

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 4, 2022

---

---

### Оригинальные статьи

- Влияние лесных посадок на эмиссию диоксида углерода из почвы в Поволжье и Подонье  
*Д. Г. Замолодчиков, В. В. Каганов, А. С. Мостовая* 339
- Пространственно-временная динамика биологической активности почв в фитогенном поле сосны обыкновенной в средней тайге Карелии  
*Е. В. Мошкина, О. Н. Бахмет, М. В. Медведева, А. Ю. Карпечко, А. В. Мамай* 351
- Влияние гидротермических условий на подстилочных беспозвоночных вырубок и гарей Хибин  
*И. В. Зенкова, И. М. Штабровская* 364
- Влияние интродуцированных древесных растений на свойства черноземов сегрегационных Крыма  
*О. Е. Клименко, Н. И. Клименко, Ю. В. Плугатарь* 381
- Влияние сплошной рубки на дыхание почвы среднетаежного сосняка черничного Республики Коми  
*А. Ф. Осипов* 395
- Пространственная изменчивость элементного состава почв в катене Центрально-Лесного заповедника  
*П. Р. Енчилик, И. Н. Семенков* 407
- Анализ причин продолжающегося формирования многолетней мерзлоты под хвойными лесами в условиях глобального потепления  
*С. А. Гулый, Ю. Б. Скачков, М. С. Рожина* 419
- Продуктивность древесного яруса на верховых болотах в таежной зоне Западной Сибири  
*Н. Г. Корнаторова, Н. П. Косых* 432
- 
-

## CONTENTS

---

---

No. 4, 2022

---

---

### Original Articles

Forest Plantations Affect Carbon Dioxide Emission from Soils in Volga and Don Region <i>D. G. Zamolodchikov, V. V. Kaganov, and A. S. Mostovaya</i>	339
Spatio-Temporal Dynamics of Soils' Biological Activity in Phytogenous Field of Scots Pine in Karelia Republic's Middle Taiga <i>Ye. V. Moshkina, O. N. Bakhmet, M. V. Medvedeva, A. Yu. Karpechko, and A. V. Mamay</i>	351
Hydrothermal Conditions Affecting the Forest Litter Invertebrates in the Cuttings and Burnt Areas of Khibiny Mountains <i>I. V. Zenkova and I. M. Shtabrovskaya</i>	364
Introduced Woody Plants Affect the Haplic Chernozems Characteristics in Crimea <i>O. Ye. Klimenko, N. I. Klimenko, and Yu. V. Plugatar</i>	381
Clear Cuttings Affecting the Soil Respiration of the Middle Taiga Blueberry Pine Forest in the Komi Republic <i>A. F. Osipov</i>	395
Spatial Variability of the Soils' Elemental Composition in the Central Forest Natural Reserve Catena <i>P. R. Enchilik and I. N. Semenov</i>	407
Analysing the Continuation of Permafrost Forming under the Coniferous Forests during the Global Warming <i>S. A. Gulyi, Yu. B. Skachkov, and M. S. Rozhina</i>	419
Forest Stand Productivity on Peat Bogs of Western Siberia's Taiga Zone <i>N. G. Koronatova and N. P. Kosykh</i>	432

---

---

УДК 630\*116.64+504.7

## ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОСАДОК НА ЭМИССИЮ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВЫ В ПОВОЛЖЬЕ И ПОДОНЬЕ<sup>1</sup>

© 2022 г. Д. Г. Замолодчиков<sup>a, b, \*</sup>, В. В. Каганов<sup>a</sup>, А. С. Мостовая<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117997 Россия

<sup>b</sup>Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, Москва, 109028 Россия

\*E-mail [dzamolod@mail.ru](mailto:dzamolod@mail.ru)

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.

После доработки 01.03.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Формирование пула органического углерода почвы определяется балансом входящих и исходящих потоков. Входящие потоки связаны с процессами отмирания и дальнейшего преобразования органического вещества растений, исходящие потоки в первую очередь формируются процессами деструкции органического вещества, хотя во многих экосистемах имеет значение и вынос углерода с водными потоками. Гетеротрофная деструкция почвенной органики вместе с дыханием корней формирует эмиссию диоксида углерода из почвы. Сравнение величин эмиссии в разных местообитаниях позволяет делать заключения о характере действия факторов, контролирующих деструкционные процессы в почве. Измерения эмиссии диоксида углерода из почвы провели камерным методом во второй половине августа 2020–2021 гг. на 5 объектах Воронежской, Волгоградской, Астраханской, Самарской и Ростовской областей. Работы выполняли на парах участков, покрытых травяной растительностью и искусственными лесными насаждениями. Почвенная эмиссия диоксида углерода в лесных насаждениях была значимо выше ( $2.99 \pm 0.26 \text{ г С м}^{-2}$ ) в сравнении с безлесными участками ( $2.20 \pm 0.11 \text{ г С м}^{-2}$ ) ( $P < 0.01$ ). Проведен статистический анализ связи величин эмиссии с температурой почвы на глубине 10 см, объемной влажностью почвы в слое 0–7 см и нормализованным относительным вегетационным индексом (*NDVI*) растительного покрова. Обнаружено, что влажность и *NDVI* были значимыми факторами эмиссии, а температура – незначимым. Результаты, полученные в настоящей работе и доступные в научных публикациях, позволяют заключить, что эмиссия диоксида углерода, как правило, возрастает после конверсии травяного растительного покрова в древесный. Однако возрастание эмиссии не сопровождается потерями запаса углерода почвы, который либо остается постоянным, либо несколько возрастает. Увеличение *NDVI* свидетельствует о возрастании в лесных посадках чистой первичной продукции, то есть измененная экосистема является стоком углерода по совокупности пулов фитомассы и почвы. Такой характер изменения запасов и потоков углерода даже в богатых углеродом аридных почвах делает вполне содержательными масштабные планы по созданию защитных лесных насаждений с целью усиления поглощения углерода.

*Ключевые слова:* лесоразведение, лесополосы, диоксид углерода, эмиссия, почва, черноземы, факторы эмиссии.

DOI: 10.31857/S0024114822040118

Современное глобальное потепление климата приобретает все более выраженный характер и сопровождается усилением ряда негативных эффектов. Аридные регионы являются одними из наиболее уязвимых к изменению климата, особенно при сочетании трендов к увеличению температуры и уменьшению осадков. Именно такая

ситуация наблюдается в южных областях европейской части России (Доклад ..., 2021), что усиливает климатические угрозы для этого важнейшего в сельскохозяйственном отношении региона. Лесомелиорация традиционно рассматривается как способ увеличения продуктивности сельского хозяйства и борьбы с эрозией почвы. Еще в конце XIX века устройство лесных полос, а также проведение иных агролесомелиоративных мероприятий осуществлялось в Нижнем Поволжье выдающимися исследователями В.В. Докучаевым и Н.К. Генко (Розенберг и др., 2018). В 1948 г. было принято постановление “О плане полезащитных лесонасаж-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке темы ГЗ ЦЭПЛ РАН, рег. номер 121121600118-8 “Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем” (полевые работы) и РНФ № 22-27-00641 “Климатические эффекты масштабного лесоразведения в аридных регионах России” (анализ данных).

дений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах Европейской части СССР”, получившее народное название “Сталинский план преобразования природы”. Фактически задача аридного лесоразведения была поставлена более широко: речь шла об улучшении климата целых регионов. Значительная часть масштабных лесных посадок 1950-х гг. сохранилась до настоящего времени, что дает возможность на экспериментально-полевых данных рассмотреть изменения климатических и экологических условий после облесения.

Оценка влияния лесных посадок на свойства почв аридных регионов является популярным направлением почвоведения. Изменения водно-физических свойств почвы под лесными культурами были детально рассмотрены в Каменной степи (Чевердин и др., 2014; Турусов и др., 2020). Изменение различных свойств почв при облесении проанализировано в серии работ по Белгородской обл. (Смирнова и др., 2020; Чендев и др., 2020, 2022). Воздействие лесных посадок на запасы углерода рассмотрены для Нижнего Поволжья и Крыма (Каганов, 2012; Клименко и др., 2021). В этих работах показано, что запасы органического углерода в черноземных почвах под лесными посадками, как правило, несколько увеличиваются в сравнении с аналогичными почвами под степной растительностью, при этом может происходить перераспределение углерода по профилю почвы.

Вывод о том, что лесные посадки на степных почвах положительно сказываются на запасах почвенного углерода, приобретает особую актуальность в свете проектной деятельности по усилению поглощения углерода посредством облесения в целях предотвращения климатических изменений. В России проблематика лесоклиматических проектов приобрела популярность лишь в последние годы в рамках дискуссий по мерам, обеспечивающим развитие низкоуглеродной экономики (Ваганов и др., 2021; Птичников и др., 2021) и адаптации к климатическим рискам (Липка и др., 2021). Однако в зарубежных странах проекты по облесению и лесовосстановлению давно осуществляются как в рамках киотского механизма чистого развития, так и в рамках других международных и национальных программ. Некоторые из таких программ получили мощное научное обеспечение, в частности, китайская программа “Grain for Green” (Deng et al., 2019; Wang et al., 2020). Обобщенные результаты исследований по 619 парам участков контроль-облесение в северном Китае показали, что облесение увеличивает запас углерода при его малом запасе в исходных почвах, но уменьшает при большом (Hong et al., 2020). В этой связи ясно, что вопрос о влиянии лесоразведения

на органическое вещество почвы нельзя считать закрытым.

Формирование пула органического углерода почвы определяется балансом входящих и исходящих потоков. Входящие потоки связаны с процессами отмирания и дальнейшего преобразования органического вещества растений, исходящие потоки в первую очередь формируются процессами деструкции органического вещества, хотя во многих экосистемах имеет значение и вынос углерода с водными потоками. Гетеротрофная деструкция почвенной органики (часто называемая микробным дыханием) вместе с дыханием корней формирует эмиссию диоксида углерода из почвы (часто называемую дыханием почвы). Сравнение величин эмиссии в разных местообитаниях позволяет делать заключения о характере действия факторов, контролирующих деструкционные процессы в почве.

Связь с проблемой глобального потепления, а также технологический прогресс, обеспечивший массовую доступность инфракрасных газоанализаторов, привел к активизации исследований дыхания почвы в XXI веке. Однако исследования влияния лесных посадок на эмиссию CO<sub>2</sub> из почвы для территории России немногочисленны и относятся к уже упоминавшейся территории Каменной степи (Благодатский и др., 2008; Ходжаева, Семенов, 2015). Цель настоящей работы состоит в экспериментально-полевой оценке влияния искусственных лесных насаждений на эмиссию диоксида углерода из почвы в аридных регионах Поволжья и Подонья.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Измерения почвенной эмиссии диоксида углерода выполняли на развернутой в южной части европейской части России сети точек наблюдения (Каганов, 2012). Основной системы объектов стали искусственные лесные насаждения, созданные в начале и середине XX в. в ходе широко-масштабных опытов по облесению лесостепных и степных территорий. Выбор мест измерения проводили на основе метода ключевых участков, с тем чтобы точки измерений обеспечивали необходимый уровень представительности растительного и почвенного покрова для каждого из рассматриваемых объектов.

На участках с лесной растительностью были устроены постоянные пробные площади размером 50 × 50 м с выполнением сплошной перечислительной таксации древостоя. На объекте Зеленый сад, расположенном на территории ГПЗ “Богдинско-Баскунчакский” в Астраханской обл., размер пробной площади изменен на 62.5 × 10 м, что обусловлено конструкцией лесных полос. В качестве контрольных участков были использованы многолетние залежи с зональной степной

растительностью. Некоторые из этих участков периодически используются в качестве сенокосов. Для получения сведений о почвенном покрове на ключевых участках были заложены разрезы с выполнением морфогенетического описания почвенных профилей и установлением классификационной принадлежности рассматриваемых почв. Измерения потоков диоксида углерода проводили во второй половине августа 2020 и 2021 гг. на 5 объектах сети.

Объект Каменная степь располагается в Таловском р-не Воронежской обл. на территории природного заказника “Каменная степь”, вошедшего в состав Воронежского заповедника. Данный объект был создан в конце XIX в. как один из 3 научно-исследовательских участков “Особой экспедиции” В.В. Докучаева. В качестве участка с лесной растительностью нами использована лесная полоса № 40, высаженная в 1903 г. лесничим Н.А. Михайловым. Насаждение располагается на водораздельном участке в виде широкой ленты длиной 725 м и шириной до 130 м, ориентированной с севера на юг. Центральная часть лесной полосы ранее имела разделение на 12 опытных участков, которые представляли собой разнообразные варианты смешения дуба черешчатого (*Quercus robur*) с другими древесными породами. На пробной площади, где выполняли измерения эмиссии диоксида углерода, древесный ярус составляют дуб черешчатый и клен остролистный (*Acer platanoides*) с небольшой примесью вяза гладкого (*Ulmus laevis*). Насаждение преимущественно мертвопокровное, живой напочвенный покров имеет разреженный характер и представлен экземплярами бузины черной (*Sambucus nigra* L.), ландыша майского (*Convallaria majalis* L.) и гравилата городского (*Geum urbanum* L.), а также всходами клена остролистного. Мертвый напочвенный покров (лесную подстилку) формируют листья и мелкие ветви клена остролистного и дуба черешчатого, мощность подстилки составляет 3–5 см. Контрольный участок с травяной растительностью располагается к востоку от лесополосы на многолетней залежи с режимом ежегодного кошения (заповедный участок “Косимая степь”). Растительность представлена разнотравно-злаковыми степными сообществами с богатым видовым составом. Фоновый почвенный покров на объекте представлен черноземом миграционно-мицеллярным (Haplic Chernozem (Loamic, Huperg-humic)).

Объект Козловская лесная дача располагается в Руднянском р-не Волгоградской обл. Облесенный участок находится в центральной части массивного лесного насаждения, которое представляет собой одну из так называемых Генковских лесополос, посаженную в начале XX в. по проекту лесовода Н.К. Генко. Насаждение имеет форму ломаной линии, располагающейся на водоразде-

ле рек Терсы и Щелкана. Протяженность лесополосы — около 7 км, ширина — более 600 м. В составе древесного яруса клен остролистный с небольшой примесью дуба черешчатого. Насаждение мертвопокровное, единично под пологом древостоя отмечаются всходы клена остролистного и экземпляры подмаренника душистого (*Galium odoratum*) Лесная подстилка имеет мощность 2–5 см и состоит из листьев и мелких ветвей клена остролистного. Контрольный участок со степной растительностью расположен к северу от лесного насаждения и представляет собой многолетнюю залежь, используемую в качестве сенокоса. Растительность представлена разнотравно-дерновинно-злаковыми и полынно-злаковыми степными сообществами. Фоновыми почвами на объекте являются черноземы миграционно-мицеллярные (Haplic Chernozem (Loamic, Tonguic)).

Следующий объект находится в Волжском р-не Самарской обл. Лесное насаждение на объекте представлено Тепловской лесополосой № 18, входящей в группу Тепловских лесополос, которые также относятся к Генковским, созданным в конце XIX—начале XX в. Насаждение представляет собой лесной массив длиной 4 км и шириной 675 м, расположенный на водоразделе и ориентированный с запада на восток. В составе древостоя на участке измерений клен остролистный и дуб черешчатый с примесью вяза гладкого. Насаждение мертвопокровное, мощность подстилки до 5 см. Травяной участок располагается к северу от лесополосы и представляет собой многолетнюю залежь. Растительность на контрольном участке разнотравно-злаковая с доминированием вейника наземного (*Calamagrostis epigeios* L.). Почва травяного участка — агрочернозем дернинный агропереуплотненный (Haplic Chernozem (Loamic, Aric)).

Объект Белая Калитва находится в Белокалитвинском р-не Ростовской обл. Часть объекта с древесной растительностью является 1-м участком государственной защитной лесной полосы (ГЗЛП) Белая Калитва—Пенза, высаженной в 50-е гг. XX в. Насаждение имеет вид трех ломаных линий из лесных полос шириной 60 м с расстоянием между полосами 300 м. Точка измерений располагается в восточной линии ГЗЛП, ориентированной с севера на юг. В составе лесного насаждения — ясень обыкновенный, дуб черешчатый, робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.) и клен остролистный, отмечаются отдельные экземпляры абрикоса обыкновенного (*Armeniaca vulgaris*). В живом напочвенном покрове лесополосы присутствуют чесночница черешчатая (*Alliaria petiolata*), марь белая (*Chenopodium album* L.), в местах размыкания древесного полога формируются группы всходов ясени обыкновенного и клена остролистного. Травяной участок расположен западнее, в центральной части межполосного пространства, на многолетней залежи. Раститель-

Таблица 1. Таксационные характеристики лесных участков

Объект	Регион	Координаты, град.		Год таксации	Состав древостоя	Запас древесины, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	Запас сухостоя, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	Показатели по доминирующей породе		
		сев. широты	вост. долготы					возраст, лет	диаметр средний, см	высота средняя, м
Каменная степь	Воронежская обл.	51.028983	40.726155	2020	8Д2Кло ед. Вг	784.0	13.7	118	52.2	32.2
Козловская лесная дача	Волгоградская обл.	50.971120	44.345609	2020	10Кло + Д	360.8	13.5	75	30.8	25.7
Самара	Самарская обл.	52.978029	49.938028	2021	6Кло4Д ед. Вг	349.1	4.8	73	26.9	23.4
Белая Калитва	Ростовская обл.	48.257966	40.672617	2021	4Ясо4Д2А + Кло ед. Аб	178.3	4.2	58	19.1	12.2
Баскунчак	Астраханская обл.	48.056400	46.897052	2020	10Вп	91.1	21.5	61	21.2	8.8

Примечание. Обозначение древесных пород: Д – дуб черешчатый; Кло – клен остролистный; Вг – вяз гладкий; Вп – вяз приземистый; Ясо – ясень обыкновенный; А – робиния псевдоакация; Аб – абрикос обыкновенный.

ность разнотравно-злаковая, одним из доминирующих видов является вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* L.). Фоновыми почвами объекта являются псаммоземы (Rubic Arenosol (Humic)).

Последний из рассматриваемых объектов находится на территории Государственного природного заповедника “Богдинско-Баскунчакский” в Ахтубинском р-не Астраханской обл. Участки располагаются на территории бывшей Богдинской опытной станции “Зеленый сад”, где в середине XX в. изучали рост разнообразных древесных пород в условиях полупустыни. Лесное насаждение, в котором проводили измерения, представляет собой узкую (до 12 м) защитную лесополосу из вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.), ориентированную с северо-запада на юго-восток. Под древесным пологом отмечают марь белая и ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana*). Растительность травяного участка, расположенного восточнее лесополосы, сильно изрежена и представлена преимущественно полынью малоцветковой (*Artemisia pauciflora*) и полынью Лерхе (*Artemisia fragrans*), между экземплярами полыни отмечают участки почвы, не покрытые растительностью. Фоновыми почвами объекта являются бурые аридные гипс-содержащие (Protic Gypsic Arenosol).

Измерения проводили камерным методом с использованием портативного газоанализатора, смонтированного на базе сенсора AZ7752. Детальное описание приборной базы и подхода к расчету потоков приведено в работе Д.В Карелина и др. (2014). Концентрацию диоксида углерода измеряли в пластиковых трубах диаметром 11 см и высотой 15–20 см. Трубы вкапывали в почву на

глубину 5 см не менее чем за 12 ч до начала измерения и удаляли надземные части растений. При измерении трубу герметично накрывали пластиковой крышкой, соединенной шлангами с газоанализатором и снабженной вентилятором. Экспозиция крышки на базе составляла около 2 мин, отсчеты концентрации диоксида углерода записывали через каждые 20 с. Одновременно с измерениями концентрации диоксида углерода регистрировали температуру приземного слоя воздуха на высоте 30 см и температуру почвы на глубине 10 см с помощью термометра Checktemp 1, а также объемную влажность почвы в слое 0–7 см с помощью влагомера НН2 путем прокола почвы сверху. Одновременно на каждом лесном и травяном участке использовали по 9–10 труб, измерения на каждой трубе проводили 3 раза за сутки (около 10:00, 14:00 и 18:00). При обработке сначала усредняли все значения, полученные на данном участке в данный срок. Это усредненное значение использовали в дальнейшем анализе при проверке статистических гипотез и построении регрессионных уравнений. Единицей измерения потока CO<sub>2</sub> в настоящей работе выбраны г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> как наиболее часто употребляемые в научных публикациях, хотя фактически приводится оценка мгновенных, а не суточных значений.

Регистрируемая при проведении измерений потоков диоксида углерода влажность почвы характеризует лишь верхний слой почвы толщиной 0–7 см, в то время как влажность нижних слоев почвы может отличаться от поверхностной. В тех ситуациях, когда на объекте устраивали почвенные разрезы для отбора образцов в дни, близкие к

периоду измерения потоков, осуществляли измерения влажности почвы влагомером HH2 путем горизонтальных проколов стенки разреза. Всего проводили по 5 проколов в слоях 0–10, 11–20, 21–30, 31–40, 41–50, 51–75, 75–100 см.

В качестве дополнительного фактора, который может влиять на величину почвенной эмиссии диоксида углерода, рассматривали нормализованный относительный вегетационный индекс (*NDVI*). Значения *NDVI* определены с помощью ресурса OneSoil (2022) для участков размером примерно 50 × 50 м, соответствовавших пробным площадям в лесных насаждениях либо включавших точки измерения эмиссии на площадях с травяной растительностью. Регистрация *NDVI* проведена во второй половине августа 2021 г., фенологически соответствующей периоду проведения измерений потоков.

Предварительную обработку данных (расчет потоков по изменению концентраций, вычисление средних значений и т.д.) проводили в пакете Microsoft Office Excel 2010. В качестве меры неопределенности использовали стандартную ошибку среднего. Перед тестом на равенство выборочных средних по критерию Стьюдента проводили проверку равенства дисперсий по критерию Фишера. Многофакторный регрессионный анализ осуществляли в пакете Statsoft Statistica 10.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Хорошо известно, что лесные насаждения смягчают температурные условия местности. Это положение вполне справедливо и для ограниченного массива температурных данных, полученного нами во второй половине августа 2020 и 2021 гг. во время проведения измерений почвенной эмиссии. Средняя температура приземного слоя воздуха в лесных насаждениях составила  $23.0 \pm 0.05^\circ\text{C}$  при  $25.1 \pm 0.31^\circ\text{C}$  на участках с травяной растительностью, различия статистически значимы ( $P < 0.01$ ). Разница между температурами почвы на глубине 10 см оказалась еще выше в сравнении с воздухом:  $17.1 \pm 0.26$  и  $22.1 \pm 0.13^\circ\text{C}$  на лесных и травяных участках соответственно ( $P < 0.01$ ). Смягчающее действие лесного насаждения было тем сильнее, чем выше температура воздуха либо почвы (рис. 1а и 1б). Отметим, что замеры температуры проведены в светлое время суток второй половины августа, поэтому значительное влияние лесного насаждения на температуру почвы связано в первую очередь с затенением кронами поверхности почвы и предотвращением прямого нагрева солнцем.

Несколько неожиданно объемная влажность верхнего слоя почвы (рис. 1в) в лесных насаждениях ( $5.3 \pm 0.21\%$ ) была значимо меньше, чем на безлесных участках ( $7.4 \pm 0.19\%$ ) ( $P = 0.02$ ). Такая

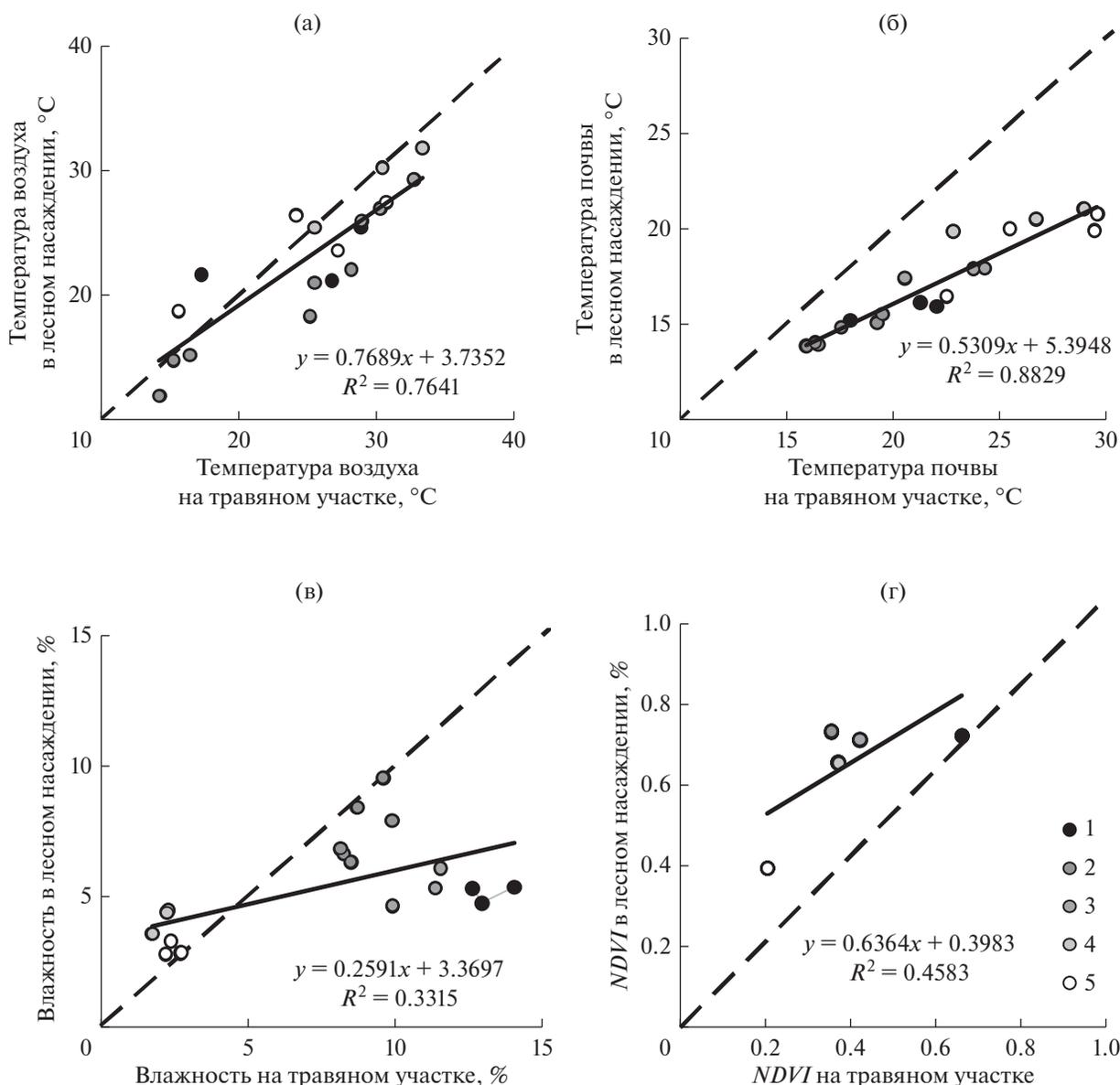
ситуация входит в противоречие с известными представлениями о благоприятном влиянии лесных насаждений на гидрологический режим почвы. Однако оценка влажности по профилю почвы (рис. 2) показала, что в слоях 10–50 см влажность почвы под лесными насаждениями превышает таковую под травяной растительностью. Средняя влажность по профилю почвы под лесными участками составляла в Каменной степи  $12.0 \pm 0.6\%$ , на Козловской лесной даче –  $10.3 \pm 0.5\%$ , под травяными участками  $10.4 \pm 0.7$  и  $7.3 \pm 0.3\%$  соответственно, различия в парах участков были статистически значимы ( $P < 0.02$ ).

*NDVI* (рис. 1г) лесных участков составлял  $0.642 \pm 0.202$ , а травяных –  $0.383 \pm 0.202$ , различия значимы ( $P < 0.01$ ). Как хорошо известно, *NDVI* тесно связан с продукционными характеристиками растительного покрова. Поскольку *NDVI* лесных участков был в 1.7 раза выше, чем травяных, можно заключить, что первичная продуктивность лесных насаждений заметно превышает таковую для травяных участков.

Почвенная эмиссия диоксида углерода в лесных насаждениях значимо выше ( $2.99 \pm 0.26 \text{ г С м}^{-2}$ ) в сравнении с безлесными участками ( $2.20 \pm 0.11 \text{ г С м}^{-2}$ ) ( $P < 0.01$ ). Размах значений эмиссии из почвы под лесными насаждениями составил  $1.36 \pm 0.13 - 5.37 \pm 1.04 \text{ г С м}^{-2}$ , в то время как на травяных участках этот размах был  $0.61 \pm 0.05 - 4.77 \pm 0.65 \text{ г С м}^{-2}$  (рис. 3). Разница между максимальным и минимальным значениями по совокупностям лесных и травяных участков оказалась очень близкой –  $4.00$  и  $4.16 \text{ г С м}^{-2}$  соответственно. Это означает, что факторы, контролирующие величины почвенной эмиссии, скорее всего, действуют сходным образом на лесных и травяных участках.

Рассмотрим результаты однофакторного линейного регрессионного анализа, показывающего связь почвенной эмиссии с величинами измеренных экологических факторов. Для температуры почвы получен парадоксальный результат (рис. 4а): как на лесных, так и на травяных участках эмиссия отрицательно сопряжена с температурой почвы, причем для лесных участков эта сопряженность является статистически значимой ( $P = 0.01$ ). Конечно же, этот результат не опровергает типовую экспоненциальную зависимость дыхания почвы от температуры, установленную во множестве работ и активно используемую в моделировании (Lloyd, Taylor, 1994; Raich, Potter, 1995). В нашем случае вариации почвенной эмиссии за счет других факторов были намного выше и полностью замаскировали реальную картину воздействия температурного фактора.

При однофакторном регрессионном анализе более значимое влияние на величину эмиссии оказала влажность (рис. 4б), в диапазоне от 1.7 до



**Рис. 1.** Сравнение температур воздуха (а) и почвы (б), влажности почвы (в) и *NDVI* (г) на травяных и лесных участках. Пунктир соответствует линии  $y = x$ . Объекты: 1 – Каменная степь; 2 – Козловская лесная дача; 3 – Самара; 4 – Белая Калитва; 5 – Баскунчак.

14.1% ее влияние было положительным и статистически значимым как для лесных, так и травяных участков ( $P < 0.01$ ). Для описания зависимости почвенной эмиссии от влажности почвы обычно используют унимодальные функции (Valogh et al., 2011). Это означает, что имеется оптимальный диапазон влажности с максимальными значениями эмиссии, в то время как значения влажности, меньшие или большие оптимального диапазона, приводят к снижению эмиссии. В нашем случае имели место небольшие значения влажности, и именно их географические вариации сказывались на почвенной эмиссии, маскируя влияние температуры. Точно такая же ситуа-

ция описана для пойменных средиземноморских лесов (Chang et al., 2014). Оценка пороговой влажности почвы, ниже которой ее влияние на величину эмиссии преобладает над температурой, в цитируемой работе составляет 17–20%. В нашем случае значения влажности поверхностного слоя почвы не превышали 10% на лесных и 14% на травяных участках.

Напомним, что и влажность, и температура почвы были меньше на лесных участках в сравнении с травяными. Поэтому эти факторы не могут объяснить того, почему же почвенная эмиссия выше в лесных насаждениях. И здесь приобретает

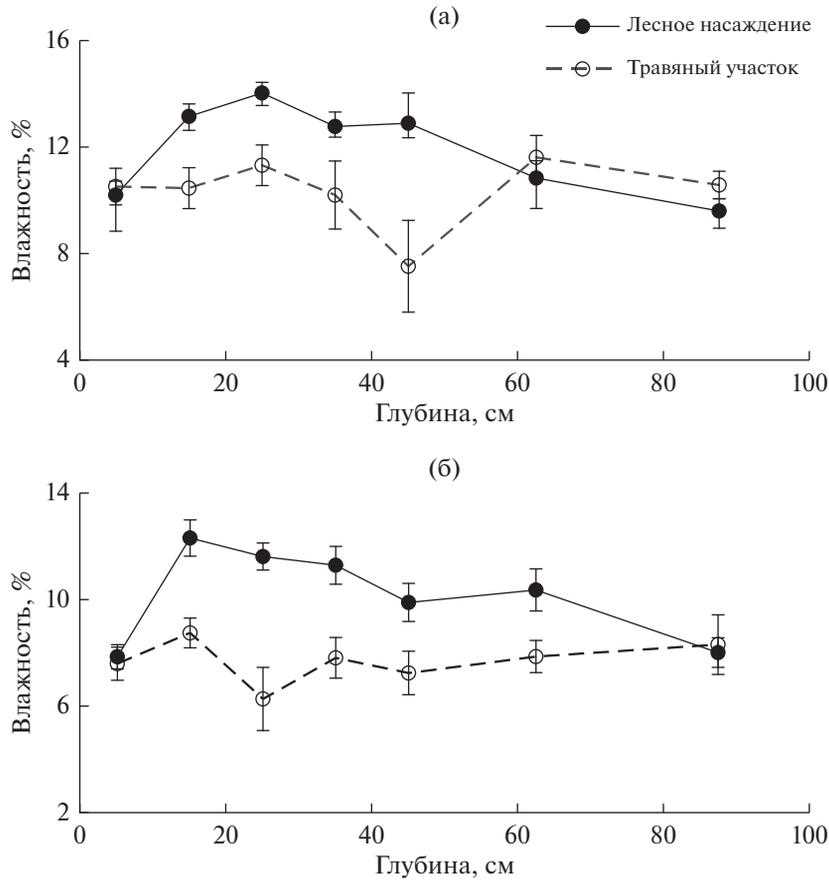


Рис. 2. Влажность по слоям почвы для объектов Каменная степь (а) и Козловская лесная дача (б).

особое значение *NDVI*, значения которого выше именно на лесных участках. Почвенная эмиссия демонстрирует статистическую значимую связь с *NDVI* ( $P < 0.01$ ) как на лесных, так и на травяных

участках (рис. 4в). Эта связь, с одной стороны, формируется за счет того, что лесные насаждения обладают большей биомассой, чем травяные участки. Наличие большей массы фотосинтезирующих органов приводит к большему *NDVI*, а наличие большей массы корней – к повышенной эмиссии диоксида углерода из почвы, включающей дыхание корней. В то же время повышенная величина фотосинтеза вызывает увеличение выделения в почву корневых экссудатов, легко усваиваемых микроорганизмами почвы, а значит, и возрастание гетеротрофной компоненты дыхания (Sun et al., 2017).

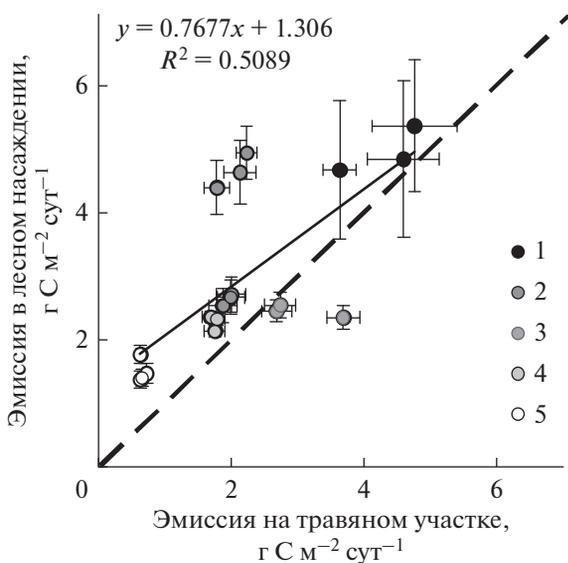
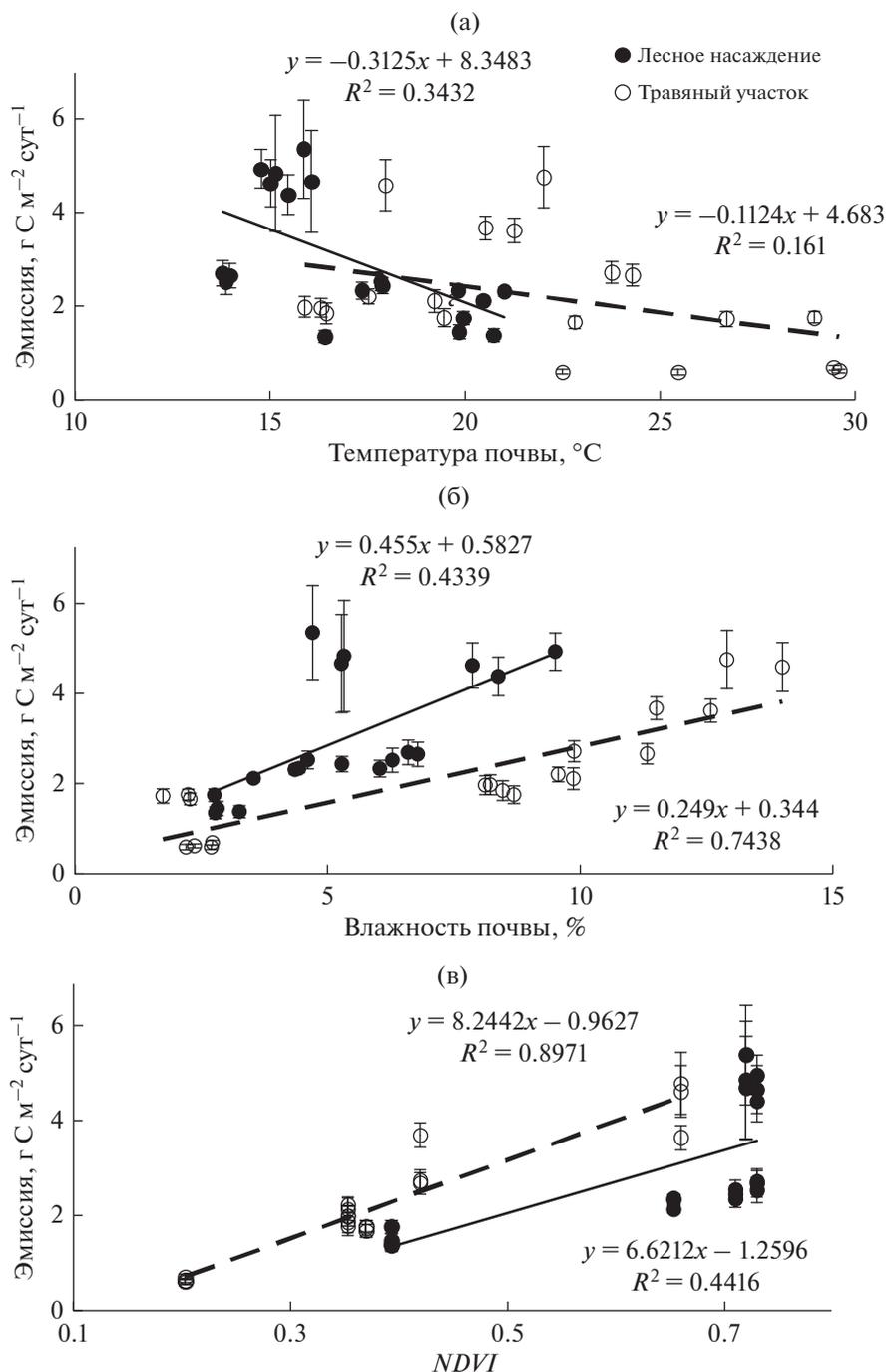


Рис. 3. Сравнение величин эмиссии диоксида углерода из почвы на травяных и лесных участках. Обозначения объектов как на рис. 1.

