоряжении данных. Несмотря на большое разнообразие экосистем, а также условий их функционирования, статистический анализ выборки данных, имеющихся на начало 21-го века, показал, что для NPP и SR выполняется соотношение: $\xi = 1,00 \pm 0,08 (\bar{A} \pm \sigma)$ (Naumov, 2012).

Аналогично проводили анализ данных, сгруппированных по основным типам экосистем: бореальные леса, пустыни, леса умеренной зоны, травяные экосистемы, влажные тропические леса, северные болота, саванна, тундра, лесные экосистемы Средиземноморья (Наумов, 2016). Для усредненных оценок годовой первичной продукции и дыхания почвы была построена регрессионная зависимость вида $SR [г\ C/(м^2 \cdot год)] = 45,39 \cdot NPP [т/(га \cdot год)]$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,80$. В этом уравнении регрессии годовая продукция выражена в тоннах сухого вещества. При этом коэффициент пропорциональности между SR и NPP оказался в хорошем соответствии с известной величиной содержания углерода в сухой фитомассе (45%) (Лархер, 1978). Это совпадение не является случайным. В свете новой концепции оно отражает глубину адаптационной перестройки, затрагивающей химический состав и структуру растительного покрова всей Земли. Следующим звеном в цепочке фактов, поддерживающих нашу концепцию, является совпадение оценок NPP и SR для всей территории Российской Федерации (Кудеяров и др., 2007).

Таким образом, на трех разных уровнях организации биотического (биологического) круговорота углерода в биосфере: основных типов наземных экосистем, географического распределения локальных потоков углерода и площадной оценки потоков углерода в пределах РФ, выявлено соотношение $NPP/SR \sim 1$. Это соотношение позволяет по-новому взглянуть на углеродный статус России и скорректировать подход к расчету углеродного баланса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наша концепция динамического равновесия наземных экосистем включает как транзитные потоки углерода, так и циклические процессы. Основная особенность новой концепции состоит в том, что устойчивое функционирование углеродного цикла рассматривается как результат системной адаптации планетарного масштаба, позволяющий поддерживать высокий производственный потенциал при ограниченных ресурсах. Сток растворенных и взвешенных веществ водотоками с суши в океан и внутренние водоемы контролируется климатической системой. Относительная стабильность климатических параметров связана с инерцией климатической системы и обусловлена большой емкостью природных резервуаров углерода.

В настоящее время реализуется эффективный механизм, отвечающий за устойчивое функционирование углеродного цикла наземных экосистем. Основным условием поддержания динамического равновесия в биосфере является соотношение $NPP/SR \sim 1$. Паритет между годовой первичной продукцией и суммарной эмиссией CO_2 с поверхности почвы сформировался в ходе эволюции, как системная адаптация к низкой концентрации углекислого газа в атмосфере. Тонкая настройка этого механизма (на молекулярном уровне), по-видимому, затрагивает химический состав живой фитомассы. Таким образом, содержание углерода $\sim 45\%$ в сухом органическом веществе является ключевым фактором динамического углеродного баланса биосферы.

Сбалансированность процессов NPP и SR позволяет наземным экосистемам функционировать в относительно автономном режиме и поддерживать высокий производственный

потенциал независимо от содержания CO₂ в атмосфере. Соотношение P/R~1, предложенное Ю. Одумом для зрелых (равновесных) экосистем (Одум, 1975), относится к биотическим процессам в самой экосистеме (автогенная сукцессия) и не учитывает влияние внешних геохимических факторов, например уровень CO₂ в атмосфере. Таким образом, положительный баланс углерода для территории России за счет «абсолютного стока углерода» в природные экосистемы является ошибкой, как результат неправильной интерпретации экологических принципов.

Признание данной концепции имеет принципиальное значение для правильного понимания углеродного статуса РФ. Накопление углекислого газа в атмосфере происходит в основном в результате антропогенных выбросов, как результат разного рода хозяйственной деятельности человека. В современных условиях природные наземные экосистемы, функционирующие фактически в автономном режиме, оказывают на этот процесс минимальное воздействие. В настоящее время нет достаточно четкого понимания планетарного механизма управления продукционным процессом через содержание углекислого газа в атмосфере. Неизвестно, в каких пределах изменения уровня CO₂ возможен устойчивый режим функционирования биологического круговорота углерода в биосфере. В этом контексте вырисовывается новое научное направление в исследованиях глобальных (планетарных) процессов и явлений.

Предлагаем ввести специальный термин, например «динамическая биосферология», для обозначения нового научного направления, предусматривающего изучение глобальных механизмов динамической устойчивости сухопутных экосистем как компонента климатической системы.