Наличие фактора, отражающего различие величин эмиссии на лесных и травяных участках, позволяет сформулировать единое регрессионное уравнение, описывающее весь полученный массив данных. Зависимой переменной служит величина почвенной эмиссии диоксида углерода ( $SR$ , г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>), независимыми – температура почвы на глубине 10 см ( $T_s$ , °С), объемная влажность почвы в слое 0–7 см ( $SM$ , %) и *NDVI*. Предварительный регрессионный анализ показал, что вклад переменной  $T_s$  незначим, потому в финальном уравнении были оставлены только независимые переменные  $SM$  и *NDVI*:



**Рис. 4.** Связь величин эмиссии диоксида углерода из почвы с температурой почвы (а), влажностью почвы (б) и *NDVI* (в) на травяных и лесных участках.

$$SR = -0.714 + 0.148SM + 4.61NDVI, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.72, n = 38, P < 0.01.$$

Коэффициент детерминации уравнения (1) равен 0.72, что свидетельствует о хорошей степени описания вариации исходных данных. Обычно такие коэффициенты детерминации получают при моделировании динамики почвенной эмис-

сии в пределах одного местообитания, в то время как при попытках описания величин эмиссии для совокупности местообитаний встречаются некоторые трудности. Переменная *NDVI* в нашем случае позволяет охарактеризовать специфику исследованных местообитаний. Сравнение исходных значений эмиссии и рассчитанных по найденному уравнению (рис. 5) показывает, что

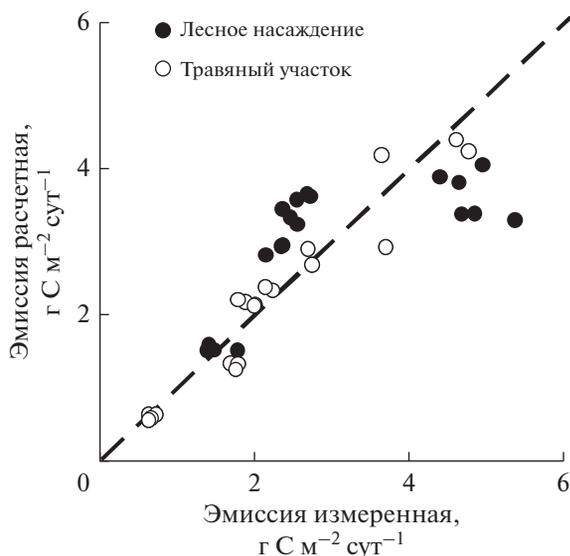


Рис. 5. Сравнение расчетных и измеренных величин эмиссии диоксида углерода из почвы.

расчетные значения для лесных и травяных участков действительно формируют единое облако. Следует напомнить, что наши измерения были проведены во второй половине августа, то есть ближе к концу вегетационного сезона. В какой степени рассмотренный набор факторов ( $T_s$ ,  $SM$ ,  $NDVI$ ) достаточен для описания сезонной динамики эмиссии по совокупности местообитаний, покажут будущие исследования.

Сравним полученные нами величины эмиссии из черноземных почв с данными других исследователей. Для удобства такого сравнения исходные авторские единицы измерения потоков были пересчитаны нами в  $г C м^{-2} сут^{-1}$ . Результаты двухлетних полевых наблюдений за эмиссией  $CO_2$  из черноземных почв Тунгуйской котловины Забайкалья (Чимитдоржиева, Чимитдоржиева, 2010) выявили высокую сезонную изменчивость почвенной эмиссии диоксида углерода. В целинных черноземах максимальные величины наблюдались в июне-июле и составляли  $5-7 г C м^{-2} сут^{-1}$ . Во второй половине августа происходило заметное уменьшение до  $2.0-2.5 г C м^{-2} сут^{-1}$ . Примерно такие же значения были найдены для 20-летних залежей на каштановых почвах Тунгуйской котловины (Чимитдоржиева, 2010). Цитируемые величины близки к середине интервала значений эмиссии, найденных нами для травяных участков. По мнению авторов цитируемых работ, весной и осенью преимущественное влияние на эмиссию оказывала температура, летом — влажность. В нашем случае влажность оставалась ведущим фактором эмиссии во второй половине августа.

Почвенная эмиссия в некосимой степи на типичном черноземе Центрально-Черноземного

заповедника в мае-июне составляла  $6.5 г C м^{-2}$  (Саржанов и др., 2015). Эта оценка заметно выше приводимых нами, что связано с сезонной динамикой эмиссии. В работе Н.Д. Ананьевой и др. (2020), также выполненной в Центрально-Черноземном заповеднике, эмиссия из черноземов типичных для начала сентября оценивается под целинной степью в  $4.6 г C м^{-2}$ , а под широколиственным лесом — в  $5.3 г C м^{-2}$ . Указанные величины близки к верхнему диапазону наших оценок. Сентябрьские значения эмиссии были выше в широколиственном лесу, однако в целом за теплый сезон (май-октябрь) эмиссия оказалась больше на степном участке.

В работе В.М. Семенова и др. (2018) приводятся значения дыхания почвы на единицу массы, измеренные в лабораторных условиях для образцов с удаленными остатками растений. Для Воронежской области дыхание чернозема типичного под старовозрастной лесной полосой по слоям почвы было на 13–33% выше, чем в черноземе обыкновенном под косимой залежью.

Обширный материал для сравнений дают работы, выполненные в Китае. Эмиссия диоксида углерода из палевых почв Лессового плато было на 36% выше в лесных посадках в сравнении с травяными залежами (Zhang et al., 2015). В другой работе, выполненной на Лессовом плато, дыхание почвы на участках, облесенных робинией лжеакацией, на 3.5% превышало поток из почвы под травяной растительностью (Zhang et al., 2021). В умеренной зоне Китая годовое дыхание почвы возросло на 3, 6, 14 и 22% после конверсии травяных участков в плантации вечнозеленых хвойных, кустарников, листопадных хвойных и лиственных пород соответственно (Wang et al., 2013).

Однако в регионе Кокимбо (Чили) дыхание серо-бурых пустынных почв на облесенных участках было на 14% меньше в сравнении с почвой под исходной травяно-кустарниковой растительностью (Perez-Quezada et al., 2012). В этом исследовании влажность в течение всего года была более важным фактором динамики дыхания, чем температура.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в настоящей работе и доступные в научных публикациях, позволяют заключить, что эмиссия диоксида углерода, как правило, возрастает после конверсии травяного растительного покрова в древесный. Однако возрастание эмиссии не сопровождается потерями запаса углерода почвы, который либо остается постоянным, либо несколько возрастает. Такая ситуация связана с увеличением первичной продукции в лесных посадках по сравнению с исходным травяным растительным покровом. Данный

характер изменения запасов и потоков углерода даже в богатых углеродом аридных почвах делает вполне содержательными масштабные планы по созданию защитных лесных насаждений с целью усиления поглощения углерода, а также адаптации к изменениям климата.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность О.В. Честных (МГУ имени М.В. Ломоносова) за участие и помощь в проведении полевых работ, Н.Г. Пирогову (ГПЗ “Богдинско-Баскунчакский”) за организационную поддержку измерений на территории заповедника

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., Васенев В.И.* Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
- Благодатский С.А., Богомоллова И.Н., Благодатская Е.В.* Микробная биомасса и кинетика роста микроорганизмов в черноземах при различном сельскохозяйственном использовании // Микробиология. 2008. Т. 77. № 1. С. 113–120.
- Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Пыжжев А.И.* Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1096–1109.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 г. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Каганов В.В.* Изменение экосистемных запасов углерода при облесении в степной и полупустынной зонах Европейской части России // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 7–12.
- Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO<sub>2</sub> из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
- Клименко О.Е., Клименко Н.И.* Изменение свойств агро-черноземов сегрегационных Крыма под влиянием различных лесонасаждений // Почвоведение. 2021. № 5. С. 606–619.
- Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолотчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546.
- Птичкинов А.В., Шварц Е.А., Кузнецова Д.А.* О потенциале поглощения парниковых газов лесами России для снижения углеродного следа экспорта отечественной продукции // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 181–184.
- Розенберг Г.С., Саксонов С.В., Сенатор С.А.* Запоздалый опыт экологических экспертиз глобальных планов преобразования природы в России // Вопросы степеведения. 2018. № 14. С. 15–35.
- Семенов В.М., Козут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах Европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472.
- Саржанов Д.А., Васенев В.И., Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р.* Краткосрочная динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO<sub>2</sub> почвами естественных и городских экосистем Центрально-Черноземного региона // Почвоведение. 2015. № 4. С. 469–478.
- Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г.* Влияние полезащитных лесных насаждений на локальное разнообразие почв (Белгородская область) // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1041–1052.
- Турусов В.И., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В.* Изменения физических свойств черноземов сегрегационных в агролесоландшафтах Центрального Черноземья // Известия высших учебных заведений. Лесной журн. 2020. № 4(376). С. 95–112.
- Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496–1504.
- Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г., Воронин Д.А.* Роль лесных насаждений в изменении свойств черноземов // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 2. С. 11–14.
- Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Соэр Т.Д., Заздравных Е.А., Белванцев В.Г., Смирнова М.А.* Изменение лесостепных черноземов под влиянием лесополос на юге Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2020. № 8. С. 934–947.
- Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Лебедева М.П., Плотникова О.О., Заздравных Е.А., Шаповалов А.С.* Ранние стадии эволюции черноземов под лесной растительностью (Белгородская область) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 387–404.
- Чимитдоржиева Э.О.* Продуцирование диоксида углерода сухостепными почвами Забайкалья // Агрохимический вестник. 2010. № 4. С. 33–35.
- Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д.* Особенности эмиссии углекислого газа из мучнистокарбонатных черноземов Тугнуйской котловины Забайкалья // Агрохимия. 2010. № 11. С. 45–49.
- Balogh J., Pintér K., Fóti Sz., Cserhalmi D., Papp M., Nagy Z.* Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands // Soil Biology and Biochemistry. 2011. V. 43. № 5. P. 1006–1013.
- Chang C. T., Sabatè S., Sperlich D., Poblador S., Sabater F., Gracia C.* Does soil moisture overrule temperature dependence of soil respiration in Mediterranean riparian forests? // Biogeosciences. 2014. V. 11. P. 6173–6185.
- Deng L., Kim D.-G., Li M., Huang C., Liu Q., Cheng M., Shangguan Z., Peng C.* Land-use changes driven by “Grain for Green” program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China // Global and Planetary Change. 2019. V. 177. P. 101–115.
- Lloyd J., Taylor J.A.* On the temperature dependence of soil respiration // Functional Ecology. 1994. V. 8. P. 315–323.
- Hong S., Yin G., Piao S., Dybzinski R., Cong N., Li X., Wang K., Peñuelas J., Zeng H., Chen A.* Divergent responses of soil organic carbon to afforestation // Nature Sustainability. 2020. V. 3. P. 694–700.
- OneSoil. 2022. URL: <https://onesoil.ai/ru> (дата обращения: 21.02.2022)
- Perez-Quezada J.F., Bown H.E., Fuentes J.P., Alfaro F.A., Franck N.* Effects of afforestation on soil respiration in an

- arid shrubland in Chile // *J. Arid Environments*. 2012. V. 83. P. 45–53.
- Sun L., Ataka M., Kominami Y., Yoshimura K. Relationship between fine-root exudation and respiration of two *Quercus* species in a Japanese temperate forest // *Tree Physiology*. 2017. V. 37. P. 1011–1020.
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. V. 9. № 1. P. 23–36.
- Wang J., Feng L., Palmer P.I., Liu Y., Fang S., Bösch H., O'Dell C.W., Tang X., Yang D., Liu L., Xia C. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data // *Nature*. 2020. V. 586. P. 720–723.
- Wang W., Zeng W., Chen W., Zeng H., Fang J. Soil respiration and organic carbon dynamics with grassland conversions to woodlands in temperate China // *PLOS ONE*. 2013. V. 8. № 8. Art. No e71986.
- Xiao H.B., Shi Z.H., Li Z.W., Chen J., Huang B., Yue Z.J., Zhan Y.M. The regulatory effects of biotic and abiotic factors on soil respiration under different land-use types // *Ecological Indicators*. 2021. V. 127. Art. No 107787.
- Zhang Y., Guo S., Liu Q., Jiang J., Wang R., Li N. Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau // *Ecological Engineering*. 2015. V.74. P. 196–205.

## Forest Plantations Affect Carbon Dioxide Emission from Soils in Volga and Don Region

D. G. Zamolodchikov<sup>1, 2, \*</sup>, V. V. Kaganov<sup>1</sup>, and A. S. Mostovaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

<sup>2</sup>Higher School of Economics, Pokrovskiy blvd., 11, Moscow, 109028 Russia

\*E-mail dzamolod@mail.ru

The formation of a soil organic carbon pool is determined by the balance of incoming and outgoing fluxes. The incoming fluxes are associated with the processes of dying off and further transformation of the organic matter of plants, the outgoing fluxes are primarily formed by the processes of organic matter destruction, although in many ecosystems the removal of carbon with water flows is also important. Heterotrophic destruction of soil organic matter, together with roots respiration, forms the emission of carbon dioxide from the soil. Comparing the emission values in different habitats makes it possible to draw conclusions about the nature of the factors that control the degradation processes in the soil. Measurements of carbon dioxide emissions from the soil were carried out by the chamber method in the second half of August 2020–2021 at 5 sites in the Voronezh, Volgograd, Astrakhan, Samara and Rostov regions. The work was carried out on pairs of plots covered with grass-dominated vegetation and forest plantations. Soil carbon dioxide emission in forest stands was significantly higher ( $2.99 \pm 0.26 \text{ g C m}^{-2}$ ) compared to grasslands ( $2.20 \pm 0.11 \text{ g C m}^{-2}$ ) ( $P < 0.01$ ). A statistical analysis of the correlation between emission values and soil temperature at a depth of 10 cm, volumetric soil moisture in the 0–7 cm layer, and the normalised difference vegetation index (*NDVI*) of vegetation cover was carried out. Humidity and *NDVI* were found to be significant emission factors, while temperature was not significant. The results obtained in this work and available in other scientific publications allowed us to conclude that the emission of carbon dioxide, as a rule, increased after the conversion of grass to tree cover. However, an increase in emissions was not accompanied by a loss of soil carbon stock, which either remained constant or increased slightly. An increase in *NDVI* indicated an increase in net primary production in forest plantations, that is, the modified ecosystem became a carbon sink with the totality of phytomass and soil pools. This pattern of change in carbon stocks and fluxes, even in carbon-rich arid soils, makes ambitious plans to create protective forest plantations to enhance carbon sequestration meaningful.

*Keywords:* forest growing, forest belts, carbon dioxide, emission, soil, chernozem, emission factors.

**Acknowledgements:** The study has been carried out with the support from the State contract with CEPF RAS № 121121600118-8 “Methodical approaches to assessing structural organisation and functioning of forest ecosystems” (field work) and RSF №№ 22-27-00641 “Climatic effects of large-scale forest growing in Russia’s arid regions” (data analysis).

## REFERENCES

- Ananyeva N.D., Sushko S.V., Ivashchenko K.V., Vasenev V.I. Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 10, pp. 1492–1501.
- Balogh J., Pintér K., Fóti Sz., Cserhalmi D., Papp M., Nagy Z., Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands, *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, Vol. 43, No. 5, pp. 1006–1013.
- Blagodatskii S.A., Bogomolova I.N., Blagodatskaya E.V., Mikrobная биомасса и кинетика роста микроорганизмов в черноземках при различном сельскохозяйственном использовании (Microbial biomass and growth kinetics of microorganisms in chernozem soils under different farm land use modes), *Mikrobiologiya*, 2008, Vol. 77, No. 1, pp. 113–120.
- Chang C.T., Sabaté S., Sperlich D., Poblador S., Sabater F., Gracia C., Does soil moisture overrule temperature dependence of soil respiration in Mediterranean riparian forests?, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11, pp. 6173–6185.

- Chendev Y.G., Belevantsev V.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lukin S.V., Zazdravnykh E.A., Sauer T.J., Change of forest–steppe chernozems under the influence of shelterbelts in the south of the Central Russian upland, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 8, pp. 1033–1045.
- Chendev Y.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lebedeva M.P., Plotnikova O.O., Zazdravnykh E.A., Shapovalov A.S., Rannie stadii evolyutsii chernozemov pod lesnoi rastitel'nost'yu (Belgorodskaya oblast') (Early stages of chernozems evolution under forest vegetation (Belgorod oblast)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 4, pp. 387–404.
- Cheverdin Y.I., Vavin V.S., Akhtyamov A.G., Voronin D.A., Rol' lesnykh nasazhdenii v izmenenii svoystv chernozemov (Role of wood plantings in change of properties of chernozems), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2014, No. 2, pp. 11–14.
- Chimitdorzhieva E.O., Chimitdorzhieva G.D., Osobennosti emissii uglekislogo gaza iz muchnistokarbonatnykh chernozemov Tugnuiskoi kotloviny Zabaikal'ya (Emission of carbon dioxide from mealy calcareous chernozems in the Tugnuui Depression, Transbaikalia), *Agrokhimiya*, 2010, No. 11, pp. 45–49.
- Chimitdorzhieva E.O., Produktirovanie dioksida ugleroda sukhostepnyimi pochvami Zabaikal'ya (Carbon dioxide emission by chestnut soils of Transbaikalia), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2010, No. 4, pp. 33–35.
- Deng L., Kim D.-G., Li M., Huang C., Liu Q., Cheng M., Shangguan Z., Peng C., Land-use changes driven by “Grain for Green” program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China, *Global and Planetary Change*, 2019, Vol. 177, pp. 101–115.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* (Report on climate features in the Russian Federation for 2020), Moscow: Rosgidromet, 2021, 104 p.
- Hong S., Yin G., Piao S., Dybzinski R., Cong N., Li X., Wang K., Peñuelas J., Zeng H., Chen A., Divergent responses of soil organic carbon to afforestation, *Nature Sustainability*, 2020, Vol. 3, pp. 694–700.
- Kaganov V.V., Izmenenie ekosistemnykh zapasov ugleroda pri oblesenii v stepnoi i polupustynnoi zonakh Evropeiskoi chasti Rossii (Changes in ecosystem carbon stocks in the afforestation of the steppe and semidesert zones of European Russia), *Problemy regional'noi ekologii*, 2012, No. 4, pp. 7–12.
- Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Girtarskii M.L., Factors of spatiotemporal variability of CO<sub>2</sub> fluxes from soils of southern taiga spruce forests of Valdai, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 743–751.
- Khodzhaeva A.K., Semenov V.M., Distribution of active organic matter in the soil profiles of natural and agricultural ecosystems, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 12, pp. 1361–1369.
- Klimenko O.E., Klimenko N.I., Changes in the properties of Crimean haplic chernozems under the impact of forest plantations *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 5, pp. 750–762.
- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Y., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Y., Semenov S.M., Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata (A role of forests in natural systems' adaptation to climate change), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 531–546.
- Lloyd J., Taylor J.A., On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*, 1994, Vol. 8, pp. 315–323.
- OneSoil. 2022, available at: <https://onesoil.ai/ru> (February 21, 2022)
- Perez-Quezada J.F., Bown H.E., Fuentes J.P., Alfaro F.A., Franck N., Effects of afforestation on soil respiration in an arid shrubland in Chile, *J. Arid Environments*, 2012, Vol. 83, pp. 45–53.
- Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Kuznetsova D.A., The greenhouse gas absorption potential of Russian forests and possibilities for carbon footprint reduction for exported domestic products, *Doklady Earth Sciences*, 2021, Vol. 499, No. 2, pp. 683–685.
- Raich J.W., Potter C.S., Global patterns of carbon dioxide emission from soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, Vol. 9, No. 1, pp. 23–36.
- Rozenberg G.S., Saksonov S.V., Senator S.A., Zapozdalyi opyt ekologicheskikh ekspertiz global'nykh planov preobrazovaniya prirody v Rossii (Belated experience of environmental impact of the global plans for the transformation of nature in Russia), *Voprosy stepovedeniya*, 2018, No. 14, pp. 15–35.
- Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Sotnikova Y.L., Tembo A., Vasenev I.I., Valentini R., Short-term dynamics and spatial heterogeneity of CO<sub>2</sub> emission from the soils of natural and urban ecosystems in the central chernozemic region, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 4, pp. 416–424.
- Semenov V.M., Zinyakova N.B., Lebedeva T.N., Tulina A.S., Kogut B.M., Masyutenko N.P., Malyukova L.S., Biologically active organic matter in soils of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 434–447.
- Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Kovach R.G., Chendev Y.G., Influence of forest shelterbelts on local pedodiversity (Belgorod oblast), *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 9, pp. 1195–1205.
- Sun L., Ataka M., Kominami Y., Yoshimura K., Relationship between fine-root exudation and respiration of two *Quercus* species in a Japanese temperate forest, *Tree Physiology*, 2017, Vol. 37, pp. 1011–1020.
- Turusov V.I., Cheverdin Y.I., Bespalov V.A., Titova T.V., Izmeneniya fizicheskikh svoystv chernozemov segregatsionnykh v agrolesolandshaftakh Tsentral'nogo Chernozem'ya (Changes in the physical properties of segregational chernozems in agroforest landscapes of the Central Chernozem region), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2020, No. 4(376), pp. 95–112.
- Vaganov E.A., Porfir'ev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Y., Pyzhev A.I., Otsenka vklada rossiiskikh lesov v snizhenie riskov klimaticheskikh izmenenii (Assessment of the contribution of Russian forests to climate change mitigation), *Ekonomika regiona*, 2021, Vol. 17, No. 4, pp. 1096–1109.
- Wang J., Feng L., Palmer P.I., Liu Y., Fang S., Bösch H., O'Dell C.W., Tang X., Yang D., Liu L., Xia C., Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data, *Nature*, 2020, Vol. 586, pp. 720–723.
- Wang W., Zeng W., Chen W., Zeng H., Fang J., Soil respiration and organic carbon dynamics with grassland conversions to woodlands in temperate China, *PLOS ONE*, 2013, Vol. 8, No. 8, Art. No. e71986.
- Xiao H.B., Shi Z.H., Li Z.W., Chen J., Huang B., Yue Z.J., Zhan Y.M., The regulatory effects of biotic and abiotic factors on soil respiration under different land-use types, *Ecological Indicators*, 2021, Vol. 127, Art. No. 107787.
- Zhang Y., Guo S., Liu Q., Jiang J., Wang R., Li N., Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau, *Ecological Engineering*, 2015, Vol. 74, pp. 196–205.

УДК 579.64:631.46

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ В ФИТОГЕННОМ ПОЛЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В СРЕДНЕЙ ТАЙГЕ КАРЕЛИИ<sup>1</sup>

© 2022 г. Е. В. Мошкина<sup>а</sup>, \*, О. Н. Бахмет<sup>б</sup>, М. В. Медведева<sup>а</sup>, А. Ю. Карпечко<sup>а</sup>, А. В. Мамай<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

<sup>б</sup>Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр Российской академии наук”,  
ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

\*E-mail: lena\_moshkina@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.

После доработки 24.01.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

В 2017–2020 гг. в среднетаежной подзоне Карелии в сосняке брусничном исследована биологическая активность подзола иллювиально-железистого песчаного в различных зонах фитогенного поля дерева (ФПД) и факторов, на нее влияющих. В ФПД выделяли три функциональные зоны: “ствол”, “крона”, “окно”. Запасы лесной подстилки (ЗЛП) в приствольной зоне и под кроной деревьев варьировали от 27.69 до 78.34 т/га, в межкрупном пространстве в среднем составляли 27.69 т/га. Варьирование ЗЛП, обусловленное влиянием ФПД, составляло 15–37%. Годовое поступление опада было максимальным в подкрупном пространстве (2.47–2.49 т/га), а минимальным – в “окне” (2.37 т/га). Время оборачиваемости лесной подстилки составило 15–16 лет. Установлено, что крона нивелирует суточный и сезонный температурный режим почвы, снижая максимальные и увеличивая минимальные значения температуры верхнего слоя почвы. Сезонная динамика эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы на 41–56% определялась температурой почвы на глубине 10 см. Относительная влажность почвы (Wп) была максимальной в осенне-весенний период и составляла на глубине 0–5 см 65–77%, на глубине 5–15 см – 20–24%. В летние месяцы Wп снижалась до 50–65% на глубине 0–5 см, до 10–15% на – 5–15 см. В зависимости от сочетания погодных условий и сезонной динамики потоков CO<sub>2</sub> из почвы в сосняке брусничном годовые эмиссии в разных зонах ФПД отличались в 1.5 раза и составляли в окне – 5.6 ± 0.7, у ствола – 8.5 ± 0.9, под кроной – 7.7 ± 0.9 т С/га в год. Вклад дыхания корней в общее дыхание почв составил 24–45%, при этом условия зон ФПД значимо не влияли на плотность размещения микориз на корнях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Тенденция более высоких показателей микробиологической активности почв прослеживается в приствольной и подкрупной зоне дерева. Наибольшую численность имеют микроорганизмы, использующие органические формы азота. Численность комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов низкая, что определяет заторможенность процессов деструкции органического вещества и формирование лесных подстилок. Основным экологическим фактором, влияющим на скорость деструкционных процессов и величину почвенных потоков CO<sub>2</sub> в сосняке брусничном, является зона ФПД. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> детерминируется температурой воздуха и почвы. В результате кластерного анализа, проведенного на основе изучаемых свойств, были получены два кластера. Один из них включал функциональную зону “окно”, другой – “ствол” и “крона”.

*Ключевые слова:* подзол, среднетаежный сосняк, зоны фитогенного поля дерева, экофизиологические показатели биотической компоненты почв, эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы, пространственно-временной аспект.

DOI: 10.31857/S0024114822040076

Древесные растения, являясь эдификаторами лесных экосистем, напрямую и опосредованно воздействуют на различные компоненты биогеоценоза, в том числе определяют свойства почвы, включая ее микробиологические характеристики (Gersper, Holowaychuk, 1970; Boettcher, Kalisz, 1990;

Liski, 1995). Кроме того, колебательные движения деревьев создают вихревые потоки, которые являются одним из условий формирования фитогенного поля. В пределах фитогенного поля можно выделить три функциональные зоны: “ствол” – приствольное повышение, “крона” – подкрупное пространство, “окно” – межкрупное пространство, которые хорошо индицируются по мощности лесной подстилки и количеству ее за-

<sup>1</sup> Предоставленный материал получен при выполнении государственного задания ИЛ КарНЦ РАН.

пасов, а также по показателям кислотности, плотности почв, содержания гумуса в верхней части почвенного профиля. Микробиологические показатели также могут отражать условия функционирования различных зон фитогенного поля дерева. Кроны деревьев по-разному влияют на распределение атмосферных осадков, а также поступающих из выпадений элементов минерального питания и загрязнителей на территории леса, что также сказывается на свойствах почв (Карпачевский и др., 1998; Арчегова, Кузнецова, 2011; Карпечко и др., 2015; Карпечко и др., 2018). От приствольных возвышений к межкрупным пространствам увеличивается разнообразие растений живого напочвенного покрова, возрастает общее число видов и доля участия неморальных, светолюбивых, а также требовательных к плодородию почв видов растений (Семенюк и др., 2020). Растительный опад и отпад также существенно влияют на физико-химические и микробиологические свойства почвы, определяя их кислотность, запасы подстилки, толщину гумусового слоя (Hokkanen et al., 1995, Lawtence et al., 2012). Количество и качество растительного опада в различных зонах фитогенного поля дерева изменяется в широких пределах, его трансформация зависит от вида древесной растительности и растений напочвенного покрова. Таким образом, мозаичность почвенных условий во многом связана с формированием фитогенного поля дерева (Карпачевский, Просвирина, 1989), термином, введенным А.А. Урановым (Уранов, 1965). Значительное количество работ посвящено изучению свойств почв в ФПД, при этом наибольшее внимание заслуживает цикл работ В.В. Никонова и Н.В. Лукиной, которые были частью комплексных исследований пространственного варьирования свойств почв естественных и антропогенно нарушенных лесных экосистем Северной Фенноскандии (Лукина и др., 2003; Никонов, Лукина, 2000). Для почв Карелии первые исследования по данной проблеме проведены Л.М. Загуральской (Загуральская, 2003). Было показано, что изменения микробиологических свойств почв зависят от живого напочвенного покрова и расстояния от дерева (Медведева и др., 2020). Особенности трансформации биофильных элементов в почве различных зон ФПД во многом определяются функционированием микроорганизмов, которые обладают широкими возможностями метаболизма. Помимо надземной части древесных растений фитогенное поле дерева формирует его подземная часть. Корневая система, корневые выделения древесных растений могут контролировать большую часть окружающей их среды — регулировать состав почвенной микробиоты, притягивать и концентрировать питательные вещества, менять химические и физические характеристики участка почвы, на котором они растут (Кали-

нин, 1991). Для всех лесобразующих пород в бо-реальных лесах характерно наличие эктомикоризы (Шубин, 1973; Taylor et al., 2000), таким образом, большая часть элементов минерального питания, поступающая в растение из почвы, проходит через интерфейс “гриб-корень” (Ostonen et al., 2011).

Сложная комплементарность и динамичность отдельных биотических блоков в функционировании фитогенного поля определила актуальность проводимых исследований. Целью работы было установление особенностей пространственно-временной динамики биологической активности почв в фитогенном поле сосны обыкновенной на примере сосняка брусничного среднетаежной подзоны Карелии. Данная цель предусматривала решение следующих основных задач:

- 1) установить варьирование свойств лесных подстилок в зависимости от зоны фитогенного поля;
- 2) проследить сезонную динамику гидротермических свойств почв, сформировавшихся в различных функциональных зонах фитогенного поля дерева;
- 3) определить показатели активности биотической компоненты почв в зависимости от зоны фитогенного поля дерева.

Оценка пространственного варьирования свойств почвы ненарушенных лесных биогеоценозов, обусловленных влиянием фитогенного поля дерева, важна для понимания и сохранения биоразнообразия в таежных лесах и может быть этапом качества природной среды в современных условиях увеличения антропогенной нагрузки, глобального изменения климата (Лукина и др., 2010).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в период вегетации растений на протяжении 2017–2020 гг. в среднетаежной подзоне республики Карелии. Комплексные работы выполняли в сосняке брусничном заповедника “Кивач”. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, сформированный на озерно-ледниковых отложениях (Классификация и диагностика ..., 2004), отдельные химические характеристики которого приведены в табл. 1.

В зоне средней тайги в связи с медленным разложением органического вещества, поступающего с опадом, происходит активное формирование мортмассы — лесной подстилки. Запас лесной подстилки в разных зонах фитогенного поля дерева определяли однократно рамкой 25 × 25 см в июле 2018 г. в 12-кратной повторности. Лесная подстилка состояла из трех подгоризонтов разной степени разложения — O(L), O(F), O(H), каждый из которых учитывали отдельно (Богатырев, Фомина, 1991; Орлова и др., 2015). Определение су-

**Таблица 1.** Свойства подзола иллювиально-железистого песчаного в различных функциональных зонах фитогенного поля дерева

Зона фитогенного поля	Горизонт почв	Мощность, см	pH <sub>KCl</sub>	Нг	V	C
				мг-экв/100	%	%
Ствол	O	4.6 ± 0.5	3.2 ± 0.1	90 ± 10	4 ± 1	44.32 ± 1.42
	E	2.2 ± 0.4	3.3 ± 0.1	6 ± 1	4.7 ± 0.7	0.86 ± 0.06
	BF	18.3 ± 0.7	4.3 ± 0.1	4.4 ± 0.6	4.9 ± 0.5	0.64 ± 0.06
Крона	O	5.1 ± 0.6	3.2 ± 0.1	100 ± 10	7 ± 1	44.00 ± 2.64
	E	2.0 ± 0.3	3.5 ± 0.2	5.1 ± 0.7	5.2 ± 0.7	0.90 ± 0.09
	BF	17.9 ± 0.7	4.4 ± 0.1	3.9 ± 0.4	8 ± 3	0.67 ± 0.06
Окно	O	4.1 ± 0.4	3.3 ± 0.1	99 ± 5	6 ± 1	44.98 ± 1.49
	E	2.2 ± 0.4	3.4 ± 0.1	5 ± 2	6 ± 1	0.84 ± 0.07
	BF	18 ± 1	4.4 ± 0.1	3.2 ± 0.2	10 ± 3	0.65 ± 0.04

хой массы подстилки проводили путем сложения массы всех подгоризонтов с учетом их влажности. Годовое поступление опада определяли суммированием поступающей растительной массы в опадоуловители (диаметром 70 см), которые были установлены в 6–9 кратной повторности (Руководство ..., 2013). Учет массы поступающего опада проводили ежемесячно.

Интенсивность круговорота органического вещества в лесном биогеоценозе можно охарактеризовать с помощью коэффициента разложения опада (k), представляющего собой отношение годового количества опада (т/га) к массе подстилки (т/га). Величина, обратная этому коэффициенту, представляет собой среднее время оборачиваемости подстилки (1/k), выраженное в годах (Olson, 1963). Также одним из информативных показателей скорости деструктивных процессов стал опадо-подстилочный коэффициент, рассчитанный как отношение массы лесной подстилки к количеству ежегодного поступающего опада (Смолянинов, 1969).

С целью анализа температурного режима почв круглогодично фиксировали температуру воздуха и разных слоев почвы термодатчиками (iButton DS1925L-F5). На основании первичных данных были получены среднесуточные значения температуры воздуха и почв на глубинах (0.5, 5, 10, 20 см) и рассчитаны соответствующие среднемесячные значения. Затем для генерализованной характеристики теплового режима почв была найдена сумма активных температур (>5°C и >10°C) на всех изучаемых глубинах.

Отбор проб для микробиологических анализов проводился по традиционной методике (Мишустин и др., 1968; Методы почвенной микробиологии ..., 1991). Исследовали верхний слой (0–10 см) почвы, включающий органогенный горизонт – лесную подстилку (O) и подзолистый горизонт (E). Учет численности почвенных гетеротрофных мик-

роорганизмов, участвующих в трансформации азот- и углеродсодержащих соединений, проводили методом посева на плотные селективные питательные среды (Методы почвенной микробиологии ..., 1991). Количество бактерий, использующих органические формы азота, учитывали на мясопептонном агаре (МПА), ассимилирующих минеральный азот – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), бацилл – на среде МПА + сусло-агар, олигонитрофилов – на среде Эшби, олиготрофных микроорганизмов – на почвенном агаре (ПА). Численность актиномицетов определяли на КАА. Комплекс целлюлозоразрушающих микроорганизмов оценивали на среде Гетчинсона. Микроскопические грибы подсчитывали на сусло-агаре с лимонной кислотой. Для характеристики биологической активности почв в пространственно-временном аспекте устанавливали целлюлозолитическую способность почв в модельном полевом опыте *in situ* (Методы почвенной микробиологии ..., 1991).

Определение интенсивности дыхания в полевых условиях проводили камерным методом в сезонной динамике (2 раза в месяц) с мая по ноябрь включительно. Использовали серию измерительных камер, представляющих собой врезанные в почву без удаления подстилки ПВХ трубы диаметром 10 см. Оценку вклада дыхания корней в общую эмиссию диоксида углерода с поверхности почв проводили методом удаления корней (Кузьяков, Ларионова, 2006). Измерения проводили с мая 2017 г. по ноябрь 2020 г. Одновременно с измерением эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почв контролировали температуру (T<sub>п</sub>) почвы на глубине 0–5 см, 5–15 см, температуру воздуха (T<sub>возд</sub>) припочвенного слоя 1.5 см и на высоте 1.5 м, а также влажность лесной подстилки и минеральной части почвы на глубине 5–15 см.

Для характеристики температурной чувствительности почвенного дыхания использовали

**Таблица 2.** Коэффициент разложения опада в различных зонах фитогенного поля дерева в сосняке брусничном (среднее  $\pm$  SE)

Зона фитогенного поля	Запас лесной подстилки, т/га	Поступление опада за год, т/га	Опадо-подстилочный коэффициент	k, 1/год	Оборачиваемость подстилки, лет
Ствол	39.83 $\pm$ 4.20	2.47 $\pm$ 0.017	11.91 $\pm$ 0.67	0.062	16.1
Крона	37.61 $\pm$ 1.57	2.49 $\pm$ 0.017	13.21 $\pm$ 0.77	0.066	15.1
Окно	27.69 $\pm$ 2.19	2.37 $\pm$ 0.018	12.83 $\pm$ 1.67	0.062	16.1

температурный коэффициент  $Q_{10}$  (коэффициент Вант-Гоффа), который рассчитывали исходя из уравнения экспоненты:  $Q_{10} = \exp(10k)$ .

Содержание углерода микробной биомассы ( $C_{\text{мик}}$ ) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), которое оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой и инкубации в течение 1.5–2 ч. при температуре 22°C (Anderson, Domsch, 1978; Евдокимов, 2018). Изменение концентрации  $CO_2$  регистрировали газоанализатором (на основе NDIR-сенсора фирмы SenseAir, Швеция).

Величину СИД рассчитывали по формуле:  $СИД = dC \times 12 \times V_{\text{флак}} \times 1000/m \times 22.4 \times t \times 100$ , где СИД – субстрат-индуцированное дыхание, мкг С/г субстрата/ч; dC – изменение концентрации  $CO_2$  с учетом нулевого значения, объемные %;  $V_{\text{флак}}$  – объем флакона, мл; t – время инкубации, ч; m – масса абсолютно сухой почвы, г.

Углерод микробной биомассы рассчитывали по формуле:  $C_{\text{мик}} = СИД \times 40.04 + 0.37$  (Anderson, Domsch, 1978), где  $C_{\text{мик}}$  – углерод микробной биомассы, мкг С/г почвы; СИД – субстрат-индуцированное дыхание, мкг С– $CO_2$ /г почвы в час.

Для определения плотности размещения микориз были отобраны почвенные образцы в разных зонах фитогенного поля дерева (до 15 шт. в каждой зоне), из которых извлекали корни предпоследнего порядка общей длиной с каждого образца не менее 10 см. Затем образцы корневых систем фотографировали в высоком качестве и проводили анализ фотографий. Далее осуществляли пересчет числа сосущих окончаний на единицу длины несущего корня (Семенова, 1980).

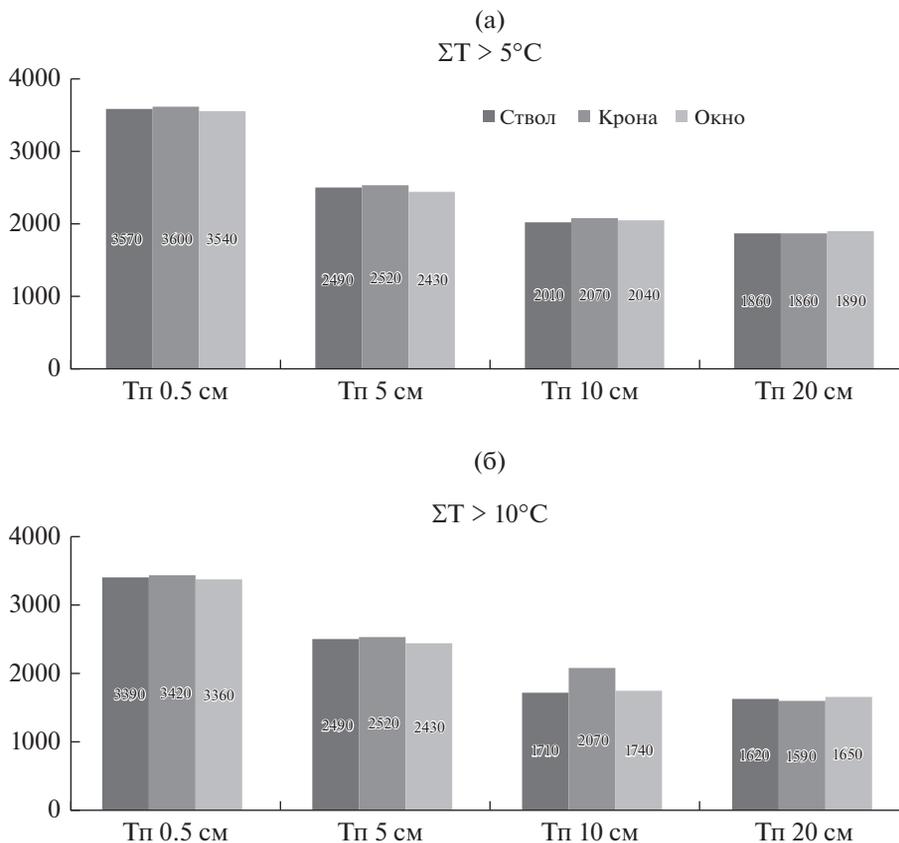
Анализ полученных данных проводили с использованием классических статистических методов (программное обеспечение Statistica v.9.0) для расчета среднего, максимального и минимального значений, стандартного отклонения и коэффициента вариации. Кластерный анализ применяли для исследования сходства между различными свойствами с использованием определенной метрики, такой как евклидово расстояние (Berrueta, 2007). Результаты кластеризации были отображены с использованием древовидной диаграммы, показывающей структурную связь дан-

ных и выявляющей взаимосвязи различных признаков объектов и анализа их факторной структуры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Поступление и трансформация растительного опада.** Средние значения мощности лесных подстилок уменьшаются от приствольных возвышений к межкроновым пространствам. Запасы лесной подстилки в приствольной зоне и под кроной деревьев значительно не различаются и варьируют от 27.69 до 78.34 т/га. Данные учета массы лесной подстилки отражают характер накопления мортмассы вблизи стволов деревьев и под кроной, в межкроновом пространстве запасы подстилки значимо меньше ( $p = 0.0123$ ) и составляют  $27.69 \pm 2.19$  т/га. Коэффициент вариации запаса подстилки, обусловленный влиянием фитогенного поля дерева, равен 15–37%, а в пределах сосняка брусничного вариабельность запаса подстилки достигает 32%. Суммарное годовое поступление опада было максимальным в подкroновом пространстве (2.47–2.49 т/га), а минимальным – в “окне” (2.37 т/га). Ежегодное поступление опада, по полученным нами данным, в среднем составляет 2.44 т/га, что характерно для основных древостоев таежной зоны (Базилевич, Титлянова, 2008). Таким образом, наибольшие запасы лесной подстилки сконцентрированы под кронами деревьев, что напрямую связано с количеством поступающего опада ( $p = 0.00239$ ). Наши расчеты показали, что время оборачиваемости лесной подстилки одинаково в приствольном повышении и в межкroновом пространстве и составляет 16 лет, в зоне под кроной и на краю кроны – 15 лет (табл. 2). Важная роль в биологическом круговороте наземных систем принадлежит деструктивным процессам, поскольку преобладающая часть биологической продукции трансформируется в форму детрита под действием различных агентов разложения (Krishna, Mohan, 2017). Рассчитанный опадо-подстилочный коэффициент варьирует от 6.35 до 24. Полученные данные свидетельствуют о медленных процессах минерализации поступающего опада.

**Температурно-влажностный режим почв.** Анализ сезонной динамики среднесуточной температуры почвы на глубине 0–5 см и 5–15 см в различных зонах фитогенного поля дерева сосняка брусничного



**Рис. 1.** Сумма активных температур почвы  $T_p > +5^\circ\text{C}$  (а) и  $T_p > +10^\circ\text{C}$  (б) на различных глубинах в различных зонах фитогенного поля дерева (ствол, крона, окно) сосняка брусничного за вегетационный период.

показал их сходный характер с небольшими расхождениями в горизонте лесной подстилки, с глубиной эти различия нивелировались. Наибольшие различия температуры минеральных горизонтов почвы в разных зонах фитогенного поля дерева наблюдались в период с мая по июль, для лесной подстилки этот период был несколько короче (май–июнь). В мае в большей степени прогревалась почва в межкроновом пространстве. В июне температура почвы в зоне “окно” также была выше по сравнению с зоной приствольного повышения: на  $2^\circ\text{C}$  в органогенном горизонте и на  $1^\circ\text{C}$  в минеральном слое на глубине 5–15 см. В июле при общей тенденции прогрева воздуха и почвы значимых различий ( $p < 0.05$ ) по температуре органогенного горизонта почв не было выявлено, однако в минеральных горизонтах температура почвы в межкроновом пространстве оставалась на полградуса выше, чем в приствольной зоне. С августа по октябрь температура почвы выравнивалась как в горизонтальном, так и вертикальном направлении.

Анализ суммы температур воздуха, превышающих  $+5$  и  $+10^\circ\text{C}$ , не выявил существенной разницы между участками различных зон фитогенного поля дерева (рис. 1). Почвы подкронового

пространства прогревались в теплое время года несколько сильнее соседних участков, особенно на глубине 10 см. Установлено, что крона нивелирует температурный режим почвы, снижая максимальные и увеличивая минимальные значения температуры верхнего слоя почвы.

Высокое содержание органического вещества в верхнем горизонте почв определяет ее гидрофильные свойства: способность удерживать влагу, выполнять защитную функцию от нехватки воды в засушливый летний период. Относительная влажность почвы в осенне-весенний период была максимальной в органогенном горизонте и варьировала от 65 до 77%, в минеральных горизонтах она была ниже и составляла 20–24%. В летние месяцы относительная влажность составляла 50–65% для лесной подстилки, 10–15% для минеральной части корнеобитаемого слоя почвы.

**CO<sub>2</sub>-эмиссионная активность почв.** Интегральным показателем почвенной биоты является биологическая активность почв, которая оценивается по целому ряду показателей. Одним из информативных показателей, способных оценить активность микробиоты в пространственно-временном аспекте, служит дыхательная активность

**Таблица 3.** Вклад корневого дыхания в общую эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почв

Зона фитогенного поля дерева	R микробное, г C-CO <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> сут	R корневое, г C-CO <sub>2</sub> /м <sup>2</sup> сут	Вклад дыхания корней, %
Ствол	1.97 ± 0.12 $a$	0.67 ± 0.10 $a$	24 ± 3 $a$
Крона	2.40 ± 0.24 $a$	1.44 ± 0.24 $b$	32 ± 4 $b$
Окно	1.44 ± 0.24 $b$	0.50 ± 0.17 $b$	45 ± 5 $b$

Примечание. Буквами  $a$ ,  $b$  показаны статистически значимые различия показателей корневого и микробного дыхания ( $p < 0.05$ ).

почв (Ананьева, 2003; Ananyeva et al., 2020) Эмиссия диоксида углерода из почвы является наиболее чувствительной составляющей углеродного цикла, которая быстро реагирует на любой абиотический и биотический стресс. Потоковая часть цикла углерода отражает современное состояние климата в регионе исследования и характеризует отклик углеродного баланса на изменения гидротермического режима (Larionova et al., 2010; Kurganova et al., 2011). Годовые потоки CO<sub>2</sub> из почв лесных экосистем характеризуются высокой временной вариабельностью. В нашем исследовании установлены значимые сезонные различия величины эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы ( $p < 0.001$ ). Зона фитогенного поля дерева также достоверно значимо оказывала влияние на эмиссионные потоки CO<sub>2</sub> из почвы ( $p = 0.0002$ ). Так, в зависимости от сочетания погодных условий и величины годовых потоков из почвы в сосняке брусничном потоки CO<sub>2</sub> в разных зонах фитогенного поля дерева могли отличаться более чем в 1.5 раза, составляя в межкрупном пространстве  $5.6 \pm 0.7$  т С/га в год, и  $8.5 \pm 0.9$  т С/га в год у ствола, и  $7.7 \pm 0.9$  под кроной (табл. 3), при этом влияние ФПД не перекрывает сезонные флуктуации значений почвенного дыхания. Различия величины корневого дыхания между участками разных зон фитогенного поля дерева прямо пропорционально связаны с коренасыщенностью почв данных участков ( $p = 0.046$ ,  $R^2 = 0.84$ ). Условия зон фитогенного поля значимо ( $p < 0.05$ ) не влияют на плотность размещения микориз на корне. Это, по-видимому, связано с тем, что мицелий гриба представлен во всех зонах фитогенного поля, что позволяет формировать микоризу, а изменения свойств почвы внутри изучаемых зон, в свою очередь, не оказывают существенного влияния на микоризообразование.

Динамика почвенного дыхания в течение вегетационного сезона была тесно связана с температурой приземного слоя воздуха ( $R^2 = 0.35$ ,  $p < 0.0001$ ) и более существенно – с температурой почвы на глубине 10 см ( $R^2 = 0.50$ ,  $p < 0.0001$ ). Эти зависимости хорошо аппроксимировались экспоненциальным уравнением 1-го порядка:  $R = \exp^{kT}$ . Значение температуры почвы объясняло 41–56% изменчивости интенсивности почвенного дыхания в течение вегетационного периода.

**Структуры микробного сообщества почв.** Анализ эколого-трофической структуры микробного сообщества верхнего органогенного горизонта почв подтвердил влияние ФПД на вариабельность микробиологических свойств почв (табл. 4). Тенденция более высоких показателей микробиологической активности почв прослеживается в приствольной и подкрупной зоне дерева. Установили, что наибольшую численность имеют микроорганизмы, использующие органические формы азота. При этом отмечали высокие показатели численности спорообразующих форм бактерий на данном участке. Как известно, спорообразующие микроорганизмы не только переживают неблагоприятные факторы среды, но и являются участниками более глубоких превращений органического вещества в почве: выделяя экзоферменты, осуществляют гидролитическое расщепление полипептидов, которые могут использовать другие участники процесса (Звягинцев и др., 2005). Резкое изменение численности бактерий – олигонитрофилов также отмечали по мере удаления от ствола дерева. Это может быть обусловлено трофической приуроченностью к “рассеянными” соединениям азота, образуемым при работе микроорганизмов-гидролитиков: получая ничтожно малые порции азота, они осуществляют несимбиотическую фиксацию азота, задерживая его в экосистеме.

В микробном сообществе присутствовали группы, чувствительность которых к изменению микроусловий почвенной среды была относительной. Отмечали, что диапазон численности олиготрофов не претерпевал заметных изменений в зависимости от ЗФП. Возможно, что это связано с тем, что, несмотря на изменение объема хвойного опада, поступающего на почву в разных частях фитогенного поля дерева, его состав не претерпевал резких изменений. Можно отметить высокое содержание лигнифицированной массы, трудноминерализуемых азот- и углеродсодержащих соединений, его высокую кислотность (Колмогорова, Уфимцев, 2018). Данные соединения являются предшественниками прогумусовых соединений, которые остаются неизменными: преобладают фульвокислоты и продукты их синтеза (Чуков, 2001). Олиготрофы – это сборная в таксономическом отношении группа микроорганиз-

**Таблица 4.** Диапазон изменения численности микроорганизмов и количества углерода микробной биомассы почв в разных зонах фитогенного поля дерева

Зона фитогенного поля дерева	Горизонт	Бактерии, использующие			Олигонитрофилы	Олиготрофы	Микроскопические грибы	КЦМ	Смик
		N-NH <sub>2</sub>		N-NH <sub>4</sub>					
		общие	споровые						
тыс. КОЕ/г почвы								мкг С/г почвы	
Ствол	О	2566–9944	358–2427	1040–9915	1988–10930	1216–3019	313–421	0.3–3.5	3800–4800
		6726	1486	6250	8143	1874	350	2	4300
		110–247	48–82	215–517	481–941	45–331	24–58	0–2.8	120–160
Крона	О	161	58	332	685	175	41	2	140
		2700–8007	396–2181	1825–10351	2112–8558	909–1836	317–364	0.3–8	4400–5800
		6129	1324	6902	6408	1310	344	5	5100
Окно	О	105–126	41–111	156–307	331–658	59–331	21–45	0–2	100–140
		146	68	232	525	166	36	1	120
		2715–5668	474–1238	1982–7439	1219–5959	1342–3656	161–367	0.3–4	4200–5200
Окно	Е	3803	815	4459	4158	2260	269	3	4700
		124–192	41–69	169–404	659–828	30–450	44–58	0.1–4	110–150
		152	53	257	727	257	52	2	130

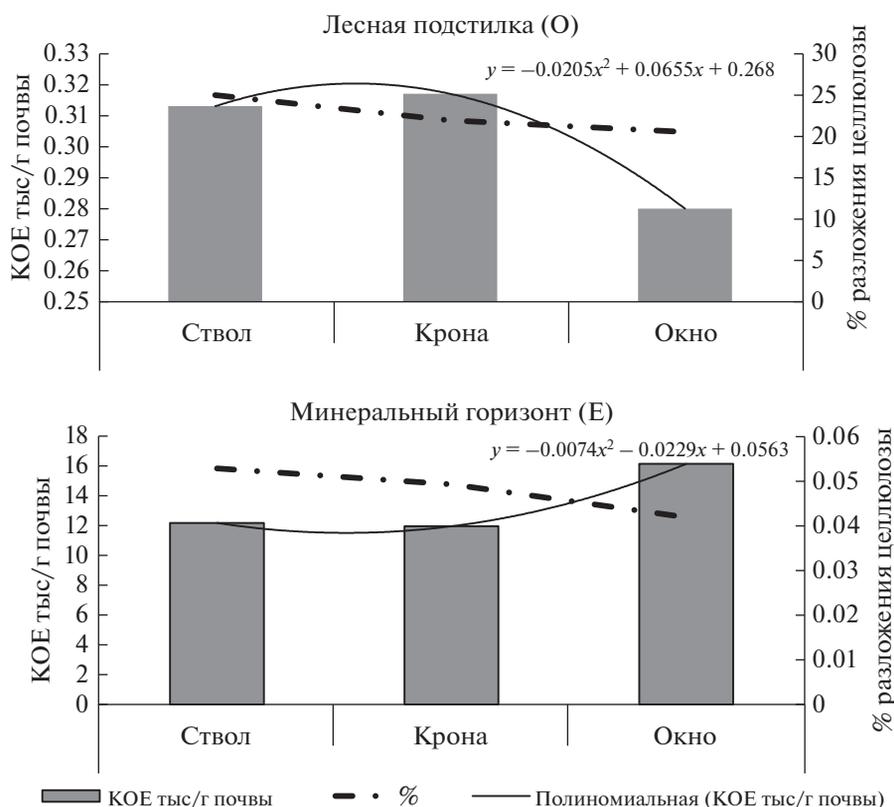
мов, способная использовать для своих конструктивных целей периферические, легко отщепляемые цепи фульвокислот. Резкого изменения численности комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов также не выявили, что обусловлено более медленным вовлечением их в процесс трансформации органического вещества, зависимости синтеза целлюлозолитических ферментов от физико-химических педоусловий.

В минеральном горизонте почв резкого изменения эколого-трофической структуры микроорганизмов не отмечено. Изменение диапазона численности отмечали для бактерий, утилизирующих минеральные формы азота, группы олигонитрофилов. Столь согласованное изменение численности важнейших эколого-трофических групп микроорганизмов легко объясняется участием их на заключительных этапах превращения азотсодержащих веществ и меньшей зависимостью от содержания элементов минерального питания. Последние хорошо утилизируются мицелиальными прокариотами, численность которых была низкой во все сроки проведения наблюдений. Исследование показало, что целлюлозолитическая способность органогенного и верхнего минерального горизонтов почв, оцениваемая по скорости разложения целлюлозного полотна, изменяется однонаправленно, снижаясь в ряду ствол > крона > окно (рис. 2).

**Влияние фитогенного поля дерева на свойства почв.** Провели оценку влияния зон фитогенного поля на вариации микробиологических показателей органогенного горизонта почв (рис. 3). В

иерархическом кластерном анализе исследуемые показатели были сгруппированы на основе расположения почв относительно функциональной зоны фитогенного поля. В результате кластерного анализа, проведенного на основе изучаемых свойств, были получены два кластера. Один из них включал функциональную зону “окно”, другой – “ствол” и “крона”. Подкороновая область фитогенного поля дерева была четко сгруппирована и удалена от межкороновой зоны. При этом при детальном анализе всей древовидной дендрограммы видна небольшая разница между свойствами почв различных функциональных зон, что обусловлено, возможно, комплексным влиянием факторов среды на свойства почв в каждой функциональной зоне.

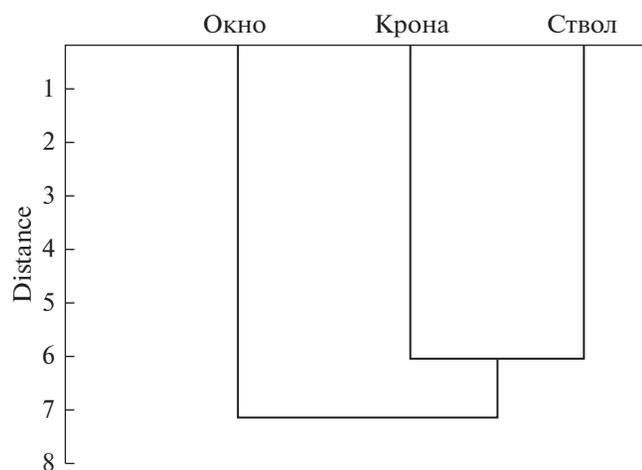
**Сравнительный анализ характеристик биотической компоненты почв,** проведенный на основе представленных в работе данных и результатов других исследователей, позволил заключить, что изучаемые компоненты биоты почв исследуемой территории имеют сходства с почвами таежной зоны Европейского Севера, а также свои особенности. Сходство заключается в высокой вариабельности микробиологических показателей в зависимости от климатических условий года (Chen et al., 2003; Onwuka, Mang, 2018). Численность и активность биоты почв также зависит от состава опада, поступающего на почву (Ball, 1997; Krishna, Mohan, 2017). Можно утверждать, что сложная комплементарность между различными блоками биоты и растениями определяет и однонаправленность биохимических процессов, про-



**Рис. 2.** Изменение целлюлозолитической способности почв (%) и численности комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов (КОЕ тыс./г почвы) в почвах различных зон ФПД сосняка брусничного.

исходящих в почве (de Freitas Pereira, 2018). Это является генетически детерминированным процессом, что свидетельствует об общем плане функционирования биоты, формировании единой трофической системы, положительные связи которой обеспечивают выполнение экосистем-

ных услуг (Rooney, Mc Cann, 2012). Сходство функционирования биоты таежной зоны определяется количеством поступающей в экосистему солнечной энергии, которая является “триггером”, пусковым механизмом метаболических реакций. В лесные экосистемы поступает разное количество солнечной энергии, следовательно, прогревание почв неодинаковое и скорость реакций также различна (Pfeifer et al., 2018).



**Рис. 3.** Дендрограмма, полученная на основе иерархического кластерного анализа исследуемых свойств почв в различных функциональных зонах кроны дерева.

Отличие функционирования биоты изучаемых нами участков определяется и спецификой почвообразующих пород, бедных по содержанию щелочных и щелочноземельных металлов (Морозова, 1991). Холодный гумидный климат тормозит биологическое выветривание минералов почвенной толщи, в этой связи в природном круговороте веществ циркулирует низкое содержание микроэлементов. Последнее, как известно, необходимо для нормального функционирования микробиоты, определяет ферментативную активность (Tabak et al., 2005). Трофические связи, которые могут формироваться между участниками процесса превращения органического вещества, эфемерные и короткие. В этой связи формируется гумус типа мор, структура которого более простая и, возможно, более неустойчивая к антропогенному воздействию (Ромашкевич, Герасимова, 1982).

Низкая численность микроорганизмов целлюлолитического комплекса связана наряду с гидротермическими условиями с невысоким содержанием микроэлементов в почве, что определяет заторможенность минерализации органического вещества, круговорот углерода.

В целом представленный перечень сходств и отличий биоты почв неполный, раскрывает лишь отдельные, наиболее главные, моменты. Однако они позволяют приблизить нас к познанию основ функционирования биоты почв ненарушенных лесов. Последнее важно для установления порога устойчивости наземных экосистем к различным видам воздействий: глобальному потеплению климата, аэротехногенному загрязнению и другим видам антропогенного воздействия (Nerman, Clarholm, 1998).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ эколого-трофической структуры микробного сообщества почв сосняка брусничного среднетаежной подзоны Карелии показал, что наиболее высокой численностью и функциональной активностью отличаются верхние органо-генные горизонты, в минеральных же горизонтах численность резко снижается. В микробном сообществе преобладают микроорганизмы, осуществляющие превращение азота, стратегия их выживания направлена на утилизацию рассеянных форм азота. Численность комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов низкая, что определяет заторможенность процессов деструкции органического вещества, формирование лесных подстилок. По степени обогащения микроорганизмами исследуемую почву можно охарактеризовать как “бедную” и “среднюю”.

Эдафические условия изменяются на фоне жизненных выделений растений-эдафикаторов. Наиболее выраженные изменения микробной трансформации органического вещества происходят в верхнем органо-генном горизонте почв в зоне ствол-крона, по мере отделения от дерева активность снижается. В верхнем минеральном горизонте изменение эколого-трофической структуры микробного сообщества менее выражено, что обусловлено низким содержанием гумуса, элементов питания, формированием неблагоприятных условий для их развития. Установлено, что основным экологическим фактором, влияющим на скорость деструкционных процессов и величину почвенных потоков  $\text{CO}_2$  в сосняке брусничном является зона ФПД, при этом факторами, определяющими сезонную динамику почвенной эмиссии  $\text{CO}_2$ , являются температура воздуха и почвы. Различия в микробиологических показателях почв обуславливают особенности круговорота элементов-биофилов, пространственную неоднородность эдафиче-

ских условий. Последнее влияет на продукционную способность древостоя, его устойчивость к неблагоприятным природно-техногенным воздействиям.

Авторы выражают глубокую благодарность руководству Государственного природного заповедника “Кивач” за всестороннюю поддержку, а также сотрудникам института леса КарНЦ РАН Н.Н. Ивашовой и Ю.С. Кудиновой – аналитикам лаб. лесного почвоведения – за помощь в выполнении камеральных работ и сотрудникам ИФХиБПП РАН И.Н. Кургановой и В.О. Лопес де Гереню за научное консультирование в вопросах измерения эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.
- Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г.* Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетаежных лесов // Лесоведение. 2011. № 3. С. 34–43.
- Базилевич Н.И., Титлянова А.А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 376 с.
- Богатырев Л.Г., Фомина Т.В.* Характеристика подстилок сосняков Присурского лесного массива // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. 1991. № 3. С. 28–39.
- Евдокимов И.В.* Методы определения биомассы почвенных микроорганизмов // Russian J. Ecosystem Ecology. 2018. Т. 3. № 3. С. 1–20.
- Зауральская Л.М.* Микробиологические аспекты мониторинга лесных почв Карелии в условиях заповедного режима // Лесоведение. 2003. № 4. С. 42–46.
- Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 448 с.
- Калинин М.И.* Корневедение. М.: Экология, 1991. 173 с.
- Карпачевский Л.О., Просвирина В.П.* О динамике строения почвенного покрова в лесных биогеоценозах // Почвоведение. 1989. № 5. С. 94–103.
- Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Прохслер Т., Кенел М., Гитл Г., Горчарук Н.Ю., Минаева Т.Ю.* Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков // Лесоведение. 1998. № 1. С. 50–59.
- Карпачко Ю.В., Лозовик П.А., Потапова И.Ю.* Трансформация химического состава атмосферных осадков лесной растительностью // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: труды IV Всероссийской научной конференции. М.: ИВП РАН, 2015. С. 155–158.
- Карпачко Ю.В., Лозовик П.А., Федорец Н.Г.* Баланс химических элементов в сосняке и ельнике Карелии // Лесоведение. 2018. № 2. С. 107–118.
- Колмогорова Е.Ю., Уфимцев В.И.* Некоторые особенности химического состава опада сосны обыкновенной, произрастающей в условиях породного отвала // Успехи современного естествознания. 2018. № 11(2). С. 267–272.
- Кузяков Я.В., Ларионова А.А.* Вклад ризомикробного и корневого дыхания в эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы (обзор) // Почвоведение. 2006. № 7. С. 842–854.

- Лукина Н.В., Горбачева Т.Т., Никонов В.В., Лукина М.А. Пространственная изменчивость кислотности почв в процессе техногенной сукцессии лесных биогеоценозов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 32–35.
- Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва – растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 45–56.
- Медведева М.В., Бахмет О.Н., Мошкина Е.В., Солодовников А.Н., Зачиняева А.В. Пространственное варьирование биологической активности почв соснового древостоя среднетаежной подзоны Карелии // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2020. № 5. С. 35–47.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 303 с.
- Мишустин Е.Н., Никитин Д.И., Востров И.С. Модернизация методов учета почвенного микронаселения и его активности // Микроорганизмы в сельском хозяйстве. Минск, 1968. С. 144–150.
- Морозова Р.М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
- Никонов В.В., Лукина Н.В. Пространственно-временная изменчивость питательного режима Al–Fe-гумусовых подзолов бореальных лесов // Почвоведение. 2000. № 12. С. 1487–1495.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э. Методические подходы к отбору образцов лесной подстилки с учетом мозаичности лесных биогеоценозов // Лесоведение. 2015. № 3. С. 214–221.
- Ромашикевич А.И., Герасимова М.И. Микроморфология и диагностика почвообразования. М.: Наука, 1982. 127 с.
- Руководство по комплексному мониторингу. Перевод с английского. М.: ФГБУ “ИГКЭ Росгидромета и РАН”, 2013. 153 с.
- Семенова Л.А. Морфология микориз сосны обыкновенной в спелых лесах // Микоризные грибы и микоризы лесообразующих пород севера. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1980. С. 103–132.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43.
- Смолянинов И.И. Биологический круговорот веществ и повышение продуктивности лесов. М.: Лесная промышленность, 1969. 192 с.
- Уранов А.А. Фитогенное поле // Проблемы современной ботаники. Т. 1. М.–Л.: Наука, 1965. С. 251–254.
- Чуков С.Н. Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2001. 216 с.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Шубин В.И. Микотрофность древесных пород, ее значение при разведении леса в таежной зоне. Л.: Наука, 1973. 264 с.
- Ananyeva N.D., Sushko S.V., Ivashchenko K.V., Vasenev V.I. Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. № 10. P. 1492–1501.
- Anderson J., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology & Biochemistry. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
- Ball A.S. Microbial decomposition at elevated CO<sub>2</sub> levels: effect of litter quality // Global Change Biol. 1997. V. 3. P. 379–386.
- Boettcher S.E., Kalisz P.J. Single-tree influence on soil properties in the mountains of eastern Kentucky // Ecology. 1990. V. 71. № 4. P. 1365–1372.
- Berrueta L.A., Alonso-Salces R.M., Héberger K. Supervised pattern recognition in food analysis // J. Chromatography A. 2007. V. 1158. P. 196–214.
- Chen Q.S., Li L.H., Han X.G., Yan Z.D., Wang Y.F., Yuan Z.Y. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia // Acta Phytoecol Sinica. 2003. V. 27. № 2. P. 202–209.
- Gersper P.L., Holowaychuk N. Some effects of stem flow from forest canopy trees on chemical properties of soils // Ecology. 1970. V. 52. № 4. P. 691–702.
- De Freitas Pereira M. Secretome analysis from the ectomycorrhizal ascomycete *Cenococcum geophilum* // Frontiers in Microbiology. 2018. V. P. 1–17.
- Herman D., Clarholm V. Trophic relationships in the soil microfood-web: Predicting the responses to a changing global environment // Global Change Biology. 1998. V. 4. № 7. P. 713–727.
- Hokkanen T.J., Järvinen E., Kuuluvainen T. Properties of top soil the relationship between soil and trees in a boreal Scots pine stands // Silva Fennica. 1995. V. 29. № 3. P. 189–203.
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Petrov A.S., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Ableeva V.A., Kudayarov V.N. Effect of the observed climate changes and extreme weather phenomena on the emission component of the carbon cycle in different ecosystems of the southern taiga zone // Doklady Biological Sciences. 2011. V. 441. № 6. P. 412–416.
- Krishna M.P., Mohan M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review // Energy, Ecology and Environment. 2017. V. 2. № 4. P. 236–249.
- Larionova A.A., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Zolotareva B.N., Yevdokimov I.V., Kudayarov V.N. Carbon dioxide emissions from agrogray soils under climate changes // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. № 2. P. 168–176.
- Lawrence D.J., Luckai N., Meyer W.L., Shahi C., Fazekas A.J., Kesanakurti P., Newmaster S. Distribution of white spruce lateral fine roots as affected by the presence of trembling aspen: root mapping using simple sequence repeat DNA profiling // Canadian Journal of Forest Research. 2012. V. 42. P. 1566–1576.
- Liski J. Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – effect of trees and implications for sampling // Silva Fennica. 1995. V. 29. № 4. P. 255–266.
- Olson J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems // Ecology. 1963. V. 44. P. 322–331.
- Onwuka B., Mang B. Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth // Adv Plants Agric Res. 2018. V. 8. № 1. P. 34–37.
- Ostonen I., Helmisaari H.-S., Borken W., Tedersoo L., Kukkumägi M., Bahram M., Lindroos A.-J., Nöjd P., Uri V., Merilä P., Asi E., Lohmus K. Fine root foraging strategies in Norway spruce forests across a European climate gradient // Global Change Biology. 2011. V. 17. № 12. P. 3620–3632.
- Pfeifer M., Gonsamo A., Woodgate W. et al. Tropical forest canopies and their relationships with climate and disturbance: results from a global dataset of consistent field-based

measurements // *Forest Ecosystem*. 2018. V. 5. № 7. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0118-7>

Rooney N., McCann K.S. Integrating food web diversity, structure and stability // *Trends in Ecology & Evolution*/ 2012. V. 27. № 1. P. 40–46.

Tabak H.H., Lens P., van Hullebusch E.D., Dejonghe W. Developments in bioremediation of soils and sediments polluted with metals and radionuclides – 1. Microbial processes and mechanisms affecting bioremediation of metal con-

tamination and influencing metal toxicity and transport // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2005. V. 4. № 3. P. 115–156.

Taylor A.F., Martin F., Read D.J. Fungal diversity in ectomycorrhizal communities of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and Beech (*Fagus sylvatica* L.) along north-south transects in Europe // *Ecological Studies*. 2000. V. 142. P. 343–365.

## Spatio-Temporal Dynamics of Soils' Biological Activity in Phytogenous Field of Scots Pine in Karelia Republic's Middle Taiga

Ye. V. Moshkina<sup>1, \*</sup>, O. N. Bakhmet<sup>2</sup>, M. V. Medvedeva<sup>1</sup>, A. Yu. Karpechko<sup>1</sup>, and A. V. Mamay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

<sup>2</sup>Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

\*E-mail: lena\_moshkina@mail.ru

In 2017–2020 in the lingonberry pine forest of the middle taiga subzone of Karelia, the biological activity of sandy iron podzol was studied in various zones of the tree's phytogenic field (TPF), as well as the factors affecting it. In the TPF, three functional zones were distinguished: “trunk”, “crown”, “gap”. Forest litter stock (FLS) in the trunk zone and under the canopy of a tree varied from 27.69 to 78.34 t ha<sup>-1</sup>, in the gap areas averaging to 27.69 t ha<sup>-1</sup>. The variation of FLS, due to the influence of the TPF, was 15–37%. The annual input of litter was maximum in the crown zone (2.47–2.49 t ha<sup>-1</sup>), and minimum in the gap (2.37 t ha<sup>-1</sup>). The turnover time of forest litter was 15–16 years. It has been established that the crown levels the daily and seasonal temperature regime of the soil, reducing the maximum and increasing the minimum upper soil layer temperature values. The soil-bound CO<sub>2</sub> emission's seasonal dynamics by 41–56% was determined by the soil temperature at a 10 cm depth. The soils' relative moisture (Ws) was maximum in the autumn-spring period and amounted to 65–77% at 0–5 cm depth, and 20–24% at 5–15 cm. During the summer months, Ws decreased to 50–65% at 0–5 cm depth, to 10–15% at 5–15 cm. Depending on the combination of weather conditions and seasonal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes from the soil in the cowberry pine forest, annual emissions in different TPF zones varied by 1.5 times and amounted to 5.6 ± 0.7 in the gap, 8.5 ± 0.9 near the trunk, and 7.7 ± 0.9 t C/ha<sup>-1</sup> per year under the crown. The root respiration contribution to the total soil respiration was 24–45%, while the conditions of the TPF zones did not significantly affect the density of mycorrhizal distribution on the Scots pine (*Pinus sylvestris*) roots. The trend of higher microbiological activity indicators of soils can be traced in the “trunk” and “crown” zones of the tree. Microorganisms that use organic forms of nitrogen are the most numerous. The population of the cellulose-destroying microorganisms' complex is low, which determines the inhibition of the organic matter destruction and forest litter formation processes. The main environmental factor influencing the destruction processes rate and the magnitude of soil CO<sub>2</sub> fluxes in the cowberry pine forest is the TPF zone. The soil CO<sub>2</sub> emission's seasonal dynamics is determined by air and soil temperatures. As a result of the cluster analysis carried out based on the studied properties, two clusters were obtained. One of them included the functional zone “gap”, the other - “trunk” and “crown”.

**Keywords:** podzols, middle-taiga pine forest, tree's phytogenic field's zones, ecophysiological indicators of the biotic component of soils, CO<sub>2</sub> emission from soil, spatio-temporal aspect.

**Acknowledgements:** The material presented was obtained in the process of carrying out the State contract with the Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS.

### REFERENCES

Anan'eva N.D., *Mikrobiologicheskie aspekty samoochishcheniya i ustoychivosti pochv* (Microbiological aspects of soil self-purification and stability), Moscow: Nauka, 2003, 222 p.

Ananyeva N.D., Sushko S.V., Ivashchenko K.V., Vasenev V.I., Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 10, pp. 1492–1501.

Anderson J., Domsch K.H., A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biology & Biochemistry*, 1978, Vol. 10, No. 3, pp. 215–221.

Archeгова I.B., Kuznetsova E.G., Vliyanie drevesnykh rastenii na khimicheskii sostav atmosferykh osadkov v protsesse vosstanovleniya srednetaezhnykh lesov (The influence of woody plants on chemical composition of atmospheric precipitation in the course of restoration of middle taiga forests), *Lesovedenie*, 2011, No. 3, pp. 34–43.

Ball A.S., Microbial decomposition at elevated CO<sub>2</sub> levels: effect of litter quality, *Global Change Biol*, 1997, Vol. 3, pp. 379–386.

Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., *Bioticheskii krugovorot na pyati kontinentakh: azot i zol'nye elementy v prirodnykh nazemnykh ekosistemakh* (Biotic turnover on five conti-

- nents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008, 380 p.
- Berrueta L.A., Alonso-Salces R.M., Héberger K., Supervised pattern recognition in food analysis, *Journal of Chromatography A*, 2007, Vol. 1158, pp. 196–214.
- Boettcher S.E., Kalisz P.J., Single-tree influence on soil properties in the mountains of eastern Kentucky, *Ecology*, 1990, Vol. 7, No. 4, pp. 1365–1372.
- Bogatyrev L.G., Fomina T.V., Kharakteristika podstilok sosnyakov Prisurskogo lesnogo massiva (Characteristics of the litter of pine forests in the Prisura forest area), *Vestnik MGU. Seriya 17. Pochvovedenie*, 1991, No. 3, pp. 28–39.
- Chen Q.S., Li L.H., Han X.G., Yan Z.D., Wang Y.F., Yuan Z.Y., Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia, *Acta Phytocool Sinica*, 2003, Vol. 27, No. 2, pp. 202–209.
- Chukov S.N., *Strukturno-funktsional'nye parametry organicheskogo veshchestva pochv v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya* (Structural and functional parameters of soil organic matter under human impact), Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2001, 213 p.
- De Freitas Pereira M., Secretome analysis from the ectomycorrhizal ascomycete *Cenococcum geophilum*, *Frontiers in Microbiology*, 2018, Vol. 9 141, pp. 1–17.
- Evdokimov I.V., Metody opredeleniya biomassy pochvennykh mikroorganizmov (Methods for measuring biomass of soil microorganisms), *Russian J. Ecosystem Ecology*, 2018, Vol. 3, No. 3, pp. 1–20.
- Gersper P.L., Holowaychuk N., Some effects of stem flow from forest canopy trees on chemical properties of soils, *Ecology*, 1970, Vol. 52, No. 4, pp. 691–702.
- Herman D., Clarholm V., Trophic relationships in the soil microfood-web: Predicting the responses to a changing global environment, *Global Change Biology*, 1998, Vol. 4, No. 7, pp. 713–727.
- Hokkanen T.J., Järvinen E., Kuuluvainen T., Properties of top soil the relationship between soil and trees in a boreal Scots pine stands, *Silva Fennica*, 1995, Vol. 29, No. 3, pp. 189–203.
- Kalinin M.I., *Kornevedenie* (Root science), Moscow: Ekologiya, 1991, 173 p.
- Karpachevskii L.O., Prosvirina V.P., O dinamike stroeniya pochvennogo pokrova v lesnykh biogeotsenozakh (On the dynamics of the soil cover structure in forest biogeocenoses), *Pochvovedenie*, 1989, No. 5, pp. 94–103.
- Karpachevskii L.O., Zubkova T.A., Proisler T., Kennel M., Gitl G., Gorcharuk N.Y., Minaeva T.Y., Vozdeistvie pologa el'nika slozhnogo na khimicheskii sostav osadkov (Effect of compound spruce canopy on the chemical composition of sediments), *Lesovedenie*, 1998, No. 1, pp. 50–59.
- Karpechko Y., Lozovik P., Potapova I., Transformatsiya khimicheskogo sostava atmosferykh osadkov lesnoi rastitel'nost'yu (Transformation of the chemical composition of atmospheric precipitation by forest vegetation), *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov* (Fundamental problems of water and water resources), Proc. of IV All-Russian Scientific Conf., Moscow, 15–18 September 2015, Moscow: Izd-vo IVP RAN, 2015, pp. 155–158.
- Karpechko Y.V., Lozovik P.A., Fedorets N.G., Balance of chemicals in pine and spruce forests of Karelia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 762–770.
- Kolmogorova E.Y., Ufimtsev V.I., Nekotorye osobennosti khimicheskogo sostava opada sosny obyknovnoy, proizrastayushchei v usloviyakh porodnogo otvala (Some peculiarities of the chemical composition of Scotch pine debris, growing under conditions of coal pit), *Uspekhi sovremenno-go estestvoznaniya*, 2018, No. 11-2, pp. 267–272.
- Krishna M.P., Mohan M., Litter decomposition in forest ecosystems: a review, *Energy, Ecology and Environment*, 2017, Vol. 2, No. 4, pp. 236–249.
- Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Petrov A.S., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Ableeva V.A., Kuderyarov V.N., Effect of the observed climate changes and extreme weather phenomena on the emission component of the carbon cycle in different ecosystems of the southern taiga zone, *Doklady Biological Sciences*, 2011, Vol. 441, No. 6, pp. 412–416.
- Kuzyakov Y.V., Larionova A.A., Contribution of rhizomicrobial and root respiration to the CO<sub>2</sub> emission from soil (A review), *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol. 39, No. 7, pp. 753–764.
- Larionova A.A., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Zolotareva B.N., Yevdokimov I.V., Kuderyarov V.N., Carbon dioxide emissions from agrogray soils under climate changes, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 2, pp. 168–176.
- Lawrence D.J., Luckai N., Meyer W.L., Shahi C., Fazekas A.J., Kesanakurti P., Newmaster S., Distribution of white spruce lateral fine roots as affected by the presence of trembling aspen: root mapping using simple sequence repeat DNA profiling, *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, Vol. 42, pp. 1566–1576.
- Liski J., Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – effect of trees and implications for sampling, *Silva Fennica*, 1995, Vol. 29, No. 4, pp. 255–266.
- Lukina N.V., Gorbacheva T.T., Nikonov V.V., Lukina M.A., Spatial variability of soil acidity in the course of human-induced (technogenic) succession of forest biogeocenoses, *Eurasian Soil Science*, 2003, Vol. 36, No. 1, pp. 32–45.
- Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Forest soil fertility: the base of relationships between soil and vegetation, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 725–733.
- Medvedeva M.V., Bakhmet O.N., Moshkina E.V., Solodovnikov A.N., Zachinyaeva A.V., Prostranstvennoe var'irovanie biologicheskoi aktivnosti pochv osnovnogo drevostoya srednetazhnoi podzony Karelii (Spatial variation of the size of biological activity of soils of a pine stand in the middle taiga subzone of Karelia), *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnykh resursov*, 2020, No. 5, pp. 35–47.
- Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii*, (Methods of soil microbiology and biochemistry), Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1991, 303 p.
- Mishustin E.N., Nikitin D.I., Vostrov I.S., Modernizatsiya metodov ucheta pochvennogo mikronaseleniya i ego aktivnosti (Modernization of methods for accounting for soil micropopulation and its activity), In: *Mikroorganizmy v sel'skom khozyaistve* (Microorganisms in agriculture), Minsk, 1968, pp. 144–150.
- Morozova R.M., *Lesnye pochvy Karelii* (Forest soils in Karelia), Leningrad: Nauka, 1991, 184 p.
- Nikonov V.V., Lukina N.V., Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' pitatel'nogo rezhima Al-Fe-gumusovykh

- podzolov boreal'nykh lesov (Spatial and temporal variability of the nutrient regime of Al-Fe-humus podzols in boreal forests), *Pochvovedenie*, 2000, No. 12, pp. 1487–1495.
- Olson J.S., Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems, *Ecology*, 1963, Vol. 44, pp. 322–331.
- Orlova M.A., Lukina N.V., Smirnov V.E., Metodicheskie podkhody k otboru obraztsov lesnoi podstilki s uchetom mozaichnosti lesnykh biogeotsenozov (Methodology of forest litter sampling taking into account the patchiness of forest biogeocoenoses), *Lesovedenie*, 2015, No. 3, pp. 214–221.
- Ostonen I., Helmisaari H.-S., Borke W., Tedersoo L., Kukumägi M., Bahram M., Lindroos A.-J., Nöjd P., Uri V., Merilä P., Asi E., Lõhmus K., Fine root foraging strategies in Norway spruce forests across a European climate gradient, *Global Change Biology*, 2011, Vol. 17, No. 12, pp. 3620–3632.
- Pfeifer M., Gonsamo A., Woodgate W. et al., Tropical forest canopies and their relationships with climate and disturbance: results from a global dataset of consistent field-based measurements, *Forest Ecosystems*, 2018, Vol. 5, No. 7. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0118-7>
- Romashkevich A.I., Gerasimova M.I., Mikromorfologiya i diagnostika pochvoobrazovaniya (Micromorphology and diagnostics of soil formation), Moscow: Nauka, 1982, pp. 127.
- Rooney N., McCann K.S., Integrating food web diversity, structure and stability, *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 40–46.
- Rukovodstvo po kompleksnomu monitoringu* (Integrated Monitoring Guide), Moscow: FGBU "IGKE Rosgidrometa i RAN", 2013, 153 p.
- Semenova L.A., Morfologiya mikoriz sosny obyknovЕННОI v spelykh lesakh (Morphology of Scotch pine mycorrhiza in mature forests), In: *Mikoriznye griby i mikorizy lesoobrazuyushchikh porod severa* (Mycorrhizal fungi and mycorrhiza of forest-forming species of the north), Petrozavodsk: Karelskii filial AN SSSR, 1980, pp. 103–132.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D., Assessment of intra-biogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub–herbaceous vegetation in spruce stands, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 1, pp. 27–38.
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and recognition of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
- Shubin V.I., *Mikotrofnost' drevnykh porod, ee znachenie pri razvedenii lesa v taezhnoi zone* (Mycotrophy of tree species, its importance in forest cultivation in the taiga zone), Leningrad: Nauka, 1973, 264 p.
- Smol'yaninov I.I., *Biologicheskii krugovorot veshchestv i povyshenie produktivnosti lesov* (Biological cycling and increasing forest productivity), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1969, 192 p.
- Tabak H.H., Lens P., van Hullebusch E.D., Dejonghe W., Developments in bioremediation of soils and sediments polluted with metals and radionuclides – 1. Microbial processes and mechanisms affecting bioremediation of metal contamination and influencing metal toxicity and transport, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2005, Vol. 4, No. 3, pp. 115–156.
- Taylor A.F., Martin F., Read D.J., Fungal diversity in ectomycorrhizal communities of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and Beech (*Fagus sylvatica* L.) along north-south transects in Europe, *Ecological Studies*, 2000, Vol. 142, pp. 343–365.
- Uranov A.A., Fitogennoe pole (Phytogenic field), In: *Problemy sovremennoi botaniki* (Challenges of modern botany) Moscow, Leningrad: Nauka, 1965, Vol. 1, pp. 251–254.
- Zagural'skaya L.M., Mikrobiologicheskie aspekty monitoringa lesnykh pochv Karelii v usloviyakh zapovednogo rezhima (Microbiological aspects of monitoring forest soils in strictly reserved areas), *Lesovedenie*, 2003, No. 4, pp. 42–46.
- Zvyagintsev D.G., Bab'eva I.P., Zenova G.M., *Biologiya pochv* (Soil Biology), Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2005, 448 p.
- Onwuka B., Mang B., Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth, *Adv Plants Agric Res*, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 34–37.

УДК 574.42:631.43/631.468

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПОДСТИЛОЧНЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ ВЫРУБОК И ГАРЕЙ ХИБИН<sup>1</sup>

© 2022 г. И. В. Зенкова<sup>а</sup>, \*, И. М. Штабровская<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ “Кольский НЦ РАН”, мкр. Академгородок, д. 14а, Апатиты, 184209 Россия

\*E-mail: i.zenkova@ksc.ru

Поступила в редакцию 01.11.2021 г.

После доработки 07.12.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

С 2018 г., после присвоения Хибинам статуса национального парка, возросла актуальность задач сохранения уникальных природных объектов и эталонных комплексов хибинской горной тундры и северной тайги, экологического мониторинга и восстановления территорий, нарушенных хозяйственной деятельностью горнодобывающих компаний. Одним из последствий такой деятельности, нанесшей значительный экологический ущерб уязвимым экосистемам заполярного горного массива, стал обширный низовой пожар на месте брошенной нерасчищенной промышленной вырубке в долине реки Кунийок. С целью анализа восстановительных сукцессий почвенного покрова и населяющей его фауны в изменившихся условиях инсоляции и гидротермического режима нами был организован почвенно-экологический мониторинг горно-соснового леса и трех участков его антропогенной трансформации – горелого сосняка, вырубки и горелой вырубке. Спустя 2 (2015 г.) и 5–6 лет (2018 г.) после воздействия на всех модельных участках выполнены учеты беспозвоночных (почвенными ловушками с формалином), температуры и влажности подстилки на глубине 5 см (автономными термогидрохронами). Выявлено устойчивое повышение влажности подстилки при нарушении (горелый лес) или сведении (вырубка) древесного яруса, что соответствует представлениям о развитии процессов поверхностного гидроморфизма и заболачивания на лесных вырубках и гарях. Учтены беспозвоночные 34 таксономических групп при повышенных показателях их разнообразия и динамической плотности в более теплый вегетационный сезон 2018 г. Наибольшим числом таксонов характеризовались гари; наименьшим, но с максимальной плотностью беспозвоночных – вырубка; минимальной динамической плотностью – дважды нарушенная горелая вырубка. Обе вырубке отличались более выраженными межвидовыми связями с участием паразитических перепончатокрылых и жуков-некрофагов. В паре соседних лесных биотопов “контрольный–горелый сосняк” прослежено усиление различий в структуре населения беспозвоночных через 5 лет после обширного низового пожара по сравнению с обследованием этих участков через 2 г. Установлена прямая корреляционная зависимость межгодовых различий плотности герпетобионтов от температуры лесной подстилки ( $r \geq 0.71$ ) и обратная – от ее влажности ( $-0.79 \leq r \leq -0.82$ ). Факторами, определяющими различия в плотности беспозвоночных между годами и участками, оказались: сумма температур ( $r = 0.95$ ), минимальные температуры июля (0.89) и максимальные температуры сентября (0.94) и августа (0.92). Подтверждена важность лесной подстилки для сохранения на горно-лесных вырубках и гарях исходного комплекса фауны и поддержания гидротермического режима, благоприятного для ее восстановления. Сделан методический вывод о большем фаунистическом сходстве участков, удаленных на расстоянии 1 км, но сохранивших лесную подстилку (контрольный сосняк и вырубка), по сравнению с парами участков, заложенных в 300 м друг от друга для их сопоставления по принципу “горелый – незатронутый пожаром” (т.е. контрольный и горелый сосняки, горелая и негорелая вырубке).

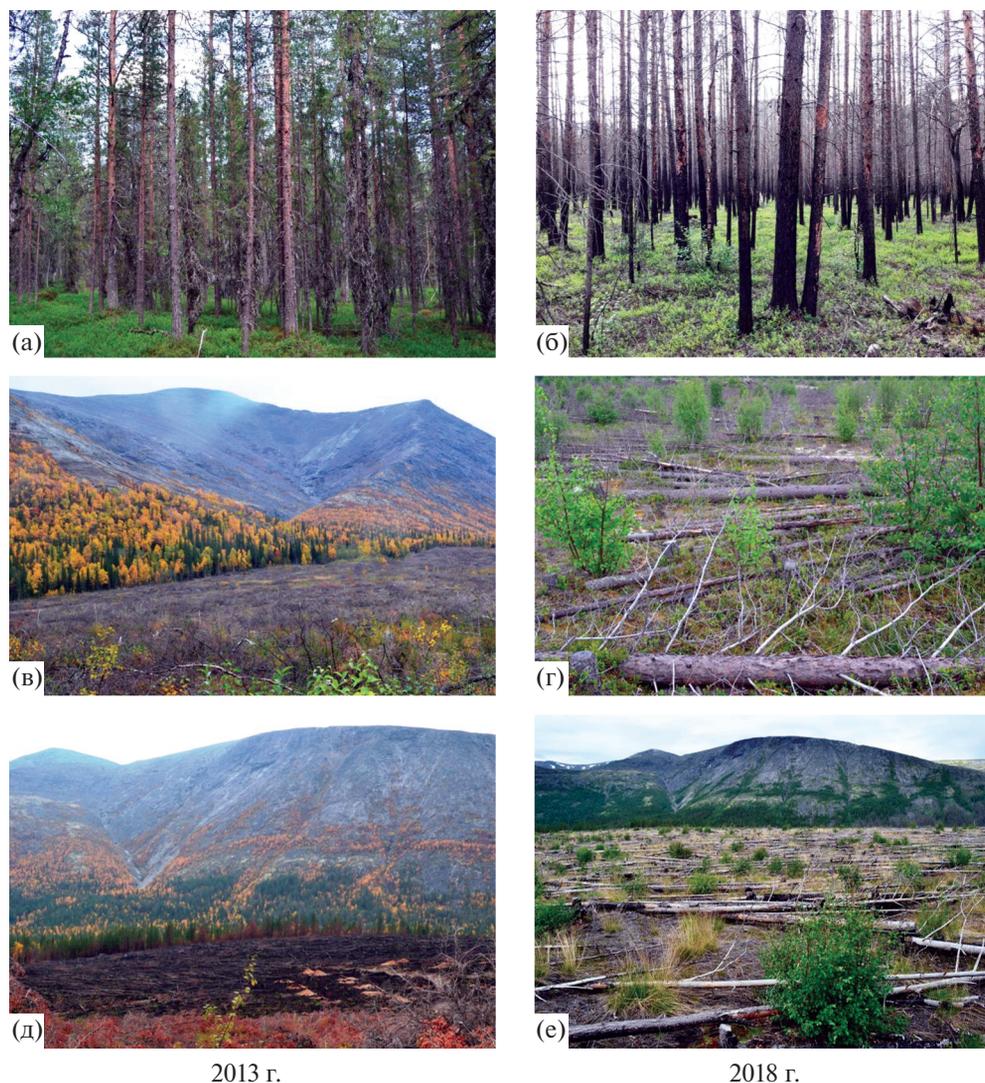
*Ключевые слова:* лесная подстилка, температура, влажность, беспозвоночные-герпетобионты, вырубке, гари, Хибинские горы.

DOI: 10.31857/S0024114822030123

История промышленного освоения Хибин в Мурманской области насчитывает почти 90 лет, и все это время воздействию со стороны горнодо-

бывающих и перерабатывающих предприятий была подвержена преимущественно юго-восточная часть массива. Одно из последних планируемых к освоению месторождений апатит-нефелиновой руды “Партомчорр” находится на севере Хибин – в долине реки Кунийок. Летом 2012 г.

<sup>1</sup> “Исследования выполнены в рамках темы НИР № 1021051803679-9 ИППЭС КНЦ РАН и поддержаны грантом РФФИ “Аспиранты”, проект № 20-34-90135.”



**Рис. 1.** Модельные участки в долине реки Кунийок в Хибинах: (а) – ненарушенный сосняк (контроль), (б) – горелый сосняк, (в, г) – нерасчищенная вырубка у подножья горы Партомчорр, (д, е) – горелая вырубка у подножья горы Путеличорр.

здесь была организована промышленная рубка леса на площади более 100 га (Новости-24 ..., 2012). Из-за конфликта интересов промышленников и экологов, выступавших против строительства обогатительной фабрики и прокладки коммуникаций в долине в связи с организацией национального парка “Хибины”, работы по рубке леса и очистке территории от порубочных остатков были прекращены. Через год на неочищенной вырубке возник обширный пожар, который охватил горно-таежный лес в долине и лесной пояс на склоне горы Путеличорр. Выгоревшая площадь составила 8 га. Препградой для распространения пожара стала проходящая по долине грунтовая дорога, которая разделила территорию на сгоревшую (выгоревшие сосняк и вырубка) и не затронутую пожаром (исходный

сосняк и его вырубка) (рис. 1). Таким образом, в непосредственной близости друг от друга возникли четыре участка, выбранные нами в качестве модельных для проведения экологического мониторинга за сукцессионными изменениями нарушенного почвенного покрова и населяющей его фауны.

Первичное почвенно-зоологическое обследование лесных биотопов – исходного (контрольного) и горелого сосняков мы провели в 2015 г., через 2 г. после обширного низового пожара (Зенкова, 2016). В 2018 г. объем работ расширили и охватили вырубку – сгоревшую и негорелую. На всех участках оценивали таксономическое разнообразие и обилие *почвенных беспозвоночных* в образцах подстилки и *герпетобионтной фауны*, населяющей поверхность подстилки и ярус напоч-

венной растительности (методом почвенных ловушек с формалином). Результаты исследования почвенной фауны показали, что, несмотря на разнонаправленные тренды изменения численности отдельных таксонов, общая численность педобионтов через 5–6 лет после видов антропогенного воздействия была достоверно ниже (в 1.8–3.5 раза) по сравнению с контрольным сосняком при незначимых различиях этого показателя между нарушенными участками (Зенкова и др., 2020). В настоящем сообщении приводится анализ населения герпетобионтных беспозвоночных и гидротермических показателей почв на модельных участках, спустя 6 лет после вырубке леса и 2 и 5 лет после пожара.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Пары лесных участков “контрольный сосняк (С)–горелый сосняк (ГС)” и вырубок “горелая (ГВ)–незатронутая пожаром (В)” были выбраны на плоском ландшафте в межгорной долине реки Кунийок на севере Хибин, 67°50′ с.ш., 33°39′ в.д., на высотах 220–235 м над ур. м. (Зенкова и др., 2020). Расстояние между парами составляло 1 км, а между участками в каждой паре — 300 м: по 150 м от разделяющей их грунтовой дороги.

*Контрольный сосняк* (рис. 1а) характеризовался мощной подстилкой ( $9.5 \pm 1.3$  см) и хорошо развитым гетерогенным ярусом из кустарничков, мхов и лишайников. Древесный ярус сформирован лапландской формой сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* f. *lapponica*), елью (*Picea obovata*) и березой извилистой (*Betula tortuosa*); кустарничковый — вороникой (*Empetrum nigrum*), черникой (*Vaccinium myrtillus*), брусникой (*V. vitis-idaea*), голубикой (*V. uliginosum*), багульником (*Ledum palustre*), мхами рода *Bryophyta* и лишайниками рода *Cladonia*.

В *горелом сосняке* (рис. 1б) подрост ели и березы, напочвенная растительность и валежник выгорели. Лесная подстилка протлела. Высота нагара на стволах сосен достигала 2–3 м, их большая часть лишилась крон. Через два года поверхность почвы имела темную окраску, территория очагово зарастала вегетативно возобновляющейся черникой, что характерно для послепожарного восстановления травяно-кустарничкового яруса в хвойных лесах Кольского п-ова (Баккал и др., 2006). Спустя пять лет зола с поверхности почвы заметно вымылась, покров из черники и злаков стал более сомкнутым, во влажных микропонижениях росла брусника, встречался иван-чай и редкий подрост березы высотой до 30–40 см.

На 6-летней *вырубке* (рис. 1в, 1г), сохранившей гетерогенный ярус из кустарничков, мхов и лишайников, шло активное зарастание березой; неочищенная территория завалена стволами и вет-

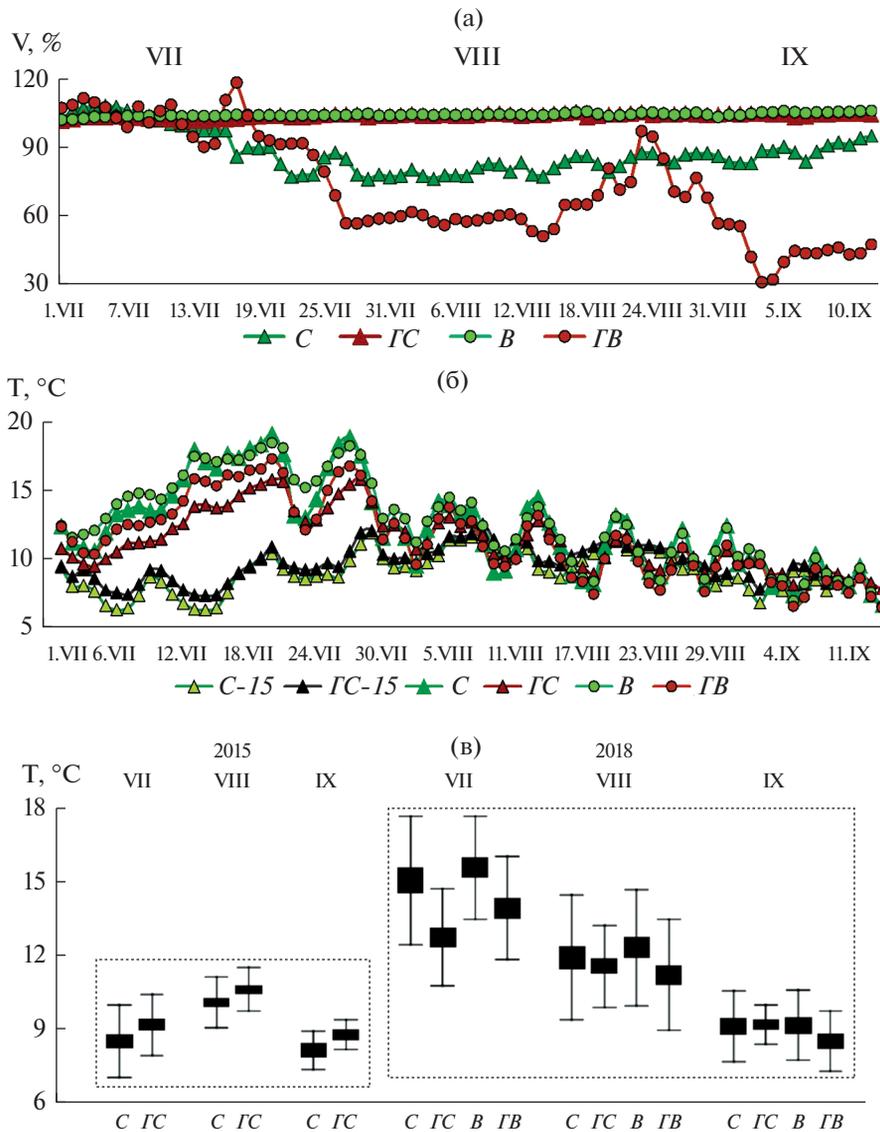
ками, труднопроходима; подстилка мощная, темноокрашенная, с признаками оторфовывания в нижней части.

*Горелая вырубка*, испытавшая воздействие два года подряд, и через 6 лет выглядела наиболее нарушенной (рис. 1д, 1е): рубка уничтожила древесный ярус, а пожар — кустарничковый ярус и подстилку, обнажив минеральную массу почвы. Между поваленными обугленными стволами сосен встречались куртины злаков, отдельные растения иван-чая и пятна печеночных мхов; слабый подрост березы отмечался в основном вдоль обочины дороги.

На всех участках в 2015 и 2018 гг., с июля до середины сентября (всего 75 суток), отлавливали беспозвоночных пластиковыми стаканами-ловушками (500 мл) с формалином, вкопанными в почву до верхней кромки. Повторность на каждом участке была 30-кратной: 3 линии (I–III) по 10 ловушек с расстоянием между линиями и ловушками по 10 м, таким образом, площадь облова составила по 0.18 га. В лабораторных условиях содержимое ловушек разбирали вручную, число особей пересчитывали в экз. на 100 ловушко-суток (показатель динамической плотности). Общее число лов.-сут. равнялось 2250, число беспозвоночных, учтенных в двух сосняках в 2015 г. — 4227 экз., отловленных на 4 участках в 2018 г., — 19776 экз.

Автоматическими термогидрохронами ТРВ-2 (Регистраторы ..., <https://gigrotermop.ru>) каждые 2 ч регистрировали температуру ( $T$ , °C) и влажность ( $V$ , %) почвенного воздуха на глубине 5 см. Данная глубина оказалась максимальной во фрагментах подстилки на горелой вырубке с эродированным почвенным покровом. Вычисляли среднесуточные, среднемесячные и средние за 75 сут значения. Число показаний  $T$  и  $V$  составило на каждом участке по 1800, общий объем измерений — 10800.

Достоверность различий средних значений измеренных показателей подстилки и населения беспозвоночных между участками оценивали по  $t$ -крит. Стьюдента, различий в динамике  $T$  и  $V$  — методом ANOVA с  $F$ -крит. Фишера. Зависимость плотности беспозвоночных от эдафических факторов определяли методом корреляционного анализа. Сходство-различия участков по таксономическому составу и динамической плотности беспозвоночных выявляли методом кластерного анализа. Результаты обрабатывали в программах Excel, Statistica-12. Структуру доминирования характеризовали по соотношению доминантов, субдоминантов, малочисленных и редких беспозвоночных с соответствующими долями плотности:  $\geq 10$ ,  $< 10$ ,  $< 5$  и  $< 1\%$  (Southwood, 1978).



**Рис. 2.** Гидротермические показатели подстилки на глубине 5 см на модельных участках в июле–сентябре 2015 и 2018 гг.: (а), (б) – динамика влажности и температуры, (в) – среднемесячные температуры. *C-15, GC-15* – контрольный и горелый сосняки, обследованные в 2015 г.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

*Гидротермические показатели почв*

**Влажность** воздуха в 5 см слое подстилки контрольного *C* не опускалась ниже 97% в прохладный и дождливый вегетационный сезон 2015 г. и 76% в более теплый 2018 г. На нарушенных участках *GC* и *B* с сохранившейся подстилкой влажность постоянно была близка к 100% ( $CV < 1\%$ ), что свидетельствовало об изменении водного режима почвы в направлении гидроморфизма (рис. 2а). На *B* это подтверждалось оторфовыванием нижней части мощной подстилки. В *GC* достоверное повышение *V* подстилки по сравнению с соседним контрольным *C* отмечалось уже через 2 г. после пожара. Лишенная напочвенной раститель-

ности и органогенного горизонта *GB* отличалась наибольшей сезонной вариабельностью влажности ( $CV = 32\%$ ) за счет как минимальных ( $V = 30\%$ , в погожие дни “бабьего лета” 8–9/IX), так и максимальных среди участков (до 118%, 22/VII) среднесуточных значений.

Причиной устойчивого повышения влажности сохранившейся подстилки нарушенных *GC* и *B* можно считать уничтожение древесного яруса. Кроны деревьев, перехватывая атмосферные осадки, снижают их поступление в почву, а корни выполняют мощную водорегулирующую функцию в почве. Значительная часть почвенной влаги расходуется растениями древесного и кустарникового яруса на транспирацию (Карпечко,

2008, 2016, Архипова, Исаченкова, 2013). На фоне увеличения поступления осадков на поверхность нарушенных территорий происходит сдвиг расхода почвенной влаги с физиологического процесса ее транспирации растениями на физический процесс испарения с поверхности почвы (Краснощеков, 1994; Евдокименко, 1996; Поляков, 2010; Тарасов и др., 2011). В Хибинах, в условиях высокой влажности горного климата (Яковлев, 1961), непродолжительного периода с положительными температурами воздуха и расположения исследуемых участков в межгорной речной долине, принимающей водные стоки с окружающих склонов, расход почвенной влаги на испарение представляется нам несущественным в сравнении с ее приходом. Следовательно, дисбаланс этих процессов может быть реальной причиной гидроморфизма почв на нарушенных участках — *ГС* и *В*.

Заболачиванию почв после сведения лесов в разных широтных районах посвящена обширная литература (Морозова, 2004; Исаченкова, Герасимова, 2007; Архипова, Исаченкова, 2013). В средней тайге переувлажнение подзолистых почв в первые 5–10 лет послерубочной сукцессии проявляется даже на автоморфных позициях ландшафта (Лаптева и др., 2015). Изменение гидрологического режима почв по пути заболачивания считается основным последствием сплошных рубок на начальных стадиях восстановления и в горных районах (Дмитриев, 1950; Морозова, 2004; Мерзляков, 2008; Дымов, Милановский, 2014; Дымов, 2017). Развитию процесса поверхностного гидроморфизма способствует увеличение мощности и запасов снежного покрова на вырубках по сравнению с хвойными лесами, полог которых задерживает до 30–40% снеговых осадков (Лебедев, 1982). На вырубках горно-таежных лесов запасы воды в снеге на 20–30 мм (или 15–20%) выше, чем под пологом леса (Буренина и др., 2013; Онучин и др., 2014). В условиях повышенной влажности горного климата и возросшего после сведения леса поступления атмосферных осадков на вырубках активно развивается моховой покров, который, имея высокую влагоемкость, снижает интенсивность газообмена между приземным слоем воздуха и почвой, ухудшая ее аэрацию и создавая дополнительные условия для поверхностного переувлажнения (Дымов и др., 2012; Лопатовская, 2018).

В *ГС*, наряду с протлевшим слоем мха, аккумулирующим влагу, ее удерживанию в лесной подстилке и верхних минеральных горизонтах способствует пирогенный уголь. Обладая высокопористой структурой, уголь способен длительное время сорбировать большое количество влаги на единицу массы (Брянин и др., 2019). Влагонасыщение горелых лесных подстилок неоднократно объяснялось их пирогенным уплотнением (Кисе-

лева, 1978; Краснощеков, Сорокин, 1988; Бескоровайная и др., 2005; Тарасов и др., 2008; Назаркина, 2009; Тер-Мисакянц, 2013; Дымов и др., 2015). Сгорание рыхлой подстилки и образование тяжелых компонентов — сажи, частиц угля и золы уменьшает порозность почвы и изменяет ее водно-физические свойства. Продукты сгорания заполняют почвенные поры, снижают фильтрационные характеристики и водоотдачу почвы, повышают ее влагозапасы. Дополнительно водоотталкивающие свойства почве придают гидрофобные ароматические соединения — органические продукты пиролиза, которые образуются в таежных лесах при сгорании лигнинов и смолистых компонентов древесины хвойных пород (Цибарт, Геннадиев, 2011).

**Прогрев** подстилки в лесных биотопах в 2015 и 2018 гг. носил противоположный характер. Через 2 г. после пожара темноокрашенная подстилка *ГС* прогревалась достоверно сильнее по сравнению с соседним контрольным *С* (рис. 2б, 2в). Средняя за сезон *T* на глубине 5 см составила  $+9.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$  против  $+9.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ; максимальная, в первой декаде июля,  $+12.6^\circ\text{C}$  против  $+12.0^\circ\text{C}$ ; сумма температур за 75 сут была на  $43^\circ\text{C}$  выше: 685 против  $642^\circ\text{C}$ . Минимальная за сезон среднесуточная *T* также была выше в горелой подстилке:  $+7.4^\circ\text{C}$  против  $+6.4^\circ\text{C}$  в *С*. Активные среднесуточные  $T \geq +10^\circ\text{C}$  регистрировались в подстилке *ГС* на протяжении 30 из 75 сут (или в 43% случаев), а в контрольном *С* — только 21 день (30%). Дни с эффективными  $T \geq +5^\circ\text{C}$  (но  $< +10^\circ\text{C}$ ), напротив, преобладали в подстилке *С*: 49 сут против 40 в *ГС* или в 70% суток против 57%. Динамика *T* в подстилке контрольного *С* была достоверно более вариabельна, чем в *ГС* ( $F = 7.0, p = 0.009$ ) и, несмотря на наличие развитого мохово-лишайниково-кустарничкового яруса, в большей степени зависела от *T* атмосферного воздуха (коэф. корр.  $r = 0.83$  для *С* и 0.80 для *ГС*).

В более теплый вегетационный сезон 2018 г. температура подстилки была достоверно выше на участках с напочвенной растительностью — в контрольном сосняке и на вырубке. Средняя за июль–сентябрь *T* на глубине 5 см составила на этих участках  $+12.4$  и  $+12.7^\circ\text{C}$  соответственно, а на горелых не превысила  $+11.5^\circ\text{C}$  (рис. 2б). Сумма температур за 75 сут равнялась  $954^\circ\text{C}$  на *В* и  $927^\circ\text{C}$  в *С*, а на горячих оказалась на  $90–100^\circ\text{C}$  меньше, чем на *В*, и на  $60–70^\circ\text{C}$  ниже, чем в контрольном *С*. Число дней с активными среднесуточными  $T \geq +10^\circ\text{C}$  увеличивалось в ряду: *ГВ* (48 сут)—*ГС* (54)—*С* (55)—*В* (59), т.е. для лесных биотопов было сопоставимо, в отличие от 2015 г.

В 2018 г. самым теплым месяцем, достоверно дифференцирующим прогрев участков, был июль ( $F \geq 8.0, p \leq 0.007$ ). С первых чисел августа различия между участками в величине и динамике среднесуточных *T* нивелировались, и с 9/IX, а на

*ГВ* раньше – с 27/VIII, температура на глубине 5 см на всех участках была устойчиво ниже +10°C (рис. 2б, 2в). В более холодный вегетационный сезон 2015 г. подстилка в лесных биотопах максимально прогрелась только к августу, но до меньших *T*, чем в августе 2018 г.

#### Население беспозвоночных животных

С июля по сентябрь 2015 г. в контрольном и горелом сосняках отловлены представители 28 таксономических групп при сопоставимом числе таксонов и трехкратном преобладании их общей плотности в *ГС*. В 2018 г. на 4-х модельных участках учтено 34 таксона при наибольшем разнообразии в горелом сосняке, наименьшем разнообразии, но максимальной плотности на вырубке и минимальной динамической плотности на дважды нарушенной горелой вырубке (табл. 1, рис. 3).

Для сравнения, в образцах подстилки, отобранных в день установки почвенных ловушек в начале июля, выявлено 20 таксонов почвенной фауны (от 10 до 15 на модельных участках), общими из которых были лишь 6 таксонов, доминирующих в подстилке северотаежных лесов Мурманской области: активно подвижные хищные пауки, многоножки-костянки, муравьи, жуки мягкотелки, стафилиниды и сапрофильные личинки жуков-щелкунов (Зенкова и др., 2016, 2020).

Следует отметить, что расположение модельных участков в северной части Хибин и освобождение ведущей к ним грунтовой дороги от снежников не ранее начала июля не позволило организовать полевые работы в мае–июне, в период размножения и наибольшей активности беспозвоночных, что, вероятно, привело к недоучету их реального разнообразия и обилия.

#### Лесные биотопы

В контрольном сосняке в оба вегетационных сезона в ловушках преобладали муравьи, пауки и жуки долгоносики с суммарной долей 82–89%. Многочисленными были типичные для лесной подстилки хищные краснотелковые клещи и жесткокрылые (жужелицы, стафилиниды, мягкотелки); малочисленными – многоножки-костянки и жуки чернотелки, растительноядные клопы, цикадки и слизни; единичными – большинство насекомых-фитофагов: шмели, гусеницы чешуекрылых, ложногусеницы пилильщиков, щелкуны, короеды и пилильщики, личинки жуков-усачей (табл. 1).