Особое значение данная концепция имеет в связи с недавней инициативой создания так называемых «карбоновых полигонов». Отсутствие единой методологической основы, отечественных приборов и средств наблюдения, четко обозначенной цели создают весьма туманные перспективы для реализации заявленного проекта. Представленная концепция позволила нам получить ответ на вопрос о депонирующем потенциале наземных экосистем России и целесообразности используемых методических подходов. Так, совершенно очевидно, что методы и подходы, основанные на изучении процессов энерго-массопереноса в атмосфере, не позволяют судить о состоянии углеродного цикла наземных экосистем. В лучшем случае такие оценки могут рассматриваться в качестве дополнительной характеристики транзитных потоков, контролируемых климатической системой, и текущего состояния окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. *Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 381 с.
2. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // *Природа*. 1994. № 7. С. 15–18.
3. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. и др. *Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России*. М.: Наука, 2007. 315 с.
4. Курбатова А.И., Тарко А.М. Механизм Киотского протокола: математическое моделирование глобального цикла углерода // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2012. № 1. С. 74–78.
5. Лархер В. *Экология растений*. М.: Мир, 1978. 384 с.
6. Наумов А.В. Особенности круговорота углерода в болотных экосистемах // *Вестник ТГУ. Приложение № 7*. 2003. С. 175–181.
7. Наумов А.В. *Круговорот углерода и динамическое равновесие в биосфере* // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). Доклады Всероссийской научной конференции (Москва, 18–20 октября 2016 г.). М.: Географический факультет МГУ, 2016. С. 49–52. URL: www.geogr.msu.ru/cafedra/soils/geoland2016/
8. Одум Ю. *Основы экологии*. М.: Мир, 1975. 740 с.
9. Тарко А.М. *Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование*. М.: Физматлит, 2005. 232 с.
10. Федоров Б. Г. Карбонная рента (биота России) // *Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн.* 2016. № 3. С. 86–94. [Электронный ресурс]. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>
11. Федоров Б.Г. *Российский углеродный баланс*. М.: Изд-во Научный Консультант, 2017. 82 с.
12. Dolman A. J., Shvidenko A., Shepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M. K., Marchesini L.B., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // *Biogeosciences*. 2012. No. 9. P. 5323–5340. DOI: [10.5194/bg-9-5323-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012)
13. Kurganova I. N., Kudeyarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // *Tellus B*. 2010. No. 62. P. 497–505.

14. Naumov A. New relationship in carbon cycle // *Low Carbon Economy*. 2012. No. 3a. P. 111–114. URL: <http://www.SciRP.org/journal/lce>. DOI: 10.4236/lce.2012.323015
15. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Network environment analysis of a model of carbon flows in a peat bog and fen // *Mires and Peat*. 2020. Vol. 26. Article 24. 18 p. URL: <http://www.mires-and-peat.net/> ISSN 1819-754X International Mire Conservation Group and International Peatland Society. DOI: [10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1790](https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1790)
16. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. *Full Carbon Account for Russia*. Interim Report, IR000-021. Laxenburg, Austria, 2000. 180 p. <http://webarchive.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-00-021>. International Institute for Applied Systems Analysis.
17. Raich J.W., Schlesinger W.H. The Global Carbon Dioxide Flux in Soil Respiration and Its Relation to Vegetation and Climate // *Tellus B*. 1992. Vol. 44. No. 2. P. 81–99. DOI: [10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x)
18. Shvidenko A., Schepaschenko D., Maksyutov S. *Impact of terrestrial ecosystems of Russia on the global carbon cycle from 2003–2008: An attempt of synthesis*. In book: Proceedings of the International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information. (ENVIROMIS-2010, 5–11 July 2010 Tomsk, Russia). Tomsk, 2010. P. 48–52.

Поступила в редакцию 12.01.2022

Принята 10.02.2022

Опубликована 17.02.2022

Сведения об авторе:

Наумов Алексей Владимирович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); anaumov@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

CARBON STATUS OF RUSSIA AND THE DYNAMIC EQUILIBRIUM OF THE BIOSPHERE

© 2022 A. V. Naumov 

*Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia. E-mail: anaumov@issa-siberia.ru*

The article examines the acute debatable issues of assessing the carbon status of terrestrial ecosystems. The concept of dynamic carbon balance in the biosphere is substantiated. The fallacy of the notion that terrestrial ecosystems of Russia represent an absolute sink of atmospheric carbon dioxide is shown. In the light of the new concept of dynamic equilibrium of the carbon cycle, estimates of the annual primary production of NPP, CO₂ emissions from the soil surface (soil respiration) SR and carbon content in dry organic matter are considered. In modern conditions, the ratio NPP/SR–1 is an important quantitative criterion characterizing the carbon status of natural terrestrial ecosystems. The relative stability of climatic parameters is closely related to the large capacity of natural carbon reservoirs and the mechanism of systemic adaptation of the biological cycle.