В более теплый сезон 2018 г. число таксонов увеличилось с 24 до 28, в том числе за счет насекомых-фитофагов: сеноедов, тлей, гусениц пядениц. Уловистость представителей 9 таксонов возросла в 2–13 раз. Плотность подстилочных хищников (многоножек, жужелиц, мягкотелок,

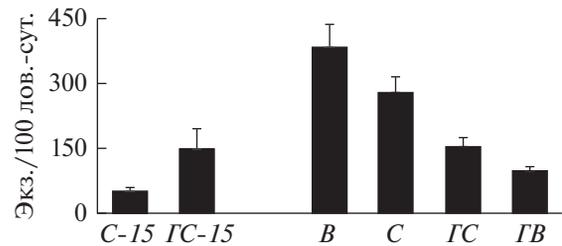


Рис. 3. Динамическая плотность беспозвоночных на модельных участках через 2 (*C-15*, *GS-15*) и 5–6 лет (*B*, *C*, *GS*, *GB*) после антропогенного воздействия.

клещей-краснотелок) и растительноядных моллюсков, цикадок, гусениц совок и жуков-усачей сохранилась на уровне 2015 г. Наряду с муравьями, пауками и долгоносиками массовыми в ловушках (более чем по 100 экз.) были стафилиниды, клопы и разнородная группа перепончатокрылых, однако возросшее обилие муравьев (74% всех беспозвоночных против 59% в 2015 г.) определило более олигодоминантную структуру населения в 2018 г. (табл. 1). Пространственное распределение беспозвоночных в *C*, более равномерное, чем в *GS* и на *B* (рис. 4), также зависело от распределения муравьев ( $r = 0.99$ ). В целом у половины из 28 таксонов, выявленных в контрольном сосняке в 2018 г., динамическая плотность оказалась максимальной по сравнению с нарушенными участками (табл. 2).

В горелом сосняке через 2 г. после низового пожара обитали беспозвоночные 22 таксонов. Общими с контрольным участком, удаленным на 300 м, были 18 групп (табл. 1). Из них у представителей 8-ми таксонов динамическая плотность была ниже контрольных величин (пауки, мягкотелки, перепончатокрылые, короеды, цикадки, гусеницы совок, моллюски, личинки двукрылых), у 7-ми таксонов – выше (многоножки, муравьи, жужелицы, стафилиниды, усачи, долгоносики, клопы); у растительноядных щелкунов и пилильщиков – сопоставима с контролем. В ловушках *ГС* не оказалось жуков гладкотелок и чернотелок, клещей-краснотелок и фитофагов – пилильщиков, шмелей и листоблошек. Напротив, появились обитатели открытых пространств – сенокосцы, тараканы и божьи коровки, не выявленные в контрольном *C*. В целом из 28 таксонов, отловленных на двух лесных участках в 2015 г., представители 14 таксонов (или 50%) имели большую плотность в контрольном *C*, представители 11 таксонов (39%) – в *ГС* (табл. 3). Пятикратно возросшее в сравнении с контролем обилие муравьев (северного лесного *Formica aquilonia*) сделало их абсолютными доминантами в *ГС*: 89% от общей плотности беспозвоночных. Заселение муравьями сосняков, нарушенных низовым пожаром, и активное формирование муравьиных семей в тече-

**Таблица 1.** Население беспозвоночных на модельных участках в 2015 и 2018 гг. (в порядке убывания относительной плотности в ловушках контрольного сосняка, %)

Таксономическая группа	2015		2018			
	<i>C-15</i>	<i>ГС-15</i>	<i>C</i>	<i>ГС</i>	<i>B</i>	<i>ГВ</i>
Муравьи ( <i>Formicidae</i> )	++++	++++	++++	++++	++++	++
Пауки ( <i>Aranei</i> )	++++	++	++++	++++	++++	++++
Долгоносики ( <i>Curculionidae</i> )	+++	++	++	+	+	+
Перепончатокрылые ( <i>Hymenoptera</i> )*	++	+	++	++	+	+++
Стафилиниды ( <i>Staphylinidae</i> )	++	+	++	++	+	++
Жужелицы ( <i>Carabidae</i> )	++	++	+	+++	+	++++
Цикадовые ( <i>Cicadoidea</i> )	++	+	+	+	++	++++
Многоножки ( <i>Lithobiidae</i> )	++	+	+	++	+	++
Мягкотелки ( <i>Cantharidae</i> )	++	+	+	+	+	+
Клещи-краснотелки ( <i>Trombidiidae</i> )	++	-	+	+	-	+
Клопы ( <i>Heteroptera</i> )	+	+	++	+	+	++
Двукрылые ( <i>Diptera</i> )	+	+	+	+	+	++
Щелкуны ( <i>Elateridae</i> )	+	+	+	+	+	+
Совки ( <i>Noctuidae</i> )	+	+	+	+	+	+
<i>Coleoptera</i> sp.	+	+	+	++	+	-
Моллюски ( <i>Gastropoda</i> )	+	+	+	+	+	-
Короеды ( <i>Scolytidae</i> )	+	+	+	+	-	-
Усачи ( <i>Cerambycidae</i> )	+	+	+	-	+	+
Пилюльщики ( <i>Byrrhidae</i> )	+	+	-	+	-	++
Чернотелки ( <i>Tenebrionidae</i> )	+	-	++	++	+	+++
Пилильщики ( <i>Tenthredinoidea</i> )	+	-	+	++	+	+
Шмели ( <i>Bombidae</i> )	+	-	+	-	+	-
Гладкотелки ( <i>Leiodidae</i> )	+	-	+	+	-	+
Листоблошки ( <i>Psyllidoidea</i> )	+	-	-	+	-	+
Тли ( <i>Aphidoidea</i> )	-	+	+	+	+	+
Дождевые черви ( <i>Lumbricidae</i> )	-	-	+	+	+	+
Сеноеды ( <i>Psocoptera</i> )	-	-	+	+	+	-
Сенокосцы ( <i>Opiliones</i> )	-	++	+	++++	-	+
Могильщики ( <i>Nicrophorus</i> )	-	-	+	+	-	+
Пяденицы ( <i>Geometridae</i> )	-	-	+	-	-	-
Тараканы ( <i>Blattodea</i> )	-	+	-	+	+	+
Божьи коровки ( <i>Coccinellidae</i> )	-	+	-	-	-	+
Энхитреиды ( <i>Enchytraeidae</i> )	-	-	-	+	-	+
Листоеды ( <i>Chrysomelidae</i> )	-	-	-	+	-	-
Личинки <i>Insecta</i>	-	-	-	-	+	+
Трипсы ( <i>Thysanoptera</i> )	-	-	-	-	-	+
Всего:						
Таксонов	24	22	28	30	24	29
экз./100 лов.—сут.	50	149	283	153	383	105

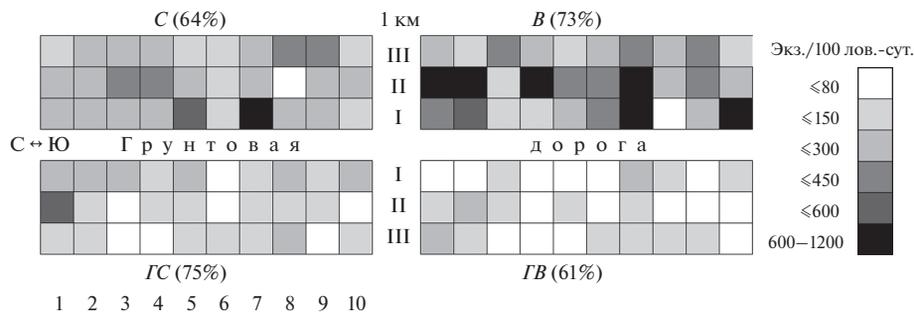
Примечание. Доля животных в ловушках: +++++  $\geq 10\%$ , +++  $< 10\%$ , ++  $< 5\%$ , +  $< 1\%$ .

\* Перепончатокрылые указаны без учета муравьев и пилильщиков. Прочерк — группа не выявлена.

ние 3-х первых лет развития гарей было прослежено в Окском заповеднике и объяснялось высокой численностью насекомых-ксилофагов и слабым задернением почвы (Аверина, 2002).

Через 5 лет после пожара структура населения беспозвоночных в *ГС* претерпела значительные

изменения как по отношению к контрольному *C*, так и в сравнении с 2015 г., что отразилось на дендрограмме кластеризации этих участков (рис. 5а). В более теплый вегетационный сезон 2018 г. в обоих лесных биотопах, *C* и *ГС*, увеличилось число таксонов в ловушках (с 22–24 до 28–30) и возросла



**Рис. 4.** Схема пространственного распределения беспозвоночных на модельных участках в 2018 г. (общая плотность, экз./100 лов.-сут.). 1–10 – почвенные ловушки, I–III – ловушко–линии (в направлении от грунтовой дороги вглубь участков), в скобках – коэф. пространственного варьирования плотности, %.

динамическая плотность большинства таксонов: у муравьев (на порядок), долгоносиков и клопов более выражено – в контрольном С; у большинства фитофагов (цикадки, гусеницы чешуекрылых, ложногусеницы пилильщиков, пилюльщики, короеды) и личинок двукрылых – в ГС, превысив контрольные показатели; у прочих перепончатокрылых, пауков, стафилинид, чернотелок и тлей – в обоих лесных биотопах. Сравнилась с контролем плотность стафилинид, гладкотелок и слизней. В обоих лесных биотопах появились сапрофильные дождевые черви, сеноеды и жуки-могильщики. Плотность хищных пауков, клещей-краснотелок, перепончатокрылых и мягкотелок в ГС оставалась ниже контрольных величин в оба года, а у муравьев, клопов, щелкунов, долгоносиков и усачей стала уступать контрольному С в 2018 г. Доля муравьев снизилась до 38%, и они делили доминирование с сенокосцами (23%) и пауками (11%). Таксонами, дифференцирующими лесные биотопы в оба года, оказались шмели, отмеченные только в ловушках контрольного С, и тараканы, выявленные только в ГС.

В результате разнонаправленных изменений обилия таксонов общая динамическая плотность беспозвоночных достоверно, в 5.7 раза, увеличилась только в контрольном С (табл. 1, рис. 3). Для сравнения в почвенных пробах общая численность фауны двукратно возросла в обоих лесных биотопах, однако все доминирующие таксоны оставались менее обильными в ГС, в итоге трехкратная разница в общей численности, выявленная между С и ГС в 2015 г., сохранилась и в 2018 г. (Зенкова и др., 2020).

В ряде публикаций, анализирующих начальные стадии послепожарных сукцессий, отмечается повышенная численность насекомых-вредителей. На разновозрастных гарях Печоро-Ильчского заповедника в Республике Коми это были долгоносики (*Hylobius abietis*), привлекаемые ослабленными соснами (Савельева, Долгин, 2008, 2009), в сосняках Окского заповедника, в зависимости от их спе-

лости, – жуки-пилюльщики, щелкуны или листоеды вида *Adoxus obscurus*, трофически связанного с иван-чаем, разрастающимся на гарях в первые годы после пожаров (Потапова, 2002). В сосновых лесах соседних регионов – центральной Швеции и Республики Карелия – в первые два года после пожаров на зарастающих гарях более многочисленными, чем в негорелых лесах, были сосущие фитофаги – тли, цикадовые, трипсы. Комплекс хищных беспозвоночных из-за недостатка пищи восстанавливался медленно: через 6 лет после пожара их биомасса составляла лишь 40–60% от контрольных показателей (Gongalsky, Persson, 2013).

В Хибинах в горелом сосняке выраженным увеличением плотности через два года после пожара отличались активно подвижные хищники, привлекаемые разреженным и лучше прогреваемым горелым лесом (сенокосцы, жужелицы) и его более теплой и влажной подстилкой (многоножки-костянки, стафилиниды), а также разрушители древесины – муравьи и долгоносики. Изменение общей плотности герпетобионтов по годам и участкам (трехкратное преобладание в ГС через 2 г. после пожара и почти двукратное отставание от контрольного С через 5 лет) также было скоррелировано преимущественно с динамикой подстилочных хищников – муравьев ( $r = 0.92$ ), пауков (0.82), перепончатокрылых (0.78), стафилинид (0.74) и фитофагов долгоносиков (0.63). Четкую тенденцию к увеличению численности в ГС через два и особенно через 5 лет после пожара проявили три группы зоофагов – многоножки, сенокосцы и жужелицы. Для многоножек, чувствительных к кислотности почвы, дополнительным благоприятным фактором могла быть повышенная зольность протлевшей подстилки.

Стволовые вредители – усачи и короеды, способные заселять ослабленные, усыхающие и мертвые деревья, а также привлекаемые территориями с большим количеством поваленных стволов, в оба года были единичны в ловушках как контрольного, так и горелого сосняков. По на-

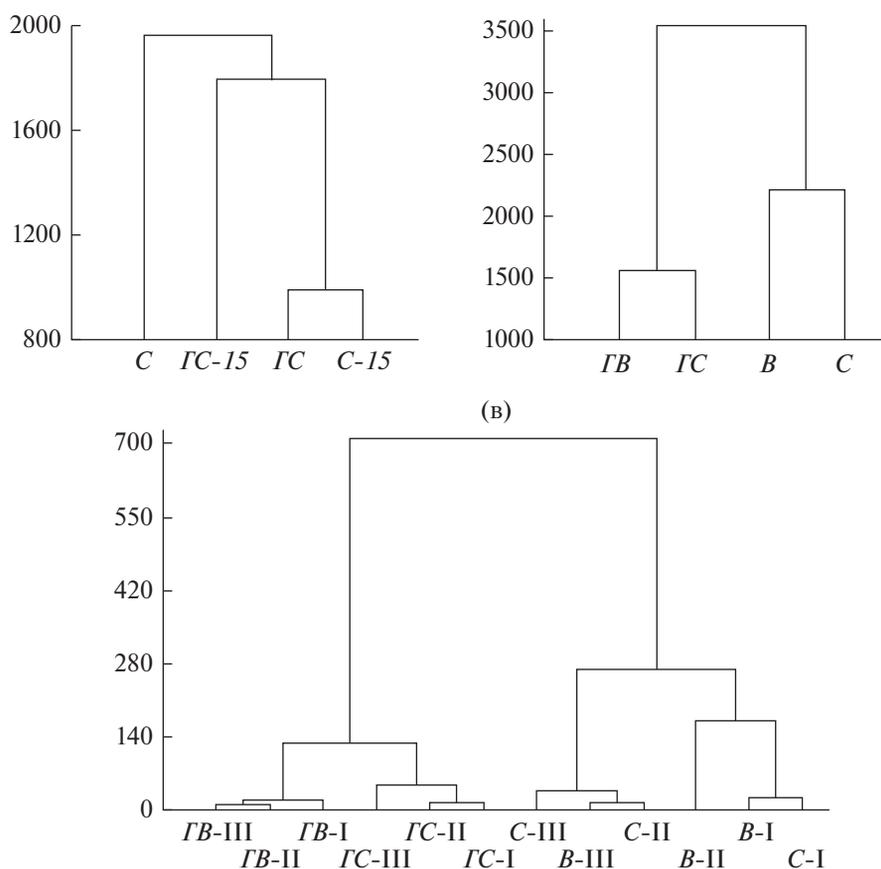
Таблица 2. Плотность беспозвоночных на модельных участках в 2018 г. (экз./100 лов.-сут.)

Таксон	С		В		ГС		ГВ	
	$M \pm m$	min-max	$M \pm m$	min-max	$M \pm m$	min-max	$M \pm m$	min-max
<i>Formicidae</i>	$210 \pm 33^{bcd}$	38–920	$320 \pm 51^{acd}$	0–1141	$58 \pm 20^d$	3–527	$8 \pm 0.4^b$	0–9
<i>Aranei</i>	$31 \pm 2.4^c$	16–77	$38 \pm 6.2^c$	3–168	$17 \pm 2.9$	0–74	$47 \pm 0.8^{ac}$	7–217
<i>Curculionidae</i>	$9.0 \pm 0.8^{bcd}$	3–23	$1.2 \pm 0.3^{acd}$	0–4	$0.2 \pm 0.1$	0–1	$0.2 \pm 0.1$	0–2
<i>Staphylinidae</i>	$6.2 \pm 0.1^{bd}$	0–21	$1.5 \pm 0.5^a$	0–14	$6.1 \pm 2.2^b$	0–63	$2.2 \pm 0.9$	0–23
<i>Hymenoptera</i>	$5.7 \pm 1.0^b$	0–27	$1.0 \pm 0.2^a$	0–4	$4.3 \pm 0.9^b$	0–21	$2.7 \pm 1.1^b$	0–8
<i>Heteroptera</i>	$4.2 \pm 0.9^{bcd}$	0–17	$2.5 \pm 0.8^{acd}$	0–17	$0.7 \pm 0.2$	0–4	$1.8 \pm 0.4^c$	0–10
<i>Carabidae</i>	$2.3 \pm 0.6^b$	0–17	$0.7 \pm 0.2^a$	0–4	$11 \pm 1.4^{ab}$	3–28	$12.7 \pm 2^{bd}$	0–36
<i>Tenthredinoidea</i>	$0.9 \pm 0.2^{bd}$	0–2	$0.4 \pm 0.2^{ad}$	0–6	$2.3 \pm 0.5^{abd}$	0–9	ед.	0–1
<i>Cantharidae</i>	$0.9 \pm 0.2^{bcd}$	0–2	ед.	0–2	0.5	0–1	ед.	0–1
<i>Trombidiidae</i>	$0.9 \pm 0.4^{bd}$	0–12	–	–	$0.5 \pm 0.2^{bd}$	0–4	ед.	0–2
<i>Lithobiidae</i>	$0.5 \pm 0.1$	0–2	$0.9 \pm 0.3^a$	0–6	$3.0 \pm 0.5^{abd}$	0–8	$1.7 \pm 0.4^b$	0–5
<i>Aphidoidea</i>	$0.5 \pm 0.2^{bcd}$	0–2	ед.	0–1	$0.2 \pm 0.1$	0–2	$0.2 \pm 0.1$	0–2
<i>Lepidoptera</i>	$0.4 \pm 0.1^{bcd}$	0–2	ед.	0–1	$0.9 \pm 0.2^{bd}$	0–5	ед.	0–1
<i>Gastropoda</i>	$0.4 \pm 0.1^d$	0–2	$0.6 \pm 0.2^{ad}$	0–4	$0.3 \pm 0.2^{ad}$	0–4	–	–
<i>Psocoptera</i>	$0.4 \pm 0.2^d$	0–4	ед.	0–1	ед.	0–1	–	–
<i>Nicrophorinae</i>	$0.2 \pm 0.1$	0–4	–	–	$1.3 \pm 0.9^{ad}$	0–23	$0.5 \pm 0.3^d$	0–6
<i>Cicadoidea</i>	ед.	0–2	$13 \pm 2.3^{ac}$	0–44	$1.4 \pm 0.4^a$	0–6	$15 \pm 1.6^{ac}$	0–31
<i>Diptera</i>	ед.	0–1	ед.	0–1	$0.8 \pm 0.3$	0–6	$1.7 \pm 1.5$	0–44
<i>Cerambycidae</i>	ед.	0–1	$0.2 \pm 0.1$	0–2	–	–	$0.2 \pm 0.1$	0–1
<i>Bombidae</i>	ед.	0–1	$0.7 \pm 0.3^a$	0–6	–	–	–	–
<i>Lumbricidae</i>	ед.	0–1	ед.	0–1	ед.	0–1	ед.	0–1
<i>Elateridae</i>	ед.	0–1	ед.	0–1	ед.	0–1	ед.	0–1
<i>Scolytidae</i>	0.3	0–2	–	–	$0.6 \pm 0.3$	0–8	–	–
<i>Opiliones</i>	ед.	0–1	–	–	$35 \pm 4.4^{abd}$	4.1–82	ед.	0–1
<i>Blattodea</i>	–	–	$1.0 \pm 0.3^{acd}$	0–6	ед.	0–1	ед.	0–2
<i>Psyllidae</i>	–	–	–	–	ед.	0–1	ед.	0–1
<i>Chrysomelidae</i>	–	–	–	–	ед.	0–1	–	–
<i>Enchytraeidae</i>	–	–	–	–	$0.2 \pm 0.1$	0–2	ед.	0–1
<i>Byrrhidae</i>	–	–	–	–	$0.4 \pm 0.2$	0–4	$1.0 \pm 0.3^c$	0–5
<i>Coccinellida</i>	–	–	–	–	–	–	$0.8 \pm 0.2$	0–2
<i>Thysanoptera</i>	–	–	–	–	–	–	ед.	0–1
экз./100 лов.-сут.	$283 \pm 33^{bc}$	81–973	$383 \pm 52^{cd}$	77–1212	$153 \pm 22^d$	22–568	$105 \pm 11$	29–283

Примечание. abcd – различия в плотности, достоверные для участков С, В, ГС, ГВ при  $t_{58; 0.05} \geq 2.00$ . Прочерк – группы не выявлены, ед. – единичные находки.

блюдениям энтомологов, в Восточной Фенноскандии, несмотря на наличие старовозрастных лесов, частые пожары и отсутствие должного лесопатологического ухода, вспышек массового размножения этих ксилофагов не зафиксировано (Яковлев, 1996; Yakovlev et al., 2000).

Для лесных участков выявлена прямая зависимость межгодовых различий плотности герпетобиянтов от температуры подстилки ( $r \geq 0.71$ ) и обратная – от ее влажности ( $-0.79 \leq r \leq -0.82$ ). Показателями, достоверно определяющими различия в плотности беспозвоночных между годами и участ-



**Рис. 5.** Кластеризация модельных участков по таксономическому составу и динамической плотности беспозвоночных: (а) – контрольный и горелый сосняки в 2015 и 2018 г. (single linkage method, Euclidean distances), (б) – лесные участки и вырубki в 2018 г. (средние для каждого участка показатели по 30-ти ловушкам, Ward's method), (в) – средние значения по ловушко-линиям.

ками, оказались: сумма температур июля ( $r = 0.95$ ),  $T_{max}$  сентября (0.94) и августа (0.92) и  $T_{min}$  июля (0.89), которые в вегетационный сезон 2018 г. были выше в подстилке контрольного С (рис. 2б, 2в). Корреляция плотности беспозвоночных с температурой и запасами влаги в подстилке была выявлена при сравнении нарушенных участков с разными древесными породами в процессе лесовос-

становления в южной тайге Центральной Сибири (Безкороваяная, Егунова, 2011).

### Вырубki

Структура населения беспозвоночных шестилетней *вырубki* отражала два сукцессионных процесса: смену лесной фауны на луговую и усиление

**Таблица 3.** Структурные показатели населения беспозвоночных в лесных биотопах через 2 и 5 лет после пожара

Число таксономических групп	2015 г.	2018 г.
В контрольном сосняке С	24	28
В горелом сосняке ГС	22	30
Суммарно в С и ГС	28	34
Общих для С и ГС, из них:	18 (или 64%)	25 (или 74%)
С большей плотностью в С	8 (44%)	10 (40%)
С большей плотностью в ГС	7 (39%)	11 (44%)
Со сходной плотностью в С и ГС	3 (17%)	4 (16%)
Выявленных только в С	6	3
Выявленных только в ГС	4	5

гидроморфизма почвы. Несмотря на сохранение мощной лесной подстилки, плотность типичных подстилочных хищников — стафилинид, жуужелиц, чернотелок, личинок мягкотелок и перепончатокрылых была в 3–10 раз ниже, чем в контрольном *С*. Как и в *ГС*, исчезли краснотелковые клещи, появились божьи коровки. Плотность влаголюбивых муравьев, пауков, многоножек, дождевых червей, моллюсков и личинок двукрылых, напротив, в 1.2–3 раза превысила таковую в *С*, что соответствовало высокой влажности подстилки на *В* при сходной степени прогрева этих участков (рис. 2), а также обилию пищевых ресурсов для сапрофильных беспозвоночных и ксилофагов в виде многочисленных поваленных стволов и веток деревьев.

Несмотря на активный подрост березы, в комплексе фитофагов *В*, в отличие от контрольного *С*, не отмечены гусеницы пядениц, единичны гусеницы совок, в 1.7–11 раз сократилась плотность клопов, тлей, сеноедов и насекомых, трофически связанных с древесиной и корнями живых сосен — жуков-короедов, долгоносиков и ложногусениц пилильщиков. Уловистость личинок жуков-усачей, развитие которых проходит в мертвой древесине, напротив, увеличилась в 4 раза, как и луговых фитофагов: цикадок (на 2 порядка), влаголюбивых тараканов, опылителей — шмелей. Тараканы и шмели исчислялись в ловушках десятками особей, цикадки — сотнями. В целом 4 группы беспозвоночных (муравьи, моллюски, шмели и тараканы) достигали на *В* наибольшей плотности среди участков. Этот список дополняли личинки усачей и цикадки с оговоркой, что сходную плотность они имели и на второй вырубке — горелой. В результате при наименьшем числе таксонов (24) лесная вырубка отличалась самой высокой динамической плотностью беспозвоночных (рис. 3, табл. 1, 2) и их наиболее неравномерным пространственным распределением из-за гетерогенности среды обитания в виде скопления—разброса порубочного материала (рис. 4). Максимальные локальные скопления формировали муравьи, пауки и цикадки.

В сравнении с контрольным *С* на *В* плотность более половины таксонов (13 из 24) снизилась, у 9 таксонов — увеличилась; представители 6 таксонов не были выявлены, как и в *ГС* появились тараканы. Из-за обилия муравьев структура населения была более олигодоминантной: муравьи составляли 86% улова (против 75% в контрольном *С*), пауки — 10, цикадки — 3, суммарная доля представителей остальных таксонов не превысила 1% (табл. 1).

Структура населения дважды нарушенной *горелой вырубке* наиболее отличалась от контрольного *С* и была сходна частично с *ГС*, частично — с соседней *В*. Динамическая плотность беспозво-

ночных была здесь достоверно меньшей: в 1.5 раза в сравнении с *ГС* и в 3–4 раза в сравнении участками *С* и *В*, сохранившими подстилку и кустарничковый ярус (табл. 1, 2, рис. 3). Обилие муравьев, преобладающих на остальных участках, сократилось на два порядка; плотность типичных обитателей лесной подстилки — стафилинид и мягкотелок — на порядок; моллюски и сеноеды отсутствовали.

В то же время представители 6 таксонов достигали на *ГВ* наибольшей плотности: обитатели открытых пространств — божьи коровки и активные хищники — пауки и жуужелицы, предпочитающие в Хибинах открытые ландшафты лесотундры и горной тундры, и жуки-чернотелки. Последние проявили себя как некрофаги: вместе с жуками-мертвоедами массово шли в ловушки с попавшими в них мышами—полевками, также привлекаемыми горелой вырубкой со сложным лабиринтом из поваленных стволов деревьев. Еще двумя группами с максимальной уловистостью на *ГВ* были цикадки (собрано 333 экз.) и бриофаги пилульщики (два десятка имаго), развивающиеся на редких пятнах мохового покрова. Наряду с цикадками среди фитофагов преобладали клопы, присутствовали тараканы и развивающиеся в стволах мертвых деревьев личинки жуков-усачей. Как и на *В*, комплекс фитофагов *ГВ* имел луговой облик, а растительноядные группы, типичные для контрольного *С*, были здесь единичны (шелкуны, долгоносики, гусеницы совок, тли, трипсы) или отсутствовали (листоеды, короеды, гусеницы пядениц, ложногусеницы пилильщиков). Слабо растущая *ГВ* также не привлекала шмелей, обычных на соседней *В*. Уловистость многовидовой группы перепончатокрылых была высокой, но уступала контрольному *С*, а плотность многоножек — *ГС* (табл. 2).

Из-за снижения обилия муравьев — основного доминанта в уловах других участков, только *ГВ* отличалась полидоминантной структурой населения беспозвоночных и их более равномерным пространственным распределением (рис. 4). Преобладали пауки — 47, цикадки — 16, жуужелицы — 13, чернотелки и перепончатокрылые — 5–6%. Доля представителей каждого из остальных 22-х таксонов не превысила 2% (табл. 1).

На примере обеих вырубок, как антропогенно нарушенных горных биотопов, впервые за 10-летний период почвенно-зоологических исследований Хибин, нами установлен факт массового заражения сосущих фитофагов — цикадок их специализированными паразитоидами — мелкими жалающими осами-дриинидами рода *Gonatopus* (Hymenoptera, Aculeata, Dryinidae). Биология представителей небольшого семейства дриинид изучена недостаточно (Gugliemino, 2002), но известно, что бескрылые самки захватывают и временно парали-

зуют личинок цикадок для откладки яиц в их тельца, что нарушает естественный метаморфоз цикадок. По мере развития паразитической личинки на теле хозяина разрастается шаровидная капсула. Большинство цикадок, отловленных на вырубках Хибин, имели такие капсулы различной локализации, что свидетельствовало о массовом заражении их популяции; попадались в почвенные ловушки и сами осы-паразиты.

Обобщая данные по таксономическому составу и обилию беспозвоночных в оба периода исследований, можно сделать методический вывод. Из 4-х модельных участков, изначально выбранных для парного сравнения по принципу “горелый – незатронутый пожаром” (*С–ГС* и *В–ГВ*), наиболее сходными по разнообразию, плотности и структуре доминирования населения беспозвоночных–герпетобионтов, оказались не эти пары участков, заложенные в 300 м друг от друга, а контрольный сосняк (*С*) и вырубка (*В*), удаленные на расстоянии 1 км, но имеющие лесную подстилку и развитый мохово-кустарничковый ярус. Аналогичный вывод был сделан нами по результатам сравнительных исследований почвенной фауны в образцах подстилки с этих модельных участков (Зенкова и др., 2020).

Высокая плотность в контрольном *С* и на *В* основного доминанта – муравьев (210–320 против 8–58 экз./100 лов.-сут. на горях), сходная плотность пауков (30–40 экз./100 лов.-сут.), клопов и присутствие сенокосцев и шмелей повлияли на обособление этих участков с лесной подстилкой в подкластер, противопоставленный подкластеру горелых участков – *ГС* и *ГВ* (рис. 5б). Горелые сосняк и вырубка отличались от негорелых участков присутствием энхитрид, пилюльчиков, листоблошек и божьих коровок, повышенной плотностью жуужелиц (11–13 против 1–2 экз./100 лов.-сут.), многоножек, сенокосцев, личинок двукрылых. Еще отчетливее обособление горелых участков и, напротив, сходство контрольного сосняка и вырубки, проявилось при кластеризации данных по ловушко-линиям (рис. 5в).

Многочисленность жуужелиц (вида *Cicindela sylvatica*) на начальных стадиях послепожарной сукцессии отмечена на разновозрастных горях в Республике Коми (Савельева, Долгин, 2008, 2009). Повышенные показатели уловистости и разнообразия этих жуков по сравнению с ненарушенным лесом и выборочной рубкой выявлены после экспериментального выжигания вырубки в юго-восточной Норвегии (Gongalsky et al., 2006). Нами в горелом сосняке и на горелой вырубке за полевые сезоны 2015 и 2018 гг. учтено 19 видов жуужелиц (тогда как за 10 лет исследования природных биотопов Хибин суммарно – 30 видов), из них 8 видов, принадлежащих родам *Amara*, *Bembidion*, *Dicheirotrichus*, *Harpalus*, *Pterostichus*, отловлены

только на этих нарушенных участках (Zenkova, Filippov, 2019).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обширной промышленной рубки в 2012 г. и последующего низового пожара в 2013 г. в речной долине на севере Хибин образовались три варианта антропогенной трансформации горно-таежного леса (горелый лес, вырубка и горелая вырубка), послужившие модельными биотопами для мониторинга восстановительных сукцессий почвенного покрова и населяющей его фауны в условиях заполярного горного массива. Во всех биотопах герпетобионты беспозвоночные, учтенные почвенными ловушками, оказались более разнообразным и многочисленным компонентом по сравнению с фауной в образцах лесной подстилки, исследованной в эти же сезоны (Зенкова и др., 2020). Структура их населения через 5–6 лет после воздействия соответствовала степени трансформации горных биотопов, которые можно расположить в следующем порядке: *лесная вырубка* (сохранение лесной подстилки и мохово-кустарничкового яруса, активное возобновление березы) – *горелый сосняк* (мертвый древостой, протлевшая подстилка, зарастание черникой) – *горелая вырубка* (полное уничтожение лесного фитоценоза и лесной подстилки, эродированная до минеральной массы почва, фрагментарное зарастание территории). Учитывая близкое расположение модельных участков, позволяющее беспозвоночным активно мигрировать на их территории, очевидно, что различия в разнообразии и динамической плотности герпетобионтов определялись наличием-отсутствием лесной подстилки и ее гидротермическими свойствами, что подтверждено результатами корреляционного и кластерного анализов. На вырубке, несмотря на формирование лугового комплекса беспозвоночных в первые годы появления березового подроста, наличие подстилки и яруса напочвенной растительности имеет первостепенное значение для поддержания гидротермического режима, благоприятного для сохранения и восстановления горно-лесного комплекса беспозвоночных даже после полного уничтожения древесного полога.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверина И.А. Динамика численности и размещение на гари Окского заповедника муравьев рода *Formica* // Мониторинг сообществ на горях и управление пожарами в заповедниках. М.: ВНИИ природы, 2002. С. 66–69.
- Архипова М.В., Исаченкова Л.Б. Динамика почвенно-растительного покрова экосистемы сосново-еловых лесов (на примере юго-западного Подмосковья) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013. № 6. С. 491–501.

- Баккал И.Ю., Гориков В.В., Пазуха А.В.* Послепожарное восстановление напочвенного покрова еловых лесов Кольского полуострова // Бюлл. Ботанич. сада Саратовского гос. ун-та. 2006. В. 5. С. 74–77.
- Безкоровайная И.Н., Егунова М.Н.* Формирование комплексов почвенных беспозвоночных в процессе лесовосстановления (южная тайга, Центральная Сибирь) // Ульяновский мед.-биол. журн. 2011. № 4. С. 117–129.
- Безкоровайная И.Н., Иванова Г.А., Тарасов П.А., Сорокин Н.Д., Богородская А.В., Иванов В.А., Конрад С.Г., Макрае Д.Дж.* Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края // Сиб. экол. журн. 2005. Т. 12. № 1. С. 143–152.
- Брянин С.В., Суслопарова Е.С., Молчанов Д.А., Абрамова Е.Р.* Постпирогенный уголь как фактор почвообразования в таёжных лесах Дальнего Востока // Лесные почвы и функционирование лесных экосистем: матер. VII Всерос. научн. конф. с межд. уч. М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 98–101.
- Буренина Т.А., Шишикин А.С., Онучин А.А., Борисов А.Н.* Снежный покров на вырубках разных лет в пихтово-кедровых лесах Енисейского края // Лесоведение. 2013. № 6. С. 26–36.
- Дмитриев А.С.* Заболачивание и разболачивание концентрированных вырубок в борах-черничниках в бассейне Сысолы (Коми АССР). Автореф. дис. ... канд. с-х. наук. Сыктывкар, 1950. 16 с.
- Дымов А.А., Габов Д.Н., Дубровский Ю.А., Жангуров Е.В., Низовцев Н.А.* Влияние пожара в северотаежном ельнике на органическое вещество почвы // Лесоведение. 2015. № 1. С. 52–62.
- Дымов А.А.* Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17070024>
- Дымов А.А., Лантева Е.М., Милановский Е.Ю.* Изменение почв и почвенного органического вещества в процессе естественного лесовозобновления после рубки сосняка бруснично-зеленомошного // Вестн. Московского гос. ун-та леса (Лесной вестник). М. 2012. Т. 2. № 85. С. 67–71.
- Дымов А.А., Милановский Е.Ю.* Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга Республики Коми) // Почвоведение. 2014. № 1. С. 39–47.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14010043>
- Евдокименко М.Д.* Послепожарная динамика микроклимата и гидротермического режима мерзлотных почв в лиственничниках Станового хребта // Сибирский экол. журн. 1996. № 1. С. 73–79.
- Зенкова И.В.* Почва и почвенная фауна пирогенного леса: последствия низового пожара в Хибинском горном массиве // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тез. докл. VII съезда Об-ва почвоведов им. В.В. Докучаева. М.: Белгород, 2016. В 2-х ч. Ч. 1. С. 221–222.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29090.63683>
- Зенкова И.В., Штабровская И.М., Усова Д.В.* Почвенная фауна вырубок и гарей Хибин // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23. № 2. С. 160–172.  
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-2-160-172>
- Исаченкова Л.Б., Герасимова М.И.* Пространственно-временная организация почвенного покрова антропогенно-измененных лесов юго-западного Подмосковья // Пространственно-временная организация почвенного покрова антропогенно-измененных лесов, теоретические и прикладные аспекты: матер. Междунар. науч. конф. СПб. 2007. С. 434–437.
- Карпечко А.Ю.* Изменение плотности и коренасыщенности почв под влиянием лесозаготовительной техники в еловых лесах Южной Карелии // Лесоведение. 2008. № 5. С. 66–70.
- Карпечко А.Ю.* Влияние рубок на сток с лесопокрытой части водосбора Онежского озера // Труды КарНЦ РАН. Лимнология и океанология. 2016. № 5. С. 13–20.
- Киселева Г.А.* Изменение водно-физических свойств почв в результате послепожарного заболачивания // Изменение почвенного покрова Дальнего Востока в результате сельскохозяйственного использования и мелиорации. Уссурийск: ПримСХИ. 1978. В. 52. С. 92–94.
- Краснощекоев Ю.Н.* Влияние пожаров на свойства горных дерново-таежных почв лиственничников Монголии // Почвоведение. 1994. № 9. С. 102–109.
- Краснощекоев Ю.Н., Сорокин Н.Д.* Почвенно-экологические изменения на вырубках и гарях Восточного Хэнтэя (МНР) // Почвоведение. 1988. № 1. С. 117–127.
- Лантева Е.М., Втюрин Г.М., Бобкова К.С., Каверин Д.А., Дымов А.А., Симонов Г.А.* Изменение почв и почвенного покрова еловых лесов после сплошнолесосечных рубок // Сибирский лесн. журн. 2015. № 5. С. 64–76.  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20150505>
- Лебедев А.В.* Гидрологическая роль горных лесов Сибири. Новосибирск: Наука, 1982. 182 с.
- Лопатовская О.Г., Максимова Е.Н., Попов В.В., Соловьева К.С.* Влияние сплошных рубок на лесорастительные свойства почв Братского района Иркутской области // Изв. Байкальского гос. ун-та. Экология. 2018. С. 159–165.
- Мерзляков О.Э.* Влияние сплошных рубок на изменение лесорастительных свойств мерзлотных грубогумусных почв // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2008. № 1(2). С. 71–81.
- Морозова Р.М.* Влияние концентрированных рубок еловых лесов на свойства почв // Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы. Петрозаводск. 2004. С. 182–184.
- Назаркина А.В.* Изменение плотности сложения и влагозапасов лесных почв долины р. Амур в результате действия пожаров // Вестн. КрасГАУ. 2009. № 4. С. 37–41.
- Новости-24 от 29.08.12: В Мурманской области в Хибинах вырублено около 100 га леса // Комсомольская правда–Мурманск. URL: <https://www.murmansk.kp.ru/online/news/1234173/> (Дата обращения: 01.10.2021)
- Поляков В.Л.* Подпочвенное увлажнение несвязных несугфозионных грунтов в условиях интенсивного испарения // Прикладна гідромеханіка. 2010. Т. 12. № 3. С. 54–61.
- Потапова Н.А.* Почвенные беспозвоночные (мезофауна) – 20 лет наблюдений в Окском заповеднике // Мониторинг сообществ на гарях и управление пожарами в заповедниках. М.: ВНИИприроды, 2002. С. 57–65.
- Онучин А.А., Буренина Т.А., Зирюкина Н.В., Фарбер С.К.* Лесогидрологические последствия рубок в условиях Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 110–118.
- Регистраторы (логгеры) температуры и влажности / ООО “Инженерные Технологии” (Челябинск). URL: <https://gigrotermon.ru> (Дата обращения: 15.09.2021)

- Савельева Л.Ю., Долгин М.М. Структура населения жесткокрылых (Insecta: Coleoptera) разновозрастных сосновых гарей подзоны средней тайги Республики Коми // Вестн. Поморск. ун-та. Сер. естеств. и точн. наук. 2008. № 1(13). С. 40–44.
- Савельева Л.Ю., Долгин М.М. Изменение структуры населения жесткокрылых (Insecta: Coleoptera) сосновых гарей подзоны средней тайги Республики Коми // Изв. Самарск. НЦ РАН. 2009. Т. 11. С. 656–660.
- Тарасов П.А., Иванов В.А., Иванова Г.А. Особенности температурного режима почв в сосняках средней тайги, пройденных низовыми пожарами // Хвойн. бореал. зоны. 2008. Т. 25. № 3–4. С. 300–304.
- Тарасов П.А., Иванов В.А., Иванова Г.А., Краснощекова Е.Н. Постпирогенные изменения гидротермических параметров почв среднетаежных сосняков // Почвоведение. 2011. № 7. С. 795–803.
- Тер-Мисакянц Т.А. Изменение биологических свойств дерново-карбонатных почв Кавказа после вырубki леса // Изв. вузов. Северо-Кавказ. регион. Естественные науки. 2013. № 3. С. 57–59.
- Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Ассоциации полициклических ароматических углеводородов в пройденных пожарами почвах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 3. С. 13–19.
- Яковлев Б.А. Климат Мурманской области. Мурманск: Книжн. изд-во, 1961. 200 с.
- Яковлев Е.Б. К характеристике комплексов ксилофитных жесткокрылых (Coleoptera) в лесах Карелии, не подвергавшихся лесоводственному уходу // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск. 1996. С. 139–166.
- Gongalsky K., Midgaard F., Overgaard H.J. Effects of prescribed forest burning on carabid beetles (Coleoptera: Carabidae): A case study in south-eastern Norway // Entomol. Fennica. 2006. V. 17. № 3. P. 325–333.
- Gongalsky K.B., Persson T. Recovery of soil macrofauna after wildfires in boreal forests // Soil Biol. & Biochem. 2013. V. 57. P. 182–191.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.005>
- Guglielmino A. Dryinidae (Hymenoptera Chrysidoidea): an interesting group among the natural enemies of the Auchenorrhyncha (Hemiptera) // Denisia. 2002. V. 4. P. 549–556. URL: [https://www.zobodat.at/pdf/DENISIA\\_0004\\_0549-0556.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/DENISIA_0004_0549-0556.pdf)
- Southwood T.R.E. Ecological methods. London. Chapman and Hall, 1978. 575 p.
- Zenkova I.V., Filippov B.Yu. The ground beetles fauna (Coleoptera, Carabidae) of natural and anthropogenic habitats in Khibiny polar massif. // The Proceed. of 8th Intern. Symp. of Ecol. (ISEM8). Pešić V. (ed.). Budva, Montenegro, 2019. P. 121–129.
- Yakovlev E.B., Scherbakov A.N., Polevoi A.V., Humala A.E. Insect fauna of the Paanajarvi National Park and proposed Kalevala National Park with particular emphasis on saproxylic Coleoptera, Diptera and Hymenoptera // Biodiversity of old-growth forests and its conservation in north-west Russia. Oulu, 2000. P. 103–158.

## Hydrothermal Conditions Affecting the Forest Litter Invertebrates in the Cuttings and Burnt Areas of Khibiny Mountains

I. V. Zenkova<sup>1, \*</sup> and I. M. Shtabrovskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences”, Akademgorodok, 14a, Apatity, 184209 Russia*

\*E-mail: [i.zenkova@ksc.ru](mailto:i.zenkova@ksc.ru)

Hydrothermal parameters and invertebrate fauna were studied in the soil cover of the Khibiny mountain pine forest and three sites of its anthropogenic transformation (burnt forest, felling, burnt felling) after two (2015) and 5–6 years (2018) impacts. Invertebrates were caught on all sites using formalin-based soil traps, and the temperature and humidity were measured at the litter depth of 5 cm by autonomous thermo-hydro-sensors. A steady increase of the moisture content in the litter of the burnt forest and in the clearing was revealed which corresponds to the ideas about the development of the processes of hydromorphism and waterlogging in such forest disturbance. Invertebrates of 34 taxonomic groups were captured with an increased diversity and dynamic density in the warmer season of 2018 compared to 2015. The largest diversity of taxa was in both burnt sites; the smallest, but with the maximal density of invertebrates was found in the clearing, and the minimal density in the twice disturbed burnt clearing. In a pair of adjacent control and burnt pine forest sites, 5 years after the fire, an increase in the invertebrate fauna structural difference was revealed compared to the second year. A strong correlation was established between the annual differences in the density of herpetobionts and the soil temperature ( $r \geq 0.71$ ) and humidity ( $-0.79 \leq r \leq -0.82$ ). The importance of forest litter has been confirmed for the preservation of the original fauna in mountain-forest clearings and burnt areas and for the maintenance of a hydrothermal regime favourable for its restoration.

*Keywords: forest litter, temperature, humidity, invertebrates-herpetobionts, cuttings, burnt areas, Khibiny Mountains.*

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of a State contract with the Federal Research Center KSC of the Russian Academy of Sciences (INEP) and supported by the Russian Foundation for Basic Research (postgraduate project № 20-34-90135).

## REFERENCES

- Averina I.A., Dinamika chislennosti i razmeshchenie na gari Okskogo zapovednika murav'ev roda *Formica* (The dynamics of the number and placement of ants of the genus *Formica* on the burned areas of the Oksky Reserve), In: *Monitoring soobshhestva na garyax i upravlenie pozharami v zapovednikax* (Community monitoring in burnt areas and fire management in nature reserves), Moscow: VNIIPrirody, 2002, pp. 66–69.
- Arkhipova M.V., Isachenkova L.B., Dinamika pochvenno-rastitel'nogo pokrova ekosistemy sosnovo-elovykh lesov (na primere yugo-zapadnogo Podmoskov'ya) (Dynamics of soil-vegetation cover of ecosystems of pine-spruce forests (on the example of the southwestern Moscow region)), *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*, 2013, № 6, pp. 491–501.
- Bakkal I.Yu., Gorshkov V.V., Pazukha A.V., Poslepozharnoe vosstanovlenie napochvennogo pokrova elovykh lesov Kol'skogo poluostrova (Post-fire restoration of the ground cover of spruce forests of the Kola Peninsula), *Byull. Botanich. sada Saratovskogo gos. un-ta*, 2006, Vol. 5, pp. 74–77.
- Bezkorovainaya I.N., Egunova M.N., Formirovanie kompleksov pochvennykh bespozvonochnykh v protsesse lesovosstanovleniya (yuzhnaya taiga, Tsentral'naya Sibir') (Soil invertebrate complexes in reforestation (southern taiga, Central Siberia)), *Ul'yanovskii med.-biol. zhurn*, 2011, No. 4, pp. 117–129.
- Bezkorovainaya I.N., Ivanova G.A., Tarasov P.A., Sorokin N.D., Bogorodskaya A.V., Ivanov V.A., Konard S.G., Makrae D.Dzh., Pirogennaya transformatsiya pochv sosnyakov srednei taigi Krasnoyarskogo kraia (Pyrogenic transformation of soils in pine forests in the middle taiga of the Krasnoyarsk Territory), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 1, pp.143–152.
- Bryanin S.V., Susloparova E.S., Molchanov D.A., Abramova E.R., Postpirogenny'j ugol' kak faktor pochvoobrazovaniya v tayozhny'x lesax Dal'nego Vostoka (Postpyrogenic coal as a factor of soil formation in the taiga forests of the Far East), *Lesnye pochvy i funktsionirovanie lesnykh ekosistem* (Forest soils and the functioning of forest ecosystems), Proc. of the VII All-Russian scientific conf. with international participation, Moscow: TsEPL RAN, 2019, pp. 98–101.
- Burenina T.A., Shishikin A.S., Onuchin A.A., Borisov A.N., Snezhnyi pokrov na vyrubkakh raznykh let v pikhtovokedrovyykh lesakh Eniseiskogo kryazha (Snow cover in clearings of different years in fir-cedar forests of the Yenisei Ridge), *Lesovedenie*, 2013, No. 6, pp. 26–36.
- Dmitriev A.S., *Zabolachivanie i razbolachivanie kontsen-trirovannykh vyrubok v borakh- chernichnikakh v basseine Sysoly (Komi ASSR). Avtoref. diss. kand. s-kh. nauk.* (Swamping and shallowing of concentrated clearings in blueberry forests in the Sysola basin (Komi ASSR). Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), *Syktvykar*, 1950, 16 p.
- Dymov A.A., Gabov D.N., Dubrovskii Yu.A., Zhan-gurov E.V., Nizovtsev N.A., Vliyanie pozhara v severotaezhnom el'nike na organicheskoe veshchestvo pochvy (In-fluence of clearcutting in boreal forests on soils (review)), *Lesovedenie.*, 2015, No. 1, pp. 52–62.
- Dymov A.A., The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: a review, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 7, pp. 780–790. DOI 10.1134/S106422931707002X
- Dymov A.A., Lapteva E.M., Milanovskii E.Yu., Izmenenie pochv i pochvennogo organicheskogo veshchestva v protsesse estestvennogo lesovozobnovleniya posle rubki sosnyaka brusnichno-zelenomoshnogo (Changes in soils and soil organic matter in the process of natural reforestation after cutting of a cowberry-green moss pine forest), *Vestn. Moskovskogo gos. un-ta lesa (Lesnoi vestnik)*, 2012, Vol. 2, № 85, pp. 67–71.
- Dymov A.A., Milanovskii E.Yu., Izmenenie organicheskogo veshchestva taezhnykh pochv v protsesse estestvennogo lesovozobnovleniya rastitel'nosti posle rubok (srednyaya taiga Respubliki Komi) (Changes in the organic matter of taiga soils in the process of natural reforestation of vegetation after felling (middle taiga of the Komi Republic)), *Pochvovedenie*, 2014, No. 1, pp. 39–47. DOI 10.7868/S0032180X14010043
- Evdokimenko M.D., Poslepozharnaya dinamika mikroklimata i gidrotermicheskogo rezhima merzlotnykh pochv v listvennichnikakh Stanovogo khrehta (Postfire dynamics of microclimate and hydrothermal regime of permafrost soils in larch forests of Stanovoy ridge), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1996, No. 1, pp. 73–79.
- Gongalsky K., Midtgaard F., Overgaard H.J., Effects of prescribed forest burning on carabid beetles (Coleoptera: Carabidae): A case study in south-eastern Norway, *Entomol. Fennica*, 2006, Vol. 17, No. 3, pp. 325–333.
- Gongalsky K.B., Persson T., Recovery of soil macrofauna after wildfires in boreal forests, *Soil Biol. & Biochem.*, 2013, Vol. 57, pp. 182–191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.005>
- Gugliemino A., Dryinidae (Hymenoptera Chrysidoidea): an interesting group among the natural enemies of the Auchenorrhyncha (Hemiptera), *Denisia*, 2002, Vol. 4, pp. 549–556. URL: [https://www.zobodat.at/pdf/DENISIA\\_0004\\_0549-0556.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/DENISIA_0004_0549-0556.pdf).
- Zenkova I.V., Pochva i pochvennaya fauna pirogennogo lesa: posledstviya nizovogo pozhara v Khibinskom gornom massive (Soil and soil fauna of the pyrogenic forest: the consequences of a ground fire in the Khibiny mountain range), *Pochvovedenie – prodovol'stvennoi i ekologicheskoi bezopasnosti strany* (Soil science – food and environmental security of the country), Conf. abst. of VII Congress of the Society of Soil Scientists named after V.V. Dokuchaev, Belgorod, 2016, Vol. I, pp. 221–222. DOI 10.13140/RG.2.2.29090.63683
- Zenkova I.V., Shtabrovskaya I.M., Usova D.V., Pochvennaya fauna vyrubok i garei Khibin (Soil fauna of felling sites and burnt-out areas of the Khibiny), *Vestnik MGTU*, 2020, Vol. 23, No. 2, pp. 160–172. DOI 10.21443/1560-9278-2020-23-2-160-172
- Isachenkova L.B., Gerasimova M.I., Prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochvennogo pokrova antropogennno-izmenennykh lesov yugo-zapadnogo Podmoskov'ya (Spatio-temporal organization of soil cover in anthropo-

- genically altered forests in the southwestern Moscow region), *Prostranstvenno-vremennaya organizatsiya pochvennogo pokrova, teoreticheskie i prikladnye aspekty* (Spatial-temporal organization of the soil cover, theoretical and applied aspects), Proc. of International Sci. Conf., Saint Petersburg, 2007. pp. 434–437.
- Karpechko A.Yu., *Izmenenie plotnosti i kornenasyshchenosti pochv pod vliyaniem lesozagotovitel'noi tekhniki v elovykh lesakh Yuzhnoi Karelii* (Changes in density and root mass in soils under the influence of harvesting machines in spruce forests of southern Karelia), *Lesovedenie*, 2008, No. 5, pp. 66–70.
- Karpechko A.Yu., *Vliyanie rubok na stok s lesopokrytoi chasti vodosbora Onezhskogo ozera* (Impact of felling on the runoff from the forest-covered part of the catchment area of Lake Onega), *Trudy KarNTs RAN. Limnologiya i okeanologiy*, 2016, No. 5, pp. 13–20.
- Kiseleva G.A., *Izmenenie vodno-fizicheskikh svoystv pochv v rezul'tate posledozharnogo zabolachivaniya* (Changes in the water-physical properties of soils as a result of post-fire swamping), In: *Izmenenie pochvennogo pokrova Dal'nego Vostoka v rezul'tate sel'skokhozyaistvennogo ispol'zovaniya i melioratsii* (Changes in the soil cover of the Far East as a result of agricultural use and melioration), Usuriisk: PrimSKhI, 1978, Vol. 52, pp. 92–94.
- Krasnoshchekov Yu.N., *Vliyanie pozharov na svoystva gornyykh dernovo-taezhnykh pochv listvennichnikov Mongoli* (Influence of fires on the properties of mountain sod-taiga soils of larch forests in Mongolia), *Pochvovedenie*, 1994, No. 9, pp. 102–109.
- Krasnoshchekov Yu.N., Sorokin N.D., *Pochvenno-ekologicheskie izmeneniya na vyrubkakh i garyakh Vostochnogo Khenteya (MNR)* (Soil-ecological changes in felling areas and burnt-out areas of Eastern Khentei (Mongolian People's Republic)), *Pochvovedenie*, 1988, No. 1, pp. 117–127.
- Lapteva E.M., Vtyurin G.M., Bobkova K.S., Kaverin D.A., Dymov A.A., Simonov G.A., *Izmenenie pochv i pochvennogo pokrova elovykh lesov posle sploshnolesosechnykh rubok* (Changes in soils and soil cover of spruce forests after clear-cut felling), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2015, No. 5, pp. 64–76. DOI 10.15372/SJFS20150505
- Lebedev A.V., *Gidrologicheskaya rol' gornyykh lesov Sibiri* (Hydrological role of Siberian mountain forests), Novosibirsk, Nauka, 1982, 182 p.
- Lopatovskaya O.G., Maksimova E.N., Popov V.V., Solov'eva K.S., *Vliyanie sploshnykh rubok na lesorastitel'nye svoystva pochv Bratskogo raiona Irkutskoi oblasti* (Influence of clearcutting on the forest growing properties of soils in the Bratsk district of the Irkutsk region), *Izv. Baikalskogo gos. un-ta. Ekologiya*, 2018, pp. 159–165.
- Merzlyakov O.E., *Vliyanie sploshnykh rubok na izmenenie lesorastitel'nykh svoystv merzlotnykh grubogumusnykh pochv* (Influence of clearcutting on changes in forest growth properties of permafrost coarse-humus soils), *Vestn. Tom. gos. un-ta. Biologiya*, 2008, № 1(2), pp. 71–81.
- Morozova R.M., *Vliyanie kontsentrirovannykh rubok elovykh lesov na svoystva pochv* (Influence of concentrated felling of spruce forests on soil properties), In: *Antropogennaya transformatsiya taezhnykh ekosistem Evropy* (Anthropogenic transformation of taiga ecosystems in Europe), Petrozavodsk, 2004, pp. 182–184.
- Nazarkina A.V., *Izmenenie plotnosti slozheniya i vlagozapasov lesnykh pochv doliny r. Amur v rezul'tate deistviya pozharov* (Changes in the bulk density and moisture reserves of forest soils in the valley of the Amur as a result of the action of fires), *Vestnik KrasGAU*, 2009, No. 4, pp. 37–41.
- Novosti-24 ot 29.08.12: V Murmanskoi oblasti v Khibinakh vyrubleno okolo 100 ga lesa* (In the Murmansk region in the Khibiny, about 100 hectares of forest were cut down), *Komsomol'skaya pravda–Murmansk*, available at: <https://www.murmansk.kp.ru/online/news/1234173/> (October 01, 2021)
- Polyakov V.L., *Podpochvennoe uvlazhnenie nesvyaznykh nesuffuzionnykh gruntov v usloviyakh intensivnogo ispareniya* (Subsoil moistening of non-cohesive non-suffusive soils under conditions of intense evaporation), *Prikladna gidromekhanika*, 2010, Vol. 12, № 3, pp. 54–61.
- Potapova N.A., *Pochvennye bespozvonochnye (mezofauna) – 20 let nablyudeniya v Okskom zapovednike* (Soil invertebrates (mesofauna) – 20 years of observations in the Oksky Reserve), In: *Monitoring soobshhestva na garyax i upravlenie pozharami v zapovednikakh* (Community monitoring in burnt areas and fire management in nature reserves), Moscow: VNIIPrirody, 2002, pp. 57–65.
- Onuchin A.A., Burenina T.A., Ziryukina N.V., Farber S.K., *Lesogidrologicheskie posledstviya rubok v usloviyakh Srednei Sibiri* (Forest hydrological consequences of felling in the conditions of Central Siberia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 110–118.
- Registratory (loggery) temperatury i vlazhnosti* (Recorders (loggers) of temperature and humidity), ООО “Инженерные Технологии” (Chelyabinsk), Available at: <https://gigrotermon.ru> (September 15, 2021)
- Savel'eva L.Yu., Dolgin M.M., *Struktura naseleniya zhestkokrylykh (Insecta: Coleoptera) raznovozrastnykh osnovnykh garei podzony srednei taigi Respubliki Komi* (Population structure of coleoptera (Insecta: Coleoptera) of uneven-aged pine burns in the middle taiga subzone of the Komi Republic), *Vestnik Pomorskogo un-ta. Ser. Estestvennye i tochnye nauki*, 2008, No. 1(13), pp. 40–44.
- Savel'eva L.Yu., Dolgin M.M., *Izmenenie struktury naseleeniya zhestkokrylykh (Insecta: Coleoptera) osnovnykh garei podzony srednei taigi Respubliki Komi* (Changes in the structure of the population of coleoptera (Insecta: Coleoptera) pine burns in the middle taiga subzone of the Komi Republic), *Izvestiya Samarskogo NTs RAN*, 2009, Vol. 11, pp. 656–660.
- Tarasov P.A., Ivanov V.A., Ivanova G.A., *Osobennosti temperaturnogo rezhima pochv v sosnyakakh srednei taigi, proidennykh nizovymi pozharami* (Features of the temperature regime of soils in pine forests of the middle taiga, traversed by ground fires), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2008, Vol. 25, pp. 300–304.
- Tarasov P.A., Ivanov V.A., Ivanova G.A., Krasnoshchekova E.N., *Post-pyrogenic changes in the hydrothermal parameters of soils in middle-taiga pine forests*, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 7, pp. 731–738. DOI 10.1134/S1064229311070131

- Ter-Misakyants T.A., *Izmenenie biologicheskikh svoystv dernovo-karbonatnykh pochv Kavkaza posle vyрубki lesa* (Changes in the biological properties of soddy calcareous soils of the Caucasus after deforestation), *Izv. vuzov. Severo-Kavkaz. region. Estestvennye nauki*, 2013, No. 3, pp. 57–59.
- Tsibart A.S., Gennadiev A.N., *Assotsiatsii politsiklicheskih aromaticeskikh uglevodorodov v proidennykh pozharami pochvakh* (Associations of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by fires), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*, 2011, No. 3, pp. 13–19.
- Yakovlev B.A., *Klimat Murmanskoi oblasti* (The climate of the Murmansk region), Murmansk: Knizhn. izd-vo, 1961, 200 p.
- Yakovlev E.B., *K kharakteristike kompleksov ksilofitnykh zhechkokrylykh (Coleoptera) v lesakh Karelii, ne podvergovshikhsya lesovodstvennomu ukhodu* (On the characterization of complexes of xylophytichoeoptera (Coleoptera) in the forests of Karelia, not subjected to silvicultural care), In: *Problemy antropogennoi transformatsii lesnykh biogeotsenozov Karelii* (Problems of Anthropogenic Transformation of Forest Biogeocenoses in Karelia), Petrozavodsk, 1996, pp. 139–166.
- Southwood T.R.E., *Ecological methods*, London: Champan and Hall, 1978, 575 p.
- Zenkova I.V., Filippov B.Yu., *The ground beetles fauna (Coleoptera, Carabidae) of natural and anthropogenic habitats in Khibiny polar massif*, *The Proceed. of 8th Intern. Symp. of Ecol. (ISEM8)*, Budva, Montenegro, 2019, pp. 121–129.
- Yakovlev E.B., Scherbakov A.N., Polevoi A.V., Humala A.E., *Insect fauna of the Paanajarvi national Park and proposed Kalevala National Park with particular emphasis on saproxyllic Coleoptera, Diptera and Hymenoptera*, In: *Biodiversity of old-growth forests and its conservation in north-west Russia*, Oulu, 2000, pp. 103–158.

УДК 631.452:630.232.22

## ВЛИЯНИЕ ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НА СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМОВ СЕГРЕГАЦИОННЫХ КРЫМА<sup>1</sup>

© 2022 г. О. Е. Клименко<sup>а</sup>\*, Н. И. Клименко<sup>а</sup>, Ю. В. Плугатарь<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБУН «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»,  
спуск Никитский, д. 52, пгт Никита, Ялта, Республика Крым, 298648 Россия

\*E-mail: olga.gnbs@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2022 г.

После доработки 26.01.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Создание защитных лесных насаждений (ЗЛН) – важное звено экологизации территории. ЗЛН в степи создаются в основном из интродуцированных растений. Успех интродукции будет зависеть от близости новых условий произрастания к тем, из которых растения перенесены в другое местообитание. Поэтому в конкретных экологических условиях важно определить их долговечность и устойчивость. Почва играет важное значение в адаптации растения к новым экологическим условиям. Кроме того, сами интродуценты воздействуют на свойства степных почв. Исследования проводили в 2006–2010 и 2013 гг. на территории лаборатории степного садоводства Никитского ботанического сада (с. Новый Сад, Республика Крым) в дендропарке, лесополосах, а также зеленых насаждениях села. Оценку состояния, роста и устойчивости интродуцентов к неблагоприятным экологическим факторам выполняли общепринятыми методами. В почве определяли показатели плодородия и солевое состояние. Установлено, что наиболее устойчивые виды, произрастающие в данных экологических условиях около 50 лет: софора японская, каркас сетчатый, пихта греческая, плосковetchник восточный и маклюра оранжевая – находятся в хорошем и отличном состоянии, рост и габитус растений, их зимостойкость и засухоустойчивость значительные. Виды менее устойчивые: платан восточный и ясень пенсильванский – имеют удовлетворительное состояние, суховершинность и меньшую сохранность, страдают от засухи и высокой плотности почвы. Все изученные виды влияли на свойства почвы. Под каркасом сетчатым произошло увеличение содержания органического углерода ( $C_{орг}$ ) по всему гумусовому слою по сравнению с многолетней залежью на 0.15–0.62%, под другими породами отмечено перераспределение  $C_{орг}$  – увеличение в нижних слоях на фоне некоторого снижения в верхних. Под ЗЛН увеличилась мощность гумусового слоя на 20–40 см. Под большинством видов карбонаты были выщелочены на глубину 40–80 см. Величина pH также снижалась на 0.13–0.41 ед., максимально – под маклюрой и каркасом. ЗЛН увеличивали содержание подвижных форм основных элементов питания в почве по сравнению со степным ценозом. Хвойные растения в меньшей мере накапливали нитратный азот и фосфор, чем лиственные, и снижали содержание калия по сравнению с залежью. В целом по изменению различных свойств почвы черноземы сегрегационные под изученными ЗЛН можно назвать лесоизмененными, а выщелачивание карбонатов до глубины 60–80 см и снижение pH на 0.2–0.4 единицы могут быть диагностическими признаками лесоизмененных почв. Наиболее значительное положительное влияние на свойства черноземов сегрегационных оказали следующие виды: плосковetchник восточный, платан западный, каркас сетчатый и маклюра оранжевая.

*Ключевые слова:* защитные лесные насаждения, интродуценты, устойчивость, черноземы сегрегационные лесоизмененные, свойства почвы.

DOI: 10.31857/S0024114822040040

Создание защитных лесных насаждений (ЗЛН) в степи – важное звено экологизации территории, изменения микро- и мезоклимата, накопления влаги, предотвращения пыльных бурь, водной и ветровой эрозии почв, других экосистемных услуг (Хазиев, 2000; Багрова, Гаркуша, 2009; Замолотчиков и др., 2021; Липка и др., 2021). ЗЛН в степи

создаются в основном из растений, интродуцированных из различных мест земного шара. Успех интродукции будет зависеть от подобию новых условий произрастания тем, из которых растения перенесены в другое местообитание. Поэтому в конкретных экологических условиях важно определить не только реакцию растения на экологическое окружение, но и их долговечность и устойчивость.

<sup>1</sup> Работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБУН «НБС-ННЦ» на 2019–2021 гг. (0829-2019-0031).

Почва так же, как и климат, имеет решающее значение в адаптации растения к новым экологическим условиям. Кроме того, сами интродуценты — многолетние древесные растения, длительно произрастающие на одном месте, — воздействуют на свойства степных почв. Большинство исследований свидетельствует о положительном влиянии лесных пород на свойства степных почв — черноземов (Бельгард, 1977; Травлеев, 1977), и называют черноземы под такими насаждениями лесоулучшенными (Поляков, 2009). Отмечается также улучшение структурного и гумусового состояния почв, некоторых показателей водного режима и уменьшение плотности под ЗЛН (Гурин, Апарин, 2012; Королев и др., 2012; Беляев, 2014; Сорокина, 2017). Однако наши исследования показали, что степень и характер изменения свойств степных почв под ЗЛН зависят как от экологических условий местности, так и от конкретной древесной породы (Клименко, Клименко, 2021). Биологические особенности растения, характер его роста и опада, размещение корневой системы, различная скорость минерализации органического вещества и высвобождения питательных веществ также зависят от конкретного вида ЗЛН (Казимирова, 2005).

В связи с этим более детальные исследования влияния основных паркообразующих видов растений на почву в ЗЛН степного Крыма являются весьма актуальными.

Цель данного исследования — изучение состояния и устойчивости насаждений восьми наиболее распространенных видов древесных интродуцентов в степном Крыму, а также их влияния на свойства черноземов сегрегационных.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили на территории лаборатории степного садоводства Никитского ботанического сада (с. Новый Сад, Республика Крым). Территория располагается в южной приподнятой части Центрально-Крымской возвышенной пологоволнистой равнины в пределах центрального равнинно-степного агроклиматического района Крыма. Район отличается засушливым климатом с умеренно-жарким вегетационным периодом и мягкой неустойчивой зимой (Антюфеев и др., 2002). Среднегодовая температура воздуха места проведения исследований — 10.5°C, среднегодовое количество осадков — 480 мм. Коэффициент увлажнения равен 0.48. Средний из абсолютных минимумов температуры воздуха составляет –19...–23°C, абсолютный минимум достигает –30°C.

В начале 70-х гг. прошлого столетия в лаборатории были заложены ЗЛН в дендропарке, расположенном к западу от с. Новый сад и занимаю-

щем около 4 га, лесополосах, окаймляющих поля отдела и в самом селе (рис. 1).

В исследование входили хвойные (3) и лиственные (5) породы, наиболее распространенные при озеленении степного Крыма: пихта греческая (*Abies cephalonica* Loudon), плосковеточник восточный (*Platyclusus orientalis* (L.) Franco), псевдотсуга Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)), каркас сетчатый (*Celtis laevigata* (Torr.) var. *reticulata* (Torr.) Benson), маклюра оранжевая (*Maclura pomifera* (Raf.) C.K. Schneid.), платан восточный (*Platanus orientalis* L.), софора японская (*Styphnolobium japonicum* (L.) Schott) и ясень пенсильванский (*Fraxinus pennsylvanica* Marshall). Все исследованные растения (кроме маклюры оранжевой (лесополоса) и софоры японской (группы по 2–3 растения)) были посажены группами по 4–20 деревьев, схема посадки — 4 × 4 м. Контролем служила многолетняя залежь, расположенная в южной части дендропарка — большая поляна, на которой с 70-х гг. прошлого века развивался травянистый ценоз. Под всеми лиственными породами и псевдотсугой Мензиса имелся плотный травянистый покров в основном из пырея ползучего (*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski), под хвойными породами (пихта греческая и плосковеточник восточный) травянистый покров отсутствовал. В подросте встречались единичные экземпляры шиповника собачьего (*Rosa canina* L.), бирючины обыкновенной (*Ligustrum vulgare* L.), лоха узколистного (*Elaeagnus angustifolia* L.), барбариса обыкновенного (*Berberis vulgaris* L.), сливы вишненоносной (*Prunus cerasifera* Ehrh.) и др.

Природные ареалы изученных древесных интродуцентов находятся в различных частях земного шара: каркас сетчатый (далее каркас), маклюра оранжевая (далее маклюра), ясень пенсильванский (далее ясень) и псевдотсуга Мензиса (далее псевдотсуга) завезены из Северной Америки (США и Канады), платан восточный (далее платан) и пихта греческая (далее пихта) распространены на Балканах, а плосковеточник восточный (далее плосковеточник) и софора японская (далее софора) — интродуценты из Китая, Японии и Кореи. Все они широко распространены в степном Крыму, но в современных условиях при аридизации и потеплении климата находятся в различном состоянии.

Для оценки роста растений в 2017 г. проведен учет биометрических параметров: высоты (высотометром оптическим ВА, точность измерения 4%) и диаметра ствола (вилкой мерной, точность измерения 2 и 4 см) на высоте 130 см над уровнем почвы. Если у дерева наблюдалось разветвление ствола ниже высоты 1.3 м, производили замеры самого крупного ствола. Диаметр горизонтальной проекции кроны (дк) определяли путем проектирования ее краев на горизонтальную поверх-

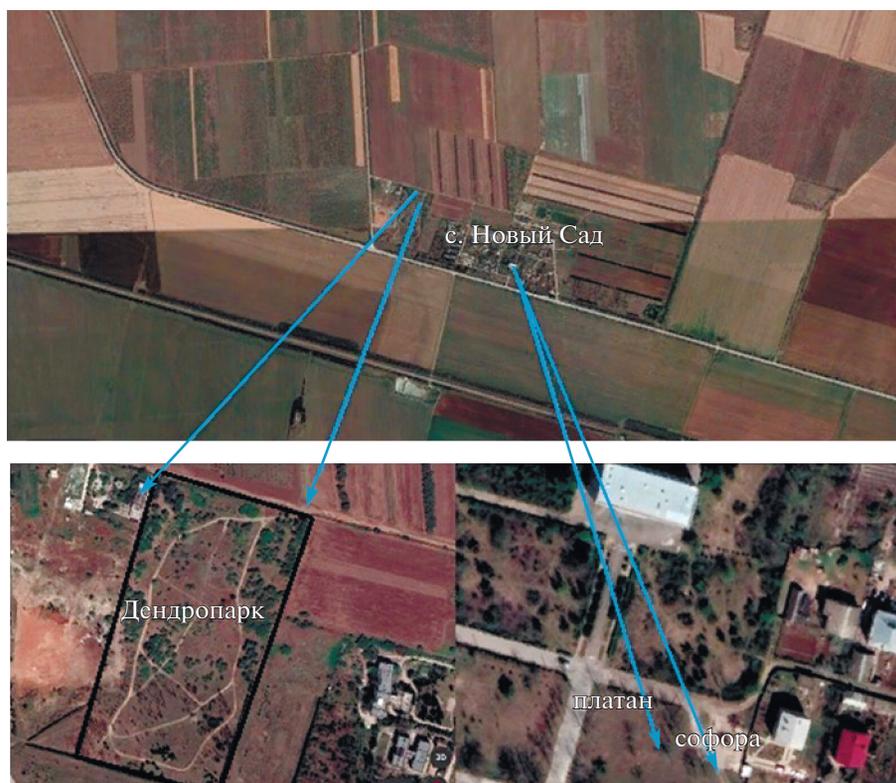


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования, с. Новый Сад Симферопольского района Республики Крым.

ность и замеряли рулеткой в направлениях С–Ю и В–З с последующим вычислением среднего диаметра кроны.

Наблюдения общего состояния и устойчивости растений велись на протяжении 6 лет (2006–2010 и 2013 гг.). Оценка общего состояния проводилась по 4-балльной шкале (Галушко, Горак, 2002): 1 балл – плохое, 2 балла – удовлетворительное, 3 балла – хорошее, 4 балла – отличное; засухоустойчивость определялась визуально по 5-балльной шкале (Григорьев и др., 1988): 0 – растение не повреждается; 1 – повреждается слабо (листья засыхают или теряют тургор, восстанавливающийся после полива); 2 – повреждается сильно (многие листья засыхают (до 10%) и преждевременно опадают, усыхают концы однолетних побегов, растение теряет декоративный вид); 3 – повреждаются очень сильно (все листья засыхают и опадают до наступления нормального листопада, имеются засохшие побеги); 4 – надземная часть растения усыхает полностью или частично в течение одного или двух сезонов. Зимостойкость оценивали по 6-балльной шкале С.Я. Соколова в модификации Г.В. Куликова (1980): 0 – растения очень зимостойкие, зимуют без видимых повреждений в самые холодные зимы; 1–3 – растения с пониженной зимостойкостью: 1 – подмерзают почки и листья; частично годичные побеги; 2 – полностью вымерзают годичные, частично повреждаются побеги двухгодичные; 3 – полностью

вымерзают двухгодичные побеги; 4–5 – малозимостойкие растения: 4 – отмерзает большая часть ветвей и частично повреждается ствол; 5 – отмерзание до корневой шейки с последующим возобновлением порослью; 6 – растения совершенно не зимостойкие (отмерзают с корнем).

Почвенный покров исследуемой территории однороден по генезису и представлен черноземами сегрегационными постагрогенными средне-мощными и мощными турбированными легкоглинистыми на красно-бурых легких глинах (Клименко, Клименко, 2021). Согласно классификации WRB-2015 (IUSS Working Group WRB ..., 2015) данные почвы определены как *haplic Chernozems (Clayic)*. Перед закладкой насаждений все почвы были плантажированы на глубину 60 см.