Key words: carbon balance; indicators; terrestrial ecosystems; adaptation; criterion; concept

How to cite: Naumov A.V. Carbon status of Russia and the dynamic equilibrium of the biosphere // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(2). e166. doi: [10.31251/pos.v5i2.166](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.166) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. *Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial ecosystems*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2008. 381 p. (in Russian)
2. Zavarzin G.A. Carbon cycle in natural ecosystems of Russia, *Priroda*, 1994, No. 7, p. 15–18. (in Russian)
3. Kudryarov V.N., Zavarzin G.A., Blagodatsky S.A., et al. *Carbon pools and fluxes in terrestrial ecosystems of Russia*. Moscow: Nauka Publ., 2007, 315 p. (in Russian)
4. Kurbatova A.I., Tarko A.M. The mechanism of the Kyoto Protocol: mathematical modeling of the global carbon cycle, *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*, 2012, No. 1, p. 74–78. (in Russian)
5. Larcher V. *Plant ecology*. Moscow: Mir Publ., 1978, 384 p. (in Russian)

6. Naumov A.V. Features of the carbon cycle in mire ecosystems, *Bulletin of TSU, Appendix No. 7, 2003, p. 175–181.* (in Russian)
7. Naumov A.V. *The carbon cycle and dynamic equilibrium in the biosphere.* In book: *Geochemistry of landscapes (to the 100th anniversary of A.I. Perelman): Reports of the All-Russian Scientific Conference (Moscow, October 18–20, 2016).* Moscow: Geographical Faculty of Moscow State University, 2016, p. 49–52. URL: www.geogr.msu.ru/cafedra/soils/geoland2016/ (in Russian)
8. Odum Yu. *Fundamentals of ecology.* Moscow: Mir Publ., 1975, 740 p. (in Russian)
9. Tarko A.M. *Anthropogenic changes in global biospheric processes. Mathematical modeling.* Moscow: Fizmatlit Publ., 2005, 232 p. (in Russian)
10. Fedorov B. G. Carbon rent (biota of Russia), *Logging company. inform.: electron. network journal, 2016, No. 3, p. 86–94.* [Electronic resource]. URL: <http://lhi.vniilm.ru/> (in Russian)
11. Fedorov B.G. *Russian carbon balance.* Moscow: Publishing House Scientific Consultant, 2017, 82 p. (in Russian)
12. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Marchesini L.B., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, *Biogeosciences, 2012, No. 9, p. 5323–5340.* DOI: [10.5194/bg-9-5323-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012)
13. Kurganova I.N., Kudryarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian territory, *Tellus B., 2010, No. 62, p. 497–505.*
14. Naumov A. New relationship in carbon cycle, *Low Carbon Economy, 2012, No. 3a, p. 111–114.* URL: <http://www.SciRP.org/journal/lce>. DOI: [10.4236/lce.2012.323015](https://doi.org/10.4236/lce.2012.323015)
15. Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Network environment analysis of a model of carbon flows in a peat bog and fen, *Mires and Peat, 2020, Vol. 26, Article 24, 18 p.* URL: <http://www.mires-and-peat.net/> ISSN 1819-754X International Mire Conservation Group and International Peatland Society. DOI: [10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1790](https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1790)
16. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. *Full Carbon Account for Russia. Interim Report, IR000-021.* Laxenburg, Austria, 2000, 180 p. <http://webarchive.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-00-021>. International Institute for Applied Systems Analysis.
17. Raich J.W., Schlesinger W.H. The Global Carbon Dioxide Flux in Soil Respiration and Its Relation to Vegetation and Climate, *Tellus B., 1992, Vol. 44, No. 2, p. 81–99.* DOI: [10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00001.x)
18. Shvidenko A., Schepaschenko D., Maksyutov S. *Impact of terrestrial ecosystems of Russia on the global carbon cycle from 2003–2008: An attempt of synthesis.* In book: *Proceedings of the International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information. (ENVIROMIS-2010, 5–11 July 2010 Tomsk, Russia).* Tomsk, 2010, p. 48–52.

*Received 12 January 2022
Accepted 10 February 2022
Published 17 February 2022*

About the author:

Naumov Aleksei Vladimirovich – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Biogeocenology in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); anaumov@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)