Для исследования почвы закладывали разрез или скважину в центре куртины деревьев на расстоянии 1.0–1.5 м от ствола дерева. Почву для анализа отбирали из разреза (скважины) 20-сантиметровыми слоями до глубины 120 см. На расстоянии 5–10 м от основного разреза закладывались 2 дублирующие скважины. Почву из разреза и дублирующих скважин по слоям глубиной 20 см объединяли в смешанные образцы. В почве определяли рН водной суспензии ( $pH_{\text{водн}}$ ) потенциометрически (ГОСТ 26423-85), карбонаты – манометрическим методом по ГОСТ 34467-2018, содержание органического вещества ( $C_{\text{орг}}$ ) – по

**Таблица 1.** Состояние, рост, устойчивость интродуцентов в условиях степного Крыма

Вид	Количество деревьев, шт.		Высота дерева, м	Диаметр ствола, см	Средний диаметр кроны (dk), м	Зимостойкость	Засухоустойчивость	Общее состояние
	посажено	выживших						
Каркас сетчатый	15	10	9.3 ± 1.4*	17.8 ± 5.1	5.8 ± 0.5	0	0	3.2
Маклюра оранжевая	18	15	6.7 ± 0.8	13.5 ± 2.2	3.5 ± 0.2	0	0	3.0
Пихта греческая	4	4	15.4 ± 1.8	31.0 ± 3.4	6.4 ± 0.6	0	0	3.5
Платан восточный	6	6	14.8 ± 1.6	38.4 ± 7.9	6.3 ± 1.1	0	1–2	2.0
Плосковеточник восточный	18	14	10.1 ± 1.6	22.6 ± 5.6	5.0 ± 0.2	0	0	3.0
Псевдотсуга Мензиса	32	21	14.8 ± 0.4	31.3 ± 1.2	5.3 ± 0.2	0	0	3.7
Софора японская	2	2	13.0 ± 1.4	34.2 ± 1.1	10.5 ± 1.5	0	0	4.0
Ясень пенсильванский	13	7	11.0 ± 2.6	14.5 ± 7.6	4.8 ± 0.9	0	0	2.6

\* Среднее арифметическое ± стандартная ошибка ( $X \pm Sx$ ).

Тюрину в модификации Симакова, Цыпленкова (ГОСТ 26213-91), нитратного азота – потенциометрически (ГОСТ 26951-86), подвижных форм фосфора и калия по Мачигину (ГОСТ 26205-91). Анализ анионно-катионного состава водной вытяжки из почвы проводили по ГОСТ 26424-26428.

Результаты обработаны статистически с использованием программ пакета Microsoft Excel 2016. Достоверность различий средних независимых выборок оценивали по t-критерию (при равенстве дисперсий, проверенных по F-критерию), достоверным принят 5% уровень значимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование состояния и устойчивости растений показали, что они не повреждались морозами и возвратными весенними холодами на протяжении периода наблюдений и являются зимостойкими (табл. 1).

Большинство из изученных видов являются засухоустойчивыми, кроме платана восточного, который слабо, редко средне повреждался засухой. На момент обследования растения имели разную сохранность, что характеризует их реакцию не только на климатические, но и на другие экологические факторы. Так наиболее сохранными оказались растения платана, софоры и пихты (сохранились на 100%), представители других видов сохранились на 54–83% от числа посаженных экземпляров (табл. 1). Причем более сохранными оказались растения маклюры (83%) и плосковеточника (78%), наименее сохранными – каркаса (67%), псевдотсуги (66%) и ясеня (54%).

Что касается силы роста растений, то наибольшей высоты и диаметра ствола достигали растения пихты, платана и псевдотсуги (табл. 1). Плосковеточник при средней высоте имел довольно значительный диаметр ствола. Диаметр кроны

был самым большим у софоры, что связано отчасти с ее обособленным положением и малым количеством экземпляров. Остальные растения имели значительные размеры при жестких условиях выращивания.

Общее состояние растений оценивалось от 2 (удовлетворительное) до 4 (отличное) баллов (табл. 1). Наиболее низкий балл состояния имели растения платана и ясеня, угнетение проявлялось в суховершинности, усыхании части скелетных ветвей, слабом приросте побегов. Это связано с пониженной засухоустойчивостью первого и, вероятно, высокой плотностью и сухостью почвы, при которых ясень суховершинит и погибает (Деревья и кустарники, 1960). В условиях черноземов сегрегационных, сформировавшихся на краснобурых легких и средних глинах, наблюдается высокая плотность почвы и почвообразующей породы, до 1.5–1.6 г/см<sup>3</sup> в слое глубже 80 см (Клименко, Клименко, 2021). Следовательно, при выращивании данных видов следует предусматривать орошение и глубокое рыхление почвы, а также тщательный подбор участков при их размещении с проведением детального почвенного обследования. Другие виды имеют более высокие баллы состояния, особенно пихта, псевдотсуга и софора, которые практически не повреждены, кроме оголенности нижних побегов из-за затенения. У маклюры и плосковеточника отмечается хорошее состояние растений.

Изучение почвы показало, что под хвойными растениями имеется подстилка мощностью 1–3 см из полуразложившейся хвои и мелких веточек, обильно пронизанная грибным мицелием. Мощность гумусового горизонта и содержание гумуса под разными лесными насаждениями различаются. Хотя все почвы перед посадкой деревьев и на залежи плантажированы на глубину 60 см, гумусовый горизонт мощностью 60 см в настоящее время обнаружен только под залежью, пихтой и софо-

рой, содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в этом слое выше 1% (табл. 2).

Под остальными изученными видами обнаружен более мощный гумусовый горизонт (до 70–100 см), наибольший под плоскочеточником и платаном (85 см), каркасом (90 см). Проникновение гумуса по трещинам и ходам корней под каркасом и маклюрой отмечено до 100–120 см. Это происходит благодаря глубокому проникновению корней, образованию большого количества подвижных форм гумуса за счет кислых выделений корней деревьев (Беляев, 2007).

Содержание  $C_{\text{орг}}$  в почве на залежи максимально в слое 0–10 см, что связано с наибольшим количеством корней трав в этом слое, резко снижается в слое 10–20 см на 0.87% и затем постепенно уменьшается с глубиной. На глубине 60–80 см содержание  $C_{\text{орг}}$  низкое. Под растениями каркаса сетчатого содержание  $C_{\text{орг}}$  выше, чем на залежи во всем гумусовом горизонте, который более мощный, и на глубине 80–120 см содержание  $C_{\text{орг}}$  еще составляет 0.72–0.86%. Под другими породами содержание  $C_{\text{орг}}$ , как правило, ниже, чем на залежи в слое 0–60, в более глубоких слоях (в слое 60–80 см под растениями платана, ясеня, псевдотсуги, плоскочеточника и маклюры), наоборот, превосходит его на 0.14–0.47%, в слое 100–120 см под растениями двух последних пород составляет еще 0.72 и 1.25% соответственно. Самое низкое содержание  $C_{\text{орг}}$  по профилю – под пихтой, что связано с составом хвои этого растения и отсутствием травяного покрова. В среднем под лиственными породами содержание  $C_{\text{орг}}$  по всему гумусовому горизонту выше, чем под хвойными на 0.12–0.34%, причем разница снижается с глубиной, однако различия ( $p \leq 0.05$ ) незначимы (рис. 2).

Таким образом, при длительном произрастании большинства изученных видов лесных культур на степных почвах увеличивается мощность гумусового горизонта и проникновение подвижных гумусовых веществ на большую глубину. Под некоторыми видами (каркас) происходит, кроме того, накопление  $C_{\text{орг}}$  в слое 0–60 см по сравнению со степной залежью.

Содержание общих карбонатов – важный генетический признак почвы, в слое 0–60 см было невысоким на залежи, почва вскипала слабо (табл. 2). Ниже по профилю оно под этим ценозом резко возрастало до 13–16%. Содержание и распространение карбонатов по профилю под пихтой практически не отличалось от залежи, но почва не вскипала от 10% HCl до глубины 40 см. Под остальными видами, растущими в дендропарке, карбонаты почти полностью выщелочены до глубины 80 см, а частично и из более глубоких слоев: в слое глубже 80 см наименьшее их количество обнаружено под маклюрой (6.8–14.0%) и

плоскочеточником (8.1–12.5%). Это свидетельствует о нейтрализации карбонатов кислыми выделениями корней деревьев, а также выносом их в нижние слои за счет большей водопроницаемости почвы под древесными растениями. Под хвойными деревьями содержание  $\text{CaCO}_3$  несколько снижалось в слое 0–40 см и 100–120 см по сравнению с почвой под лиственными, однако различия средних были недостоверны. В остальных слоях содержание карбонатов не различалось под этими группами деревьев (рис. 2).

Под растениями софоры и платана содержание карбонатов высокое с поверхности (особенно под платаном), в слое 40–60 см – минимальное. Очевидно, что эти почвы с поверхности были засыпаны карбонатным субстратом, что наблюдается и по окраске гумусового горизонта. Однако состояние софоры при таком содержании карбонатов отличное, а платан в данном случае может угнетаться и из-за высокого их количества в слое 0–40 см.

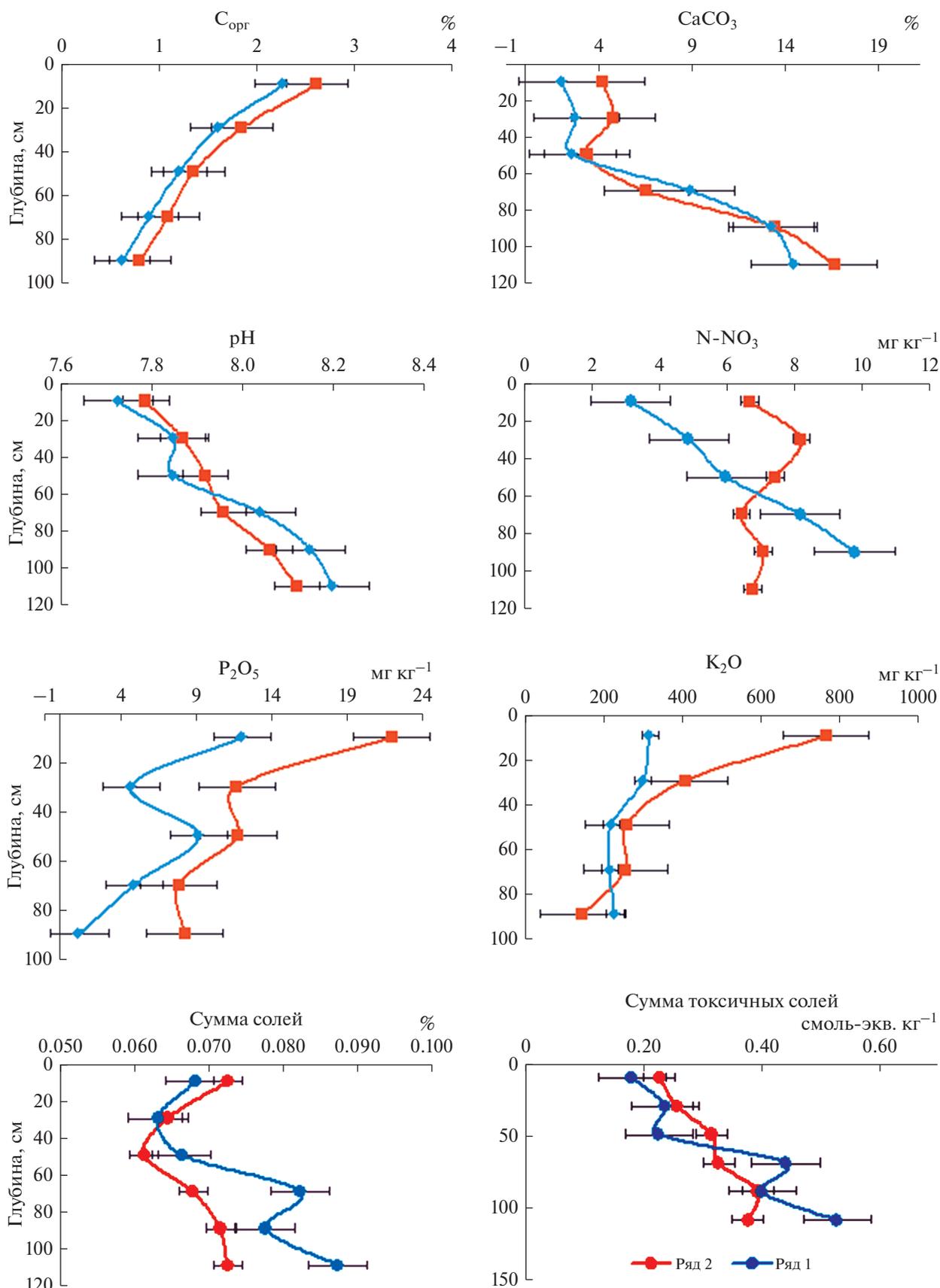
Величина pH водной суспензии почвы ( $\text{pH}_{\text{водн}}$ ) как в контроле под залежью, так и под ЗЛН была слабощелочной или близкой к нейтральной в гумусовом горизонте и увеличивалась вниз по профилю до величин 8.0–8.3. В слое 0–60 см величина  $\text{pH}_{\text{водн}}$  была максимальной под софорой и платаном из-за высокого содержания карбонатов, под остальными ЗЛН в слое 0–20 см незначительно увеличивалась на 0.09–0.20 по сравнению с аналогичным слоем почвы под залежью. Это может быть связано с некоторым накоплением карбонатов в данном слое по сравнению со слоем 20–60 см под древесными растениями и меньшим распространением корней деревьев в поверхностном слое почвы. Связь между содержанием карбонатов и величиной pH в слое 0–20 см прямая, сильная, достоверная ( $r = 0.78$ ,  $n = 8$ ). В слое 20–120 см под большинством видов  $\text{pH}_{\text{водн}}$  значительно снижалась на 0.13–0.41, максимально под маклюрой и каркасом в слое 60–100 см. Это свидетельствует о существенном подкислении почвенного раствора выделениями корней древесных интродуцентов в слое почвы 60–100 см. В целом в слое 0–120 см под всеми породами обнаружена сильная достоверная полиномиальная корреляционная зависимость величины  $\text{pH}_{\text{водн}}$  от содержания карбонатов в слое 0–120 см ( $R^2 = 0.779$ , уравнение регрессии показано на рис. 3). Данные подтверждают, что выщелачивание карбонатов в черноземах сегрегационных до глубины 60–80 см и снижение pH на 0.2–0.4 единицы может быть диагностическим признаком лесоизмененных черноземов сегрегационных.

Содержание подвижных форм элементов питания в почве под залежью было очень низким по нитратному азоту и фосфору, концентрация обменного калия оставалась высокой и плавно снижалась с глубиной (табл. 2). ЗЛН значительно

Таблица 2. Влияние ЗЛН на некоторые показатели чернозема сегрегационного

Угодье, вид, координаты разреза (скважины), высота над уровнем моря	Глубина, см	C <sub>орг</sub> , %	CaCO <sub>3</sub> , %	pH <sub>водн.</sub>	Подвижные, мг кг <sup>-1</sup>		
					N-NO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Многолетняя залежь (контроль) 45°08'52" с.ш. 33°59'34" в.д., 129 м над ур. м.	0–10	2.69	2.9	7.56	2.8	1.3	445
	10–20	1.82	3.2	7.89	2.8	0.4	429
	40–60	1.37	0.7	7.84	2.8	0.2	348
	60–80	0.81	13.3	8.18	2.8	0.2	347
	80–100	—*	16.4	8.26	—	—	—
Каркас сетчатый 45°08'52" с.ш. 33°59'41" в.д., 128 м над ур. м.	100–120	—	15.6	8.34	—	—	—
	0–20	3.02	3.3	7.69	4.7	14.7	776
	20–40	2.04	1.4	7.76	7.6	5.8	464
	40–60	1.52	1.6	7.84	7.6	21.9	309
	60–80	1.43	1.6	7.79	6.3	8.7	280
Маклюра оранжевая 45°09'26" с.ш. 33°59'27" в.д., 122 м над ур. м.	80–100	0.86	10.3	8.04	6.2	9.7	139
	100–120	0.72	15.2	8.16	6.8	9.2	160
	0–20	2.52	1.1	7.65	16.6	46.7	795
	20–40	2.19	0.7	7.65	7.2	21.5	473
	40–60	1.09	1.4	7.65	7.8	10.1	325
Пихта греческая 45°08'56" с.ш. 33°59'34" в.д., 129 м над ур. м.	60–80	1.28	1.4	7.77	8.3	7.8	254
	80–100	1.25	6.8	7.92	11.0	8.0	234
	100–120	—	14.0	8.01	—	—	—
	0–20	2.12	1.1	7.72	3.2	7.8	248
	20–40	1.64	0	7.79	4.6	7.2	325
Платан восточный 45°08'43" с.ш. 34°00'00" в.д., 134 м над ур. м.	40–60	1.28	4.8	7.91	4.8	7.4	310
	60–80	0.63	16.1	8.02	8.3	5.2	123
	80–100	—	15.3	8.07	—	—	—
	100–120	—	13.9	8.06	—	—	—
	0–20	2.29	9.8	7.94	3.5	16.5	766
Плоскоцветочник восточный 45°08'57" с.ш. 33°59'39" в.д., 129 м над ур. м.	20–40	1.72	14.7	7.98	6.3	9.5	415
	40–60	1.46	9.3	8.08	6.9	7.8	272
	60–80	0.95	11.1	8.11	7.4	7.8	253
	80–100	—	16.7	8.10	—	—	—
	100–120	—	20.7	8.08	—	—	—
Псевдотсуга Мензиса 45°08'56" с.ш. 33°59'42" в.д., 128 м над ур. м.	0–20	2.35	2.0	7.76	3.5	26.7	320
	20–40	1.18	1.6	7.90	7.4	6.0	122
	40–60	1.12	0.4	7.72	7.2	11.1	139
	60–80	1.04	0.4	7.82	12.3	9.2	164
	80–100	0.72	8.1	8.05	4.4	2.3	117
Софора японская 45°08'43" с.ш. 34°00'01" в.д., 134 м над ур. м.	100–120	—	12.5	8.27	—	—	—
	3–10	2.33	2.9	7.72	2.8	1.9	395
	10–20	1.97	6.9	7.85	2.8	0.8	464
	60–70	1.13	10.6	8.27	4.1	0.4	373
	80–90	0.52	16.4	8.32	15.1	0.3	349
Ясень пенсильванский 45°08'53" с.ш. 33°59'37" в.д., 128 м над ур. м.	100–120	—	17.1	8.28	—	—	—
	0–20	2.50	7.0	8.00	5.6	21.1	870
	20–40	1.87	7.1	8.07	4.9	13.6	411
	40–60	1.33	3.8	8.18	10.0	—	—
	60–80	0.75	16.0	8.16	6.0	8.0	256
Ясень пенсильванский 45°08'53" с.ш. 33°59'37" в.д., 128 м над ур. м.	80–100	—	19.4	8.12	—	—	—
	100–120	—	17.6	8.15	—	—	—
	0–20	2.71	0	7.69	3.1	10.9	624
	20–40	1.40	0	7.87	15.1	8.0	287
	40–60	1.37	0.7	7.84	4.9	7.2	148
Ясень пенсильванский 45°08'53" с.ш. 33°59'37" в.д., 128 м над ур. м.	60–80	1.04	2.7	7.95	4.3	7.4	253
	80–100	0.34	14.2	8.11	4.1	7.3	81
	100–120	—	16.0	8.19	—	—	—

\* Прочерк — нет данных.



**Рис. 2.** Изменение показателей свойств почвы под действием хвойных (ряд 1) и лиственных (ряд 2) интродуцентов в степном Крыму. Примечание: точка – среднее ( $n = 3-5$ ); горизонтальные отрезки – стандартная ошибка.

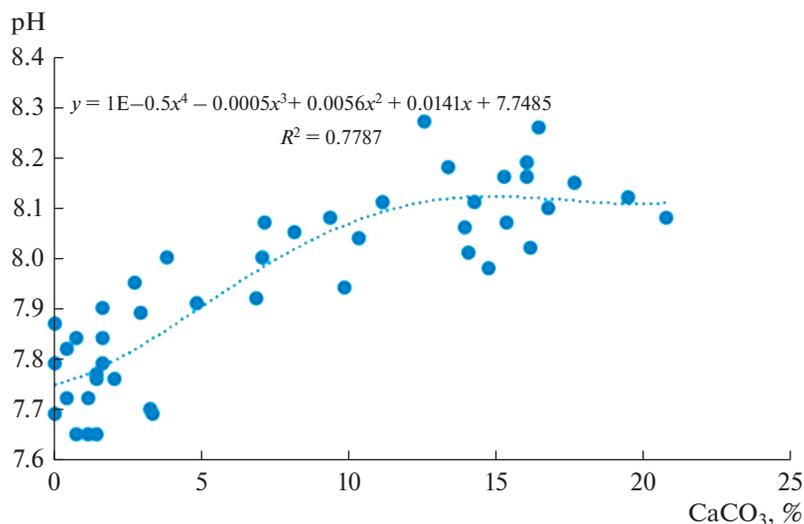


Рис. 3. Зависимость величины рН почвы от содержания карбонатов при лесоразведении на степных почвах.

влияли на содержание элементов питания в почве. Так под всеми ЗЛН увеличивалось содержание нитратного азота и подвижного фосфора, причем степень увеличения и распределение по профилю зависело как от элемента, так и от конкретного вида насаждения. Содержание нитратного азота распределялось неравномерно по профилю почвы. У лиственных пород оно было высоким в слое 0–20(40) см, затем снижалось в слое 20–60(80) см, а ниже по профилю опять возрастало из-за значительной подвижности нитратов. Под хвойными породами оно было существенно ниже, чем под лиственными по всему гумусовому слою, минимально в поверхностном слое и увеличивалось с глубиной (рис. 2). Максимальное количество этого элемента накапливалось под маклюрой, псевдотсугой и ясенем, до 15–17 мг кг<sup>-1</sup> в одном из слоев почвы.

Концентрация подвижного фосфора также значительно увеличивалась под лиственными древесными породами по сравнению с залежью, но в отличие от нитратного азота была максимальной в слое 0–40 см и снижалась с глубиной. Под хвойными растениями характер распространения P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> по профилю оставался таким же, но концентрация этого элемента по всему профилю снижалась, в слое 0–60 см существенно ниже, чем под лиственными (рис. 2). В большей мере увеличение содержания этого элемента по сравнению с залежью происходило под маклюрой, каркасом, плосковetchником и софорой на 20–45 мг кг<sup>-1</sup>.

Содержание обменного калия под ЗЛН лиственных пород значительно увеличивалось по сравнению с залежью, в слое 0–20 см на 180–420 мг кг<sup>-1</sup> в зависимости от вида растения (табл. 2). В более глубоких слоях оно было ниже, чем под залежью на 14–90 мг кг<sup>-1</sup>, что свидетельствует о преимущественно лиственном опаде древесных растений по

сравнению с травянистой залежью, где преобладает корневой опад, и элементы питания при их минерализации распространяются на большую глубину. Под хвойными породами содержание обменного калия было значительно ниже, чем под залежью, и ниже, чем под лиственными породами, существенно в слое 0–20 см (рис. 2). Это можно объяснить более низким содержанием калия в хвое по сравнению с опадом лиственных пород (Казимирова, 2005).

Таким образом, ЗЛН из лиственных растений, изученных нами, способны увеличивать содержание подвижных форм элементов питания в почве по сравнению со степными ценозами, причем содержание нитратного азота имеет тенденцию к накоплению в нижних слоях почвы, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O – в слое 0–40 см, что обусловлено преобладанием поверхностного опада. Под хвойными растениями произошло существенное снижение содержания нитратного азота (в слое 0–40 см), K<sub>2</sub>O – в слое 0–20 см, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – в слое 0–60 см по сравнению с лиственными и снижение содержания элементов питания по всему профилю почвы по сравнению с залежью.

Полученные данные свидетельствуют о том, что почва под залежью и ЗЛН не засолена легкорастворимыми солями, сумма солей невысокая и колеблется от 0.048 до 0.110% (табл. 3). Сода во всех почвах отсутствует. В почве под залежью общая щелочность и содержание хлоридов невысокие, токсичная щелочность составляет 0.06–0.20 смоль-экв кг<sup>-1</sup> и представлена гидрокарбонатами натрия и магния. Содержание токсичных нейтральных солей также невысокое и максимально в слое 60–80 см с преобладанием сульфата натрия (0.22 смоль-экв кг<sup>-1</sup>), гипс в почве отсут-

Таблица 3. Анионно-катионный состав водной вытяжки из почв под различными ЗЛН

Угодье, вид	Слой, см	Сумма солей, %	СМОЛЬ-ЭКВ КГ <sup>-1</sup> ПОЧВЫ							Сумма токсичной щелочности	Сумма токсичных нейтральн. солей
			HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>			
Многолетняя залежь (контроль)	0–20	0.063	0.68	0.04	0.11	0.60	0.08	0.15	0.08	0.23	
	20–40	0.055	0.50	0.08	0.12	0.44	0.04	0.22	0.06	0.26	
	40–60	0.048	0.52	0.04	0.04	0.44	0.04	0.12	0.08	0.16	
	60–80	0.053	0.52	0.04	0.22	0.32	0.08	0.38	0.20	0.46	
	80–100	0.063	0.68	0.04	0.11	0.60	0.08	0.15	0.08	0.23	
Каркас сетчатый	100–120	0.055	0.50	0.08	0.12	0.44	0.04	0.22	0.06	0.26	
	0–20	0.067	0.76	0	0.10	0.72	0.12	0.02	0.04	0.14	
	20–40	0.064	0.60	0	0.23	0.64	0.12	0.07	0	0.19	
	40–60	0.063	0.56	0	0.29	0.56	0.20	0.09	0	0.29	
	60–80	0.060	0.56	0.04	0.21	0.56	0.12	0.13	0	0.25	
Маклюра оранжевая	80–100	0.062	0.56	0.08	0.18	0.48	0.16	0.18	0.08	0.34	
	100–120	0.065	0.52	0.04	0.32	0.48	0.20	0.20	0.04	0.40	
	0–20	0.072	0.68	0.04	0.26	0.72	0.12	0.14	0	0.26	
	20–40	0.066	0.52	0.04	0.34	0.56	0.16	0.18	0	0.34	
	40–60	0.060	0.44	0.04	0.34	0.48	0.16	0.18	0	0.34	
Пихта греческая	60–80	0.075	0.64	0.04	0.34	0.56	0.20	0.26	0.08	0.46	
	80–100	0.089	0.64	0.12	0.49	0.68	0.20	0.27	0	0.47	
	100–120	0.086	0.48	0.12	0.67	0.72	0.32	0.23	0	0.55	
	0–20	0.059	0.56	0	0.20	0.64	0.08	0.04	0	0.12	
	20–40	0.058	0.56	0.04	0.16	0.64	0.08	0.04	0	0.12	
Платан восточный	40–60	0.072	0.56	0.12	0.36	0.84	0.16	0.04	0	0.20	
	60–80	0.082	0.48	0.28	0.44	0.96	0.20	0.04	0	0.24	
	80–100	0.083	0.48	0.40	0.36	0.96	0.24	0.04	0	0.28	
	100–120	0.083	0.48	0.40	0.36	0.96	0.24	0.04	0	0.28	
	0–20	0.079	0.76	0.04	0.24	0.76	0.16	0.12	0	0.28	
Плоскоцветник восточный	20–40	0.064	0.60	0.08	0.16	0.60	0.16	0.08	0	0.24	
	40–60	0.066	0.60	0.04	0.26	0.60	0.20	0.10	0	0.30	
	60–80	0.069	0.60	0.04	0.27	0.64	0.16	0.11	0	0.27	
	80–100	0.064	0.48	0.04	0.37	0.52	0.24	0.13	0	0.37	
	100–120	0.067	0.56	0.04	0.30	0.72	0.04	0.14	0	0.18	
Псевдотсуга Мензиса	0–20	0.059	0.59	0.09	0.11	0.60	0.15	0.04	0	0.19	
	20–40	0.060	0.53	0.16	0.11	0.60	0.15	0.05	0	0.20	
	40–60	0.061	0.53	0.28	0.04	0.60	0.08	0.17	0	0.25	
	60–80	0.061	0.53	0.19	0.11	0.64	0.10	0.09	0	0.19	
	80–100	0.064	0.50	0.28	0.08	0.64	0.12	0.10	0	0.22	
Софора японская	100–120	0.069	0.56	0.31	0.05	0.64	0.15	0.13	0	0.28	
	3–10	0.087	1.05	0.02	0	0.84	0	0.23	0.21	0.23	
	10–20	0.072	0.76	0.04	0.11	0.52	0	0.39	0.21	0.39	
	60–70	0.104	0.52	0.04	0.87	0.56	0.20	0.69	0	0.89	
	80–90	0.086	0.44	0.06	0.68	0.48	0.16	0.54	0	0.70	
Ясень пенсильванский	100–120	0.110	0.44	0.12	0.98	0.52	0.20	0.82	0	1.02	
	0–20	0.098	0.80	0.04	0.48	1.04	0.24	0.04	0	0.28	
	20–40	0.077	0.60	0.04	0.40	0.84	0.16	0.04	0	0.20	
	40–60	0.071	0.65	0.04	0.22	0.62	0.25	0.04	0.03	0.29	
	60–80	0.064	0.60	0.04	0.20	0.68	0.12	0.04	0	0.16	
Ясень пенсильванский	80–100	0.070	0.56	0.08	0.32	0.76	0.16	0.04	0	0.20	
	100–120	0.071	0.44	0.08	0.48	0.76	0.20	0.04	0	0.24	
	0–20	0.075	0.72	0	0.24	0.84	0.08	0.04	0	0.12	
	20–40	0.069	0.60	0	0.32	0.72	0.16	0.04	0	0.20	
	40–60	0.065	0.60	0	0.24	0.68	0.12	0.04	0	0.16	
Ясень пенсильванский	60–80	0.067	0.60	0	0.28	0.68	0.16	0.04	0	0.20	
	80–100	0.069	0.60	0	0.32	0.72	0.16	0.04	0	0.20	
	100–120	0.059	0.48	0	0.32	0.64	0.12	0.04	0	0.16	

Таблица 4. Вероятный качественный состав солей в почве под ЗЛН

Угодье, вид	Слой, см	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	NaCl
		смоль-экв кг <sup>-1</sup>								
Многолетняя залежь (контроль)	0–20	0.60	0.08	0	0	0	0.11	0	0	0.04
	20–40	0.44	0.04	0.02	0	0	0.12	0	0	0.08
	40–60	0.44	0.04	0.04	0	0	0.04	0	0	0.04
	60–80	0.32	0.08	0.12	0	0	0.22	0	0	0.04
	80–100	0.60	0.08	0	0	0	0.11	0	0	0.04
	100–120	0.44	0.04	0.02	0	0	0.12	0	0	0.08
Каркас сетчатый	0–20	0.72	0.04	0	0	0.08	0.02	0	0	0
	20–40	0.60	0	0	0.04	0.12	0.07	0	0	0
	40–60	0.56	0	0	0	0.20	0.09	0	0	0
	60–80	0.56	0	0	0	0.12	0.13	0	0	0.04
	80–100	0.48	0.08	0	0	0.08	0.10	0	0	0.08
	100–120	0.48	0.04	0	0	0.16	0.16	0	0	0.04
Маклюра оранжевая	0–20	0.68	0	0	0.04	0.12	0.10	0	0	0.04
	20–40	0.52	0	0	0.04	0.16	0.14	0	0	0.04
	40–60	0.44	0	0	0.04	0.16	0.14	0	0	0.04
	60–80	0.56	0.08	0	0	0.12	0.22	0	0	0.04
	80–100	0.64	0	0	0.04	0.20	0.15	0	0	0.12
	100–120	0.48	0	0	0.24	0.32	0.11	0	0	0.12
Пихта греческая	0–20	0.56	0	0	0.08	0	0	0	0	0
	20–40	0.56	0	0	0.08	0	0	0	0	0
	40–60	0.56	0	0	0.08	0.12	0	0	0.08	0.04
	60–80	0.48	0	0	0.44	0	0	0.04	0.20	0.04
	80–100	0.48	0	0	0.36	0	0	0.12	0.24	0.04
	100–120	0.53	0	0	0.43	0.02	0	0.12	0.36	0.05
Платан восточный	0–20	0.76	0	0	0	0.16	0.08	0	0	0.04
	20–40	0.60	0	0	0	0.16	0	0	0	0.08
	40–60	0.60	0	0	0	0.20	0.06	0	0	0.04
	60–80	0.60	0	0	0.04	0.12	0.11	0	0	0.04
	80–100	0.48	0	0	0.04	0.24	0.09	0	0	0.04
	100–120	0.56	0	0	0.16	0.04	0.10	0	0	0.04
Плоскоцветочник восточный	0–20	0.59	0	0	0.01	0.10	0	0	0.05	0.04
	20–40	0.53	0	0	0.07	0.04	0	0	0.11	0.05
	40–60	0.53	0	0	0.04	0	0	0.03	0.08	0.17
	60–80	0.53	0	0	0.11	0	0	0	0.10	0.09
	80–100	0.50	0	0	0.08	0	0	0	0.08	0.10
	100–120	0.56	0	0	0.05	0	0	0.03	0.15	0.13
Псевдотсуга Мензиса	3–10	0.84	0	0.21	0	0	0	0	0	0.02
	10–20	0.52	0	0.24	0	0	0.11	0	0	0.04
	60–70	0.52	0	0	0.04	0.20	0.63	0	0	0.04
	80–90	0.44	0	0	0.04	0.16	0.48	0	0	0.06
	100–120	0.44	0	0	0.08	0.20	0.70	0	0	0.12
	Софора японская	0–20	0.80	0	0	0.24	0.24	0	0	0
20–40		0.60	0	0	0.24	0	0	0	0.16	0.04
40–60		0.62	0.03	0	0	0.22	0	0	0	0.04
60–80		0.60	0	0	0.08	0.12	0	0	0	0.04
80–100		0.56	0	0	0.20	0.12	0	0	0.04	0.04
100–120		0.44	0	0	0.32	0.16	0	0	0.04	0.04
Ясень пенсиль- ванский	0–20	0.72	0	0	0.12	0.08	0.04	0	0	0
	20–40	0.60	0	0	0.12	0.16	0.04	0	0	0
	40–60	0.60	0	0	0.08	0.12	0.04	0	0	0
	60–80	0.60	0	0	0.08	0.16	0.04	0	0	0
	80–100	0.60	0	0	0.12	0.16	0.04	0	0	0
	100–120	0.48	0	0	0.16	0.12	0.04	0	0	0

ствуется (табл. 4). Тип засоления содово-сульфатный магниевый и магниевое-натриевый.

Изученные виды ЗЛН отличались по воздействию на солевой состав почв, и, хотя почвы фактически не были засолены, состав и количество солей менялись. Так, все листовые породы способствовали некоторому накоплению суммы солей в слое 0–20 см на 0.004–0.035%, в большей мере – софора, платан и ясень, за счет увеличения содержания сульфатов магния (0.16–0.24 смоль-экв  $\text{кг}^{-1}$ ), тогда как под залежью эти соли отсутствовали. В середине профиля сумма солей несколько снижалась, далее в слое 60–120 см опять увеличивалась и была максимальной под растениями маклюры (табл. 3, 4).

В почве под растениями каркаса, маклюры и софоры токсичная щелочность встречалась фрагментарно и была значительно ниже, чем под залежью. В почве под этими видами накапливался гипс, сульфаты магния и натрия (табл. 4). Под растениями ясеня хлориды отсутствовали. В почве под хвойными видами – плоскочеточником и пихтой – соли в верхнем слое не накапливались и имели тенденцию к постепенному увеличению сверху вниз, более значительному под первой. В почве под этими видами преобладал гипс, хлориды натрия и магния и появлялся хлорид кальция в количестве 0.05–0.11 смоль-экв  $\text{кг}^{-1}$  – наиболее подвижная и токсичная соль, которая не обнаруживалась в почве под другими изученными видами. Под псевдотсугой наблюдалась несколько иная тенденция. Сумма солей в профиле превосходила таковую под другими хвойными растениями на 0.02–0.03%, прослеживалось незначительное накопление суммы солей в слое 3–10 см по сравнению с нижележащим слоем, соли по профилю распределялись неравномерно с двумя максимумами в слоях 60–70 и 100–120 см, что сближает этот вид с воздействием на почву листовых растений. Под этим видом наблюдалась повышенная общая щелочность с наличием токсичных гидрокарбонатов натрия, накапливались сульфаты и хлориды натрия (табл. 4). Тип засоления под большинством пород становился хлоридно-сульфатным и сульфатным с участием соды – магниевым и магниевое-натриевым.

В среднем под хвойными породами происходило незначительное снижение суммы солей в слое 0–20 см по сравнению с листовыми, ниже по профилю, наоборот, сумма солей была выше под хвойными растениями, существенно в слое 60–80 и 100–120 см за счет увеличения содержания токсичных солей в этих слоях почвы (рис. 2). Сумма токсичных солей под хвойными растениями была незначительно ниже, чем под листовыми в слое 0–50 см, ниже по профилю возрастала более значительно, что согласуется с ранее полученными данными (Клименко, Клименко, 2021).

Таким образом, данные черноземы не были засолены, но ЗЛН воздействовали на солевой состав степной почвы: под листовыми породами наблюдалось два максимума солей в слое 0–20(40) см и в нижних горизонтах; была практически полностью нейтрализована токсичная щелочность, выявленная на залежи, за счет образования гипса; соли были представлены сульфатами магния и натрия и незначительно – хлоридами, большее количество солей накапливалось под растениями софоры и маклюры.

Под хвойными деревьями (пихта и плоскочеточник) преобладал гипс, появлялись хлориды кальция, накопление солей происходило в нижних горизонтах почвы. Распределение солей и их состав под псевдотсугой несколько отличался от других хвойных пород и был ближе к листовым растениям – там проявлялась токсичная щелочность и накапливались сульфаты и хлориды натрия. Вероятно, это связано с влиянием травянистого покрова под этим растением, отсутствующего под другими изученными хвойными породами.

## ВЫВОДЫ

1. Искусственные древесные насаждения, около 50 лет произрастающие в условиях степного Крыма, имеют различное состояние и разное влияние на свойства почвы, все зависит от вида растения. Наиболее устойчивые виды: софора японская, пихта греческая, плоскочеточник восточный и маклюра оранжевая – находятся в хорошем и отличном состоянии, число погибших растений минимально, рост и габитус растений значительные, зимостойкость и засухоустойчивость высокие. Виды менее устойчивые: платан восточный и ясень пенсильванский – находятся в удовлетворительном состоянии: отмечается суховершинность, они страдают от засухи (платан), сухости и высокой плотности почвы (ясень).

2. Все изученные виды влияли на свойства почвы, причем степень и направленность этого влияния зависела от вида растения. Под каркасом сетчатым произошло увеличение содержания  $S_{\text{орг}}$  по всему гумусовому слою по сравнению с многолетней залежью на 0.15–0.62%, под другими породами наблюдалось перераспределение  $S_{\text{орг}}$  – увеличение в нижних слоях на фоне некоторого снижения в верхних. Под ЗЛН увеличилась мощность гумусового слоя на 20–40 см, в большей мере под плоскочеточником, платаном и каркасом. Под большинством видов карбонаты были выщелочены на глубину 40–80 см и частично из более глубоких слоев за счет их нейтрализации кислыми выделениями корней деревьев и выносом в нижние слои за счет увеличения водопроницаемости при разрыхлении почвы корневыми системами

деревьев. Величина  $pH_{\text{водн}}$  также снижалась на 0.13–0.41 ед., максимально под маклюрой и каркасом в слое 60–100 см и зависела от содержания карбонатов в почве ( $R^2 = 0.779$ ). Выщелачивание карбонатов в черноземах сегрегационных до глубины 60–80 см и снижение  $pH$  на 0.2–0.4 единицы по сравнению с почвами под степной растительностью может быть диагностическим признаком лесоизмененных черноземов.

3. ЗЛН увеличивали содержание подвижных форм основных элементов питания в почве по сравнению со степными ценозами, причем содержание нитратного азота имело тенденцию к накоплению в нижних слоях почвы, фосфора и калия – в слое 0–40 см, последнее обусловлено преобладанием поверхностного опада. Под хвойными растениями содержание нитратного азота в слое 0–40 см, обменного калия в слое 0–20 см и подвижного фосфора в слое 0–60 см было существенно ниже, чем под лиственными, снижалось содержание калия по сравнению с залежью, проявилась тенденция к снижению  $C_{\text{орг}}$  по всему профилю, карбонатов и  $pH$  – в слое 0–40 см.

4. Почвы под залежью и древесными растениями были незасоленными, однако в зависимости от конкретной древесной породы количество и состав легкорастворимых солей менялся. Так, под всеми древесными растениями накапливался гипс, который нейтрализовал токсичную щелочность, а также сульфаты магния и натрия; под растениями ясеня отсутствовали хлориды. Под хвойными видами водорастворимые соли имели тенденцию к постепенному накоплению сверху вниз, более значительному под пихтой, чем под плоскочеточником. Под этими породами появлялся в незначительных количествах хлорид кальция (0.05–0.11 смоль-экв  $kg^{-1}$ ). В целом под хвойными видами проявлялась тенденция к снижению суммы солей в слое 0–20 см и большему их накоплению в более глубоких слоях за счет увеличения суммы токсичных солей по сравнению с лиственными, что, вероятно, определялось значительным иссушением почвы под хвойными растениями за счет плотности их кроны и подтягиванием более концентрированных растворов из нижних слоев почвы.

5. В целом по изменению различных свойств почвы чернозема сегрегационные под изученными ЗЛН можно назвать лесоизмененными. Наиболее значительное положительное влияние на свойства черноземов сегрегационных оказали следующие виды: плоскочеточник восточный, платан западный, каркас сетчатый и маклюра оранжевая. Для улучшения эдафических свойств черноземов сегрегационных на красно-бурых глинах для платана восточного и ясеня пенсильванского почву следует орошать, а под последним

проводить периодическое глубокое рыхление для снижения плотности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антюфеев В.В., Важов В.И., Рябов В.А.* Справочник по климату Степного отделения Никитского ботанического сада. Ялта, 2002. 88 с.
- Багрова Л.А., Гаркуша Л.Я.* Искусственные лесонасаждения в Крыму // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2009. Вып. 20. С. 146–153.
- Бельгард А.Л.* Что такое лесное сообщество в степи? // Вопросы степного лесоразведения и охраны природы. Днепропетровск, 1977. С. 27–32.
- Беляев А.Б.* Многолетняя динамика свойств чернозёмов, выщелоченных под различными лесонасаждениями // Почвоведение. 2007. № 8. С. 917–926.
- Беляев А.Б.* Лесные экосистемы и их влияние на свойства и плодородие почв лесостепи ЦЧР // Труды ин-та геологии Дагестанского научного центра РАН. 2014. № 63. С. 53–56.
- Галушко Р.В., Горак Ю.С.* О результатах интродукции древесных растений в Евпаторийском дендропарке // Бюллетень Никитского ботанического сада. 2002. Вып. 84. С. 53–57.
- Григорьев А.Г., Мороз С.А., Ключникова Е.А., Еганова Е.В.* Интродукция видов сирени в Северный Крым // Бюллетень Никитского ботанического сада. 1988. Вып. 65. С. 22–26.
- Гурин П.Д., Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю.* Влияние лесопосадок и длительного сельскохозяйственного использования на свойства южных черноземов // Вестник СПбГУ. 2012. Сер. 3. № 2. С. 109–119.
- Деревья и кустарники СССР. Дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции / Под ред. Соколова С.Я. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 5. 544 с.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Каганов В.В.* Экосистемные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2021. № 6. С. 581–592.
- Казмирова Р.Н.* Почвы и парковые фитоценозы Южного берега Крыма. К.: Аграрна наука, 2005. 183 с.
- Клименко О.Е., Клименко Н.И.* Изменение свойств агрочерноземов сегрегационных Крыма под влиянием различных лесонасаждений // Почвоведение. 2021. № 5. С. 606–619.
- Королев В.А., Громовик А.И., Йонко О.А.* Изменение физических свойств почв каменной степи под влиянием полезащитных лесных полос // Почвоведение. 2012. № 3. С. 299–308.
- Куликов Г.В.* Результаты интродукции новых для Крыма древесных растений (1970–1980гг.) // Интродукция декоративных деревьев и кустарников на юге СССР // Труды ГНБС. 1980. Т. 82. С. 48–80.
- Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546.

Поляков А.К. Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды. Донецк: Ноулидж, 2009. 268 с.

Сорокина О.А. Трансформация плодородия почв под лесными насаждениями на сопряженных элементах рельефа в степях Хакассии // Лесоведение. 2017. № 1. С. 60–72.

Травлев А.П. Ведущие аспекты взаимодействия растительности с почвами в условиях степной зоны // Вопросы степного лесоразведения и охраны природы. Днепропетровск, 1977. Вып. 7. С. 40–45.

Хазиев Ф.Х. Антропогенная деградация плодородия черноземов Предуралья и проблемы его воспроизводства // Антропогенная эволюция черноземов. Воронеж, 2000. С. 247–275.

IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports No. 106 (UN Food and Agriculture Organization, Rome, 2015).

## Introduced Woody Plants Affect the Haplic Chernozems Characteristics in Crimea

O. Ye. Klimenko<sup>1</sup>\*, N. I. Klimenko<sup>1</sup>, and Yu. V. Plugatar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Centre, Nikita, Yalta, Republic of Crimea, 298648 Russia

\*E-mail: olga.gnbs@mail.ru

The creation of protective forest plantations (PFP) is an important link in the greening of the territory. PFPs in steppes are created mainly from introduced plants. The success of the introduction will depend on the proximity of the new growing conditions to those from which the plants were transferred to another habitat. Therefore, in specific environmental conditions, it is important to determine their durability and stability. The soil plays an important role in the adaptation of the plant to new environmental conditions. In addition, the introduced plants themselves affect the properties of steppe soils. The studies were carried out in 2006–2010 and 2013 on the territory of the steppe horticulture laboratory of the Nikitsky Botanical Gardens (village of Novy Sad, Republic of Crimea) in the arboretum, forest belts and in green spaces of the village. Assessment of the state, growth and resistance of introduced species to adverse environmental factors was performed by generally accepted methods. Fertility and salinity parameters were determined for the soils. It has been established that the most resistant species that have been growing in these environmental conditions for about 50 years: the Japanese pagoda tree, the netleaf hackberry, the Greek fir, the Chinese thuja and the Osage orange are in good and excellent condition, the growth and habitus of plants, their winter hardiness and drought resistance are significant. Less resistant species: the oriental plane and the green ash – have a satisfactory condition, display dry tops and less preservation ratio, suffer from droughts and high soil density. All studied species influenced soil properties. Under the netleaf hackberry, there was an increase in the content of organic carbon ( $C_{org}$ ) throughout the humus layer by 0.15–0.62% compared to the long-term fallow; under other species, a redistribution of  $C_{org}$  was noted – an increase in the lower layers against the background of a slight decrease in the upper ones. The thickness of the humus layer increased by 20–40 cm under the PFPs. Under most species, carbonates were leached to a depth of 40–80 cm. PFPs increased the content of the main nutrients mobile forms in the soil in comparison with the steppe cenosis. Coniferous plants accumulated nitrogen in nitrate form and phosphorus to a lesser extent than deciduous plants and reduced the content of potassium compared to the fallow. On the whole, according to the change in various soil properties, the Haplic chernozems under the studied PFPs can be called forest-modified, and the leaching of carbonates to a depth of 60–80 cm and a decrease in pH by 0.2–0.4 units can be diagnostic signs of forest-modified soils. The most significant positive impact on the properties of Haplic chernozems was exerted by the following species: Chinese thuja, American sycamore, netleaf hackberry, and Osage orange.

*Keywords:* protective forest plantations, introduced species, resistance, Haplic forest-modified chernozems, soil properties.

**Acknowledgements:** The study has been carried out according to the plan for the scientific research of the Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Centre for 2019–2021 (0829-2019-0031).

### REFERENCES

Antyufeev V.V., Vazhov V.I., Ryabov V.A., *Spravochnik po klimatu Stepnogo otdeleniya Nikitskogo botanicheskogo sada* (Handbook on the climate of the Steppe Branch of the Nikitsky Botanical Gardens), Yalta, 2002, 88 p.

Bagrova L.A., Garkusha L.Ya., *Iskusstvennye lesonasazhdeniya v Krymu* (Artificial forest plantations in Crimea), *Ekosistemy, ikh optimizatsiya i okhrana*, 2009, Vol. 20, pp. 146–153.

Bel'gard A.L., Chto takoe lesnoe soobshchestvo v stepi? (What is a forest community in the steppe?), In: *Voprosy stepnogo lesorazvedeniya i okhrany prirody* (Issues of steppe afforestation and nature protection), Dnepropetrovsk, 1977, pp. 27–32.

Belyaev A.B., Long-term dynamics of the properties of leached chernozems under different forest plantations, *Eurasian Soil Science*, 2007, Vol. 40(8), pp. 821–829.

Belyaev A.B., Lesnye ekosistemy i ikh vliyanie na svoistva i plodorodie pochv lesostepi CChR (Forest ecosystems and

- their influence on the properties and fertility of soils in the forest-steppe of the Central Chernozem region), *Trudy in-ta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, No. 63, pp. 53–56.
- Derev'ya i kustarniki SSSR. Dikorastushchie, kul'tiviruemye i perspektivnye dlya introduktsii* (Trees and bushes of the USSR. Wild, cultivated and promising for introduction), Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1960, Vol. 5, 544 p.
- Galushko R.V., Gorak Yu.S., O rezul'tatakh introduktsii drevesnykh rastenii v Evpatoriiskom dendroparke (On the results of the introduction of woody plants in the Evpatoria arboretum), *Byulleten' Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2002. Vol. 84, pp.53–57.
- Grigor'ev A.G., Moroz S.A., Klyuchnikova E.A., Eganova E.V., Introduktsiya vidov sireni v Severnyi Krym (Introduction of lilac species to the Northern Crimea), *Byulleten' Nikitskogo botanicheskogo sada*, 1988, Vol. 65, pp. 22–26.
- Gurin P.D., Aparin B.F., Sukhacheva E.Yu., Vliyaniye lesoposadok i dlitel'nogo sel'skokhozyaistvennogo ispol'zovaniya na svoistva yuzhnykh chernozemov (Influence of forest plantations and long-term agricultural use on the properties of southern chernozems), *Vestnik SPbGU*, 2012, Ser. 3, Vol. 2, pp. 109–119.
- Khaziev F.Kh., Antropogennaya degradatsiya plodorodiya chernozemov Predural'ya i problemy ego vosproizvodstva (Anthropogenic degradation of chernozems fertility in the Urals and problems of its reproduction), In: *Antropogennaya evolyutsiya chernozemov* (Anthropogenic evolution of chernozems), Voronezh, 2000. pp. 247–275.
- Kazimirova R.N., *Pochvy i parkovye fitotsenozy Yuzhnogo berega Kryma* (Soils and park phytocenoses of the southern coast of Crimea), Kiev: Agrarna nauka, 2005, 183 p.
- Klimenko O.E. and Klimenko N.I., Changes in the Properties of Crimean Haplic Chernozems under the Impact of Forest Plantations, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54(5), pp. 750–762.
- Korolev V.A., Gromovik A.I., Jonko O.A., Changes in the physical properties of soils in the kamennaya steppe under the impact of shelterbelts, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45(3), pp. 257–265.
- Kulikov G.V., Rezul'taty introduktsii novykh dlya Kryma drevesnykh rastenii (1970–1980gg.) (The results of the introduction of woody plants new to Crimea (1970–1980), *Trudy GNBS*, 1980, Vol. 82, pp. 48–80.
- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Yu., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M., Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata (The role of forests in the adaptation of natural systems to climate change), *Lesovedenie*, 2021, No 5, pp. 531–546.
- Polyakov A.K., *Introduktsiya drevesnykh rastenii v usloviyakh tekhnogennoi sredy* (Introduction of woody plants in a technogenic environment), Donetsk: Noulidge, 2009, 268 p.
- Sorokina O.A., Transformatsiya plodorodiya pochv pod lesnymi nasazhdeniyami na sopryazhennykh elementakh rel'efa v stepyakh Khakassii (Transformation of soil fertility under forest plantations on conjugate relief elements in the steppes of Khakassia), *Lesovedenie*, 2017, No 1, pp. 60–72.
- Travleev A.P., Vedushchie aspekty vzaimodeistviya rastitel'nosti s pochvami v usloviyakh stepnoi zony (Leading aspects of the interaction of vegetation with soils in the steppe zone), *Voprosy stepnogo lesorazvedeniya i okhrany prirody*, Dnepropetrovsk, 1977, Vol. 7, pp. 40–45.
- IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2014*, Update 2015, International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports No. 106 (UN Food and Agriculture Organization, Rome, 2015).
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kaganov V.V., Ekosistemnye uslugi i prostranstvennoe raspredelenie zashchitnykh lesov Rossiiskoi Federatsii (Ecosystem services and spatial distribution of protective forests of the Russian Federation), *Lesovedenie*, 2021, No 6, pp. 581–592.

УДК 631.433.3:630\*114.35:582.475

## ВЛИЯНИЕ СПЛОШНОЙ РУБКИ НА ДЫХАНИЕ ПОЧВЫ СРЕДНЕТАЕЖНОГО СОСНЯКА ЧЕРНИЧНОГО РЕСПУБЛИКИ КОМИ<sup>1</sup>

© 2022 г. А. Ф. Осипов\*

*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН,  
ул. Коммунистическая, д. 28, ГСП-2, Сыктывкар, 167982 Россия**\*E-mail: osipov@ib.komisc.ru*

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 02.11.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Хозяйственная деятельность человека оказывает существенное влияние на цикл углерода в лесных экосистемах. Цель настоящей работы – определить влияние сплошнолесосечной рубки на эмиссию  $\text{CO}_2$  ( $R_s$ ) с поверхности почвы среднетаежного сосняка черничного с учетом отдельных технологических элементов рубки. Исследование проведено в подзоне средней тайги Республики Коми. Объектами послужили технологические элементы (пасеки и пасечные волока) рубки сосняка черничного. Рубка проведена с использованием современных лесозаготовительных комплексов с сортиментной вывозкой древесины. Контролем послужил спелый сосняк черничный, произрастающий рядом. Установлена положительная взаимосвязь  $R_s$  и температуры почвы как в сосняке черничном, так и на пасечных участках и волоках рубки. В год с меньшим количеством осадков и более высокими температурами воздуха теснота связи между этими параметрами была выше в сосняке, тогда как на рубке она оказалась ниже по сравнению с периодом с большим выпадением осадков и меньшими температурами воздуха. Интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы пасечных участков была ниже по сравнению с ненарушенным сосняком в отдельные месяцы и периоды исследования (лето, вегетационный период, бесснежный период). Дыхание почв волоков различалось в разные годы исследований. Так, в более влажный 2019 г. наблюдали относительно высокие, сопоставимые с контролем величины потока  $\text{CO}_2$  с поверхности волоков, тогда как в более сухой 2020 г. они были ниже по сравнению с сосняком черничным, однако сопоставимы с пасечными участками. Следовательно, принимая во внимание значимую площадь (до 25%), которую занимают волока на рубках при использовании современных лесозаготовительных комплексов, при оценке углеродного бюджета на рубках необходимо учитывать роль технологических элементов на ней.

*Ключевые слова: средняя тайга, сосняк, дыхание почвы, сплошная рубка, пасека, волок.*

**DOI:** 10.31857/S0024114822030111

Леса бореального пояса играют важную роль в глобальных запасах углерода, аккумулируя примерно  $1095 \times 10^{15}$  г (Bradshaw, Warkentin, 2015) со средним годичным стоком около  $0.45 \text{ т га}^{-1}$  (Pan et al., 2011). Значимое участие в этих процессах выполняют леса России, для территории которой оценки запасов/поглощения углерода по данным разных авторов разнятся (Filipchuk et al., 2018; Scherachenko et al., 2021). Отмечено, что большая часть углерода в лесных сообществах страны (порядка 75%) сосредоточена в почвенном блоке (Schapoff et al., 2016; Chernova et al., 2021). Существенное влияние на цикл углерода в лесах оказы-

вает хозяйственная деятельность человека, особенно промышленные рубки, изменяя величину и знак углеродного баланса экосистемы (Zamolodchikov et al., 2013; Naudts et al., 2016; Pukkala, 2018). Сплошные рубки ведут к потерям почвенного углерода за счет снижения его массы в лесной подстилке и верхних минеральных горизонтах (Думов et al., 2017; Mayer et al., 2020), что во многом связано с трансформацией потоков диоксида углерода с поверхности почвы после нарушения (Čater et al., 2021). Вследствие более интенсивного роста температуры воздуха в экосистемах высоких широт, леса бореального пояса потенциально представляют собой крупный источник углерода, что требует понимания влияния хозяйственной деятельности как на круговорот углерода в них, так и на процессы изменения климата (Bradshaw, Warkentin, 2015; Лукина, 2020).

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме НИР “Зональные закономерности динамики структуры и продуктивности первичных и антропогенно измененных фитоценозов лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России” (регистрационный номер 1021051101417-8-1.6.19).

Одной из причин неопределенностей в оценке баланса углерода лесными экосистемами России (особенно потоков углерода) можно назвать недостаток экспериментальных данных, характеризующих трансформацию круговорота углерода после антропогенных и природных нарушений, которыми охвачены значительные площади (Scharoff et al., 2016). Так, по данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Государственный доклад ..., 2020), годичный объем заготовленной древесины с 2015 по 2019 гг. изменялся в пределах 205–238 млн м<sup>3</sup>, что свидетельствует о существенном влиянии промышленных рубок не только на цикл углерода страны, но и на цикл Северного полушария в целом. На территории Республики Коми за аналогичный период площадь, пройденная рубками, составляет 40–65 тыс. га в год, а годичный объем вырубленной древесины – 8.3–9.9 млн м<sup>3</sup> (Государственный доклад ..., 2020). Если оценить влияние рубок на запасы углерода фитомассы древостоев возможно с использованием конверсионных коэффициентов, то для характеристики изменений эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы достоверные предикторы отсутствуют. Это во многом объясняется недостаточным количеством материалов исследований, освещающих последствия влияния рубки леса на динамику дыхания почвы. Так, эффект сплошной рубки на потоки CO<sub>2</sub> как с поверхности почвы, так и экосистемы в целом показан для южнотаежных ельников в условиях Московской (Molchanov et al., 2017) и Тверской областей (Mamkin et al., 2019).

Вырубка представляет собой неоднородную поверхность, представленную чередующимися пасаками – участками с относительно слабо нарушенным почвенным покровом – и пасечными волоками, по которым передвигалась лесозаготовительная техника и где сложены порубочные остатки (срубленные сучья, вершины деревьев и т.д.). Также одним из основных технологических элементов вырубки является магистральный волок, объединяющий пасечные волоки и погрузочную площадку или дорогу для вывозки древесины. Можно предположить, что на интенсивность потока CO<sub>2</sub> с поверхности технологических элементов вырубки будет влиять степень их нарушенности, интенсивность лесовозобновительного процесса, а также наличие на них растительных (в том числе порубочных) остатков. Следует отметить, что роль отдельных технологических элементов в дыхании почвы пострубочных сообществ слабо изучена. В этой связи целью настоящей работы – определение влияния сплошной рубки на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почвы среднетаежного сосняка черничного с учетом степени ее нарушения. Данная цель предусматривала решение следующих основных задач:

1) оценить ход сезонной динамики эмиссии CO<sub>2</sub> в сосняке черничном и на технологических элементах вырубки сосняка черничного;

2) охарактеризовать влияние температуры и влажности почвы на дыхание почвы;

3) рассчитать вынос углерода с эмиссией CO<sub>2</sub> с поверхности сосняка черничного и технологических элементов вырубки.

Полученные данные можно использовать при определении роли сплошных рубок при оценке цикла углерода лесных экосистем.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проведены в подзоне средней тайги в Республике Коми. На территории господствуют отложения четвертичной системы, которые включают осадки не менее трех оледенений, представленные моренными валунными суглинками и флювиогляциальными песками. Климат территории умеренно-континентальный со средней температурой июля +17.5°C и января –14.2°C. Общее количество осадков составляет 620 мм в год. Вегетационный период длится в среднем 141 день, с середины мая до конца сентября, а период без устойчивого снежного покрова – с начала мая до конца октября. Преобладающими древесными породами здесь являются ель, сосна и береза, а в почвенном покрове доминируют типичные подзолистые и болотно-подзолистые почвы (Атлас ..., 2011).

Работа выполнена с мая по октябрь в 2019 и 2020 гг. на технологических элементах (пасечные участки и пасечные волоки) вырубки сосняка черничного (61°35'35" с.ш., 51°02'25" в.д.), проведенной в 2015 г. с использованием современных лесозаготовительных комплексов и сортиментной вывозки древесины. Тип рубки – сплошная. Площадь вырубки – 14.7 га, ширина пасечных участков варьировала в пределах 10.5–13.5 м (в среднем 12 м), волоков – 3–3.5 м (в среднем 3.3 м). Порубочные остатки сложены на волоках. В настоящее время пострубочное сообщество сформировано единичными тонкомерными деревьями ели, березы и подростом из этих же пород как предварительного, так и последующего возобновления (табл. 1). В качестве контрольного участка выбран спелый сосняк черничный, произрастающий рядом с вырубкой. Почва исследуемых сообществ торфянисто-подзолисто-глеватая иллювиально-железистая (Folic Retisol), песчаная, подстилаемая с глубины 60 см суглинками. Содержание углерода в растительных остатках лесной подстилки сосняка и на пасеке вырубки 45–48, азота 1.2–1.3%. Мощность органического горизонта в сосняке черничном составляет 8.9 ± 0.4 см, на пасеках сплошной вырубки 5.3 ± 0.2 см.

Измерение эмиссии CO<sub>2</sub> (*R<sub>s</sub>*) проводили при помощи инфракрасного газоанализатора LI COR 8100

**Таблица 1.** Краткая характеристика древостоев и подроста на объектах исследования (описание выполнено в 2018 г.)

Древесная порода	Густота деревьев, экз. × 10 <sup>3</sup> /га		Средние показатели		Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> /га
	древостой	подрост	диаметр, см	высота, м	
Сосняк черничный (контроль)					
Сосна	1.01 ± 0.05*	–	18.5 ± 0.7	18.8 ± 0.3	29.6 ± 1.9
Ель	0.27 ± 0.04	3.85 ± 0.54	9.4 ± 0.3	9.7 ± 0.9/1.8 ± 0.1***	2.6 ± 0.4
Береза	0.17 ± 0.03	0.42 ± 0.06	11.6 ± 0.3	14.0 ± 1.3/3.1 ± 0.6	2.0 ± 0.3
Вырубка сосняка черничного					
Сосна	–	3.78 ± 1.00	но**	0.51 ± 0.07	но
Ель	Единично	1.09 ± 0.25	но	1.45 ± 0.16	но
Береза	Единично	1.21 ± 0.39	но	0.72 ± 0.07	но

\* ± стандартная ошибка среднего.

\*\* Не определяли.

\*\*\* Древостой/подрост (к древостою относили деревья с диаметром на высоте 1.3 м более 6 см).

с почвенной камерой 20 см, устанавливаемой на стационарные пластиковые основания. Пластиковое основание высотой 10 см заглубили в лесную подстилку на 5 см. В сосняке черничном было установлено 5, на пасаках и волоках сплошной рубки – по 4 основания. Растения напочвенного покрова были удалены и срезались в случае повторного прорастания. Наблюдения проводили один-два раза в месяц в середине и конце месяца.

Температуру почвы на глубине 10 см определяли датчиком, входящим в комплектацию прибора, во время измерений эмиссии CO<sub>2</sub>, а ее непрерывный мониторинг вели автоматическими регистраторами НОВО U12 (Onset, США).

Характеристика погодных условий дана для метеостанции Сыктывкар, расположенной в 10 км, с использованием сведений из открытых источников ([https://gr5.ru/Погода\\_в\\_Сыктывкаре](https://gr5.ru/Погода_в_Сыктывкаре)).

Традиционно для оценки взаимосвязи между  $R_s$  и температурой почвы применяются линейные и экспоненциальные уравнения. Использовали линейное уравнение вида:

$$\ln R_s = \alpha X + \beta, \quad (1)$$

где  $\ln R_s$  – логарифмированные данные по дыханию почвы,  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты уравнения,  $X$  – температура почвы на глубине 10 см.

Перед регрессионным анализом исходные данные по дыханию почвы были прологарифмированы для достижения нормальности распределения остатков линейной модели и однородности дисперсий ошибок линейной модели.

Коэффициент  $\alpha$  уравнения 1 применяли для расчета температурного коэффициента  $Q_{10}$ , показывающего изменение скорости  $R_s$  при изменении температуры на 10°C, и рассчитывали по уравнению (Davidson et al., 2006):

$$Q_{10} = e^{\alpha \times 10}, \quad (2)$$

где  $Q_{10}$  – температурный коэффициент,  $e$  – значенные экспоненты,  $\alpha$  – коэффициент уравнения 1.

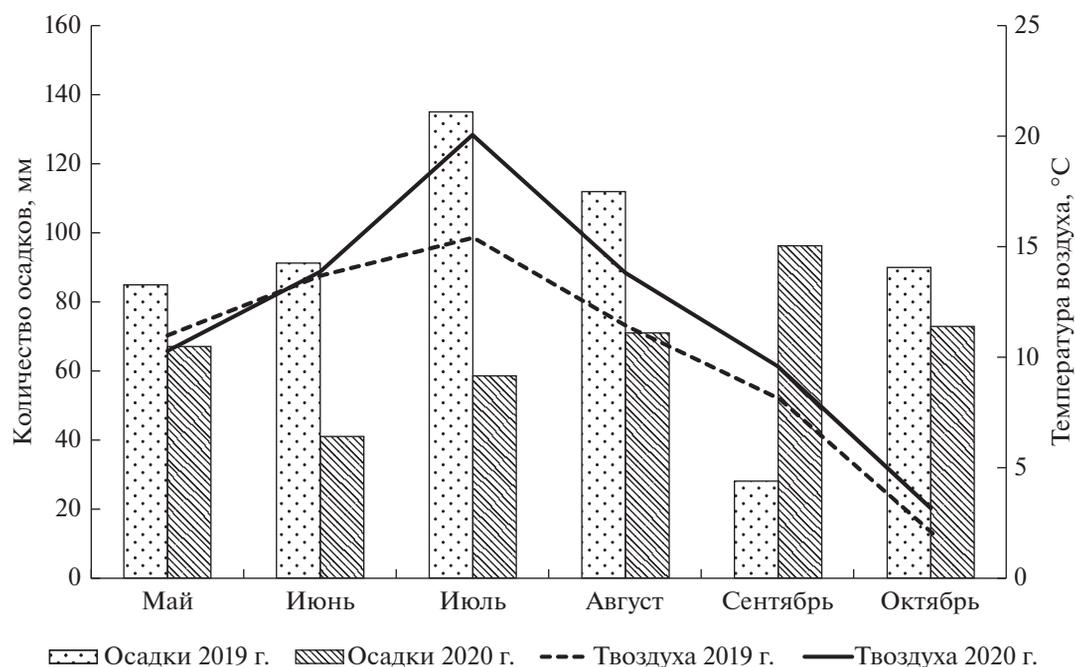
Расчет выноса углерода с эмиссией CO<sub>2</sub> с поверхности почвы (C–CO<sub>2</sub>) проводили по среднесуточным значениям температуры почвы, измеренным автономными регистраторами, используя уравнение 3:

$$RS_{\text{period}} = \sum_{n=1}^n R_{10} Q_{10}^{\frac{T-10}{10}},$$

где  $RS_{\text{period}}$  – вынос C–CO<sub>2</sub> за временной интервал, г См<sup>2</sup>,  $R_{10}$  – величина  $R_s$  при температуре 10°C,  $Q_{10}$  – температурный коэффициент,  $T$  – среднесуточная температура почвы на глубине 10 см.

Оценку C–CO<sub>2</sub> выполняли для трех временных интервалов: лето (июнь–август), вегетационный период (май–сентябрь) и бесснежный период (май–октябрь).

Для статистической обработки полученных данных использовались Microsoft Excel 2010 и R 4.03 (R Core Team, 2020). Рассчитывались средние значения и их ошибки. Нормальность распределения исходных данных и остатков линейных моделей регрессии проверяли методом Шапиро-Уилка. В случае нормального распределения парные сравнения проводили при помощи t-теста ( $p_t$ ), а множественные попарные – при помощи критерия Тьюки. Непараметрические аналоги (критерий Уилкоксона–Манна–Уитни ( $p_w$ ) и тест Дана ( $p_D$ )) применяли при отличии распределения от нормального соответственно для парных и множественных парных сравнений. Дисперсионный анализ (ANOVA или критерий Краскела–Уоллиса в зависимости от нормальности распределения и однородности дисперсий исходных данных) проводили для оценки различий  $R_s$  между объектами исследований (контроль, пасека, волок) и сред-



**Рис. 1.** Количество поступающих осадков (Осадки, мм) и температура воздуха (Т воздуха, °C) по данным метеостанции Сыктывкар в годы исследований ([https://tr5.ru/Погода\\_в\\_Сыктывкаре](https://tr5.ru/Погода_в_Сыктывкаре)).

немесячными значениями. Статистический анализ выполнен при 95% уровне значимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Погодные условия в годы наблюдений.** Сочетание относительно высокой температуры воздуха и меньшего количества осадков наблюдалось в течение практически всего бесснежного периода 2020 г. (рис. 1). Средняя температура воздуха с мая по октябрь 2019 г. составила 10.2°C, количество осадков – 540 мм, тогда как в 2020 г. – соответственно 11.8°C и 405 мм. Vegetационный период (май–сентябрь) 2019 г. холоднее на 0.3°C по сравнению со среднестатистическим годом, а в 2020 г. теплее на 1.3°C. Поступление осадков в исследуемые вегетационные периоды превышало климатическую норму в 1.4 раза в 2019 г. (450 мм) и было сопоставимо с ней в 2020 г. (333 мм). В целом сумма среднесуточных температур выше 5 и 10°C в 2020 г. превышала аналогичные результаты в 2019 г. в 1.2 раза, а количество осадков в эти дни в 2020 г. было в 1.6 раза меньше.

**Динамика температуры почвы.** Прогрев почвы сплошной вырубке после таяния снега происходит интенсивнее, чем в контрольном сосняке черничном (рис. 2). Так, к началу мая температура почвы на глубине 10 см на сплошной вырубке была в 1.2–1.6 раза выше, чем в контрольном сосняке черничном. На вырубке также отмечены более высокие максимальные значения температуры 14.3–16.2°C и 11.8–12.8°C в сосняке чернич-

ном. Средняя температура почвы в течение бесснежного периода на сплошной вырубке составила 9.1 и 10.1°C, в период вегетации – 9.9 и 10.9°C, в течение летних месяцев – 11.3 и 12.5°C в 2019 и 2020 гг. соответственно. В фоновом сосняке эти показатели для исследуемых временных интервалов были ниже ( $p_w < 0.05$ ) и составили 7.7–8.6°C, 8.1–9.1°C и 9.4–10.4°C с большими значениями в 2020 г. ( $p_w < 0.05$ ). Отсутствие дровяного полога способствует быстрому остыванию поверхности сплошной вырубке сосняка черничного, которое к концу октября составило 2.2 и 4.4°C в 2019 и 2020 гг. соответственно, тогда как в контрольном сосняке черничном оказалось в 1.1–1.6 раза выше.

**Сезонная динамика эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы.** Кривая хода сезонной динамики эмиссии CO<sub>2</sub> в годы исследований в сосняке черничном имела схожие черты (табл. 2). Она характеризовалась постепенным повышением в 1.9–3.5 раза с мая до 3.0–3.2 г См<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> в июле с последующим снижением к октябрю в 2.2–2.9 раза. В 2020 г. скорость среднемесячных потоков была выше, чем в 2019 г. в 1.3–1.9 раза ( $p_D < 0.05$ ), за исключением июля, когда межгодовые величины дыхания почвы достоверно не различались ( $p_D = 0.403$ ). В результате сплошной рубки сосняка черничного общие закономерности сезонной динамики эмиссии CO<sub>2</sub> не изменились для пасечных участков, тогда как для волоков они не всегда соблюдались. Так, в 2019 г. скорость эмиссии диоксида уг-

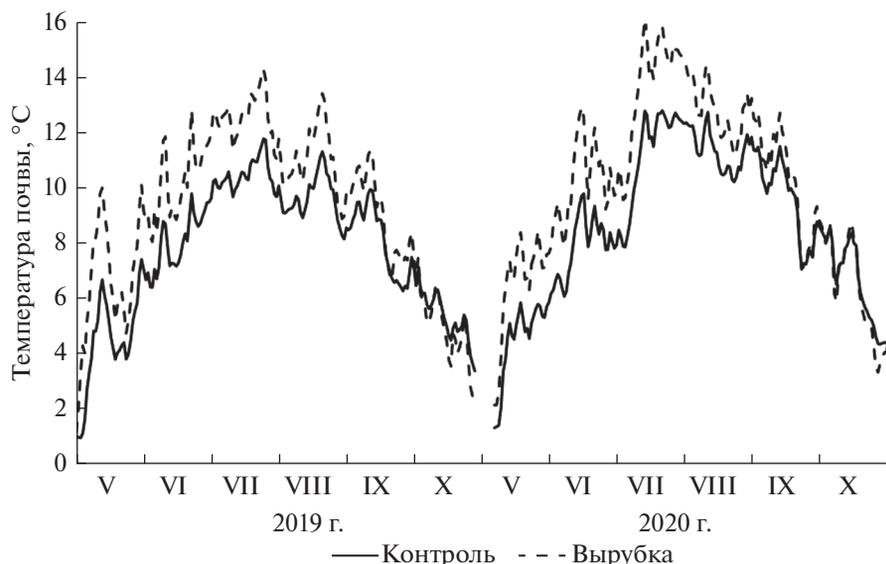


Рис. 2. Динамика температуры почвы на глубине 10 см в течение бесснежного периода.

лерода с поверхности волоков в летние месяцы изменялась в пределах  $2.1\text{--}2.3 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$  и не отличалась между месяцами ( $p_D > 0.05$ ), тогда как в 2020 г. ход сезонной динамики дыхания почвы был схож с сосняком черничным и пасечными участками. Следует также отметить, что на волоках вырубки не выявлены межгодовые различия в величине среднемесячной эмиссии  $\text{CO}_2$ , за исключением сентября. Скорость потока диоксида углерода с поверхности почвы пасечных участков в июле, сентябре и октябре не различалась между годами исследований, тогда как в мае, июне и августе 2020 г. отмечены более высокие (в 1.3–1.8 раза) его значения.

Исследования, проведенные ранее в лесных экосистемах таежной зоны, показали, что кривая сезонной динамики эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы совпадает с ходом прогрева почвы. Такие же закономерности были выявлены нами ранее для среднетаежных сосняков черничного (Осипов, 2015) и бруснично-лишайникового (Osipov, 2018). Сходные результаты по изменению дыхания почвы в течение вегетации приводятся для южнотаежных ненарушенных сообществ Д.В. Карелиным с соавт. (2014), Д. Ivanov с соавт. (2020) и I.N. Kurganova с соавт. (2020). Следует отметить, что абсолютные величины эмиссии  $\text{CO}_2$  в южнотаежных сообществах были в 2–4 раза выше по сравнению с данными для среднетаежных сосняков. В связи с тем, что дыхание подземных органов растений является составной частью потока диоксида углерода с поверхности почвы (Кузюков, 2006), максимальное развитие которых приходится на конец июля — начало августа, то этот фактор также оказывает значимое влияние на величину  $R_s$  в те-

чение сезона (Карелин и др., 2014). Сплошные и выборочные рубки не изменяли направленность динамики выделения  $\text{CO}_2$  с поверхности почв как хвойных, так и смешанных лесов в условиях Московской области (Molchanov et al., 2017), Словении (Šater et al., 2021) и Канады (Shabaga et al. 2015), однако интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почв исследованных пострубочных сообществ увеличивалась в 1.5–2.2 раза по сравнению с ненарушенными экосистемами.

**Влияние сплошной рубки и технологического элемента вырубки на эмиссию  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы.** Результаты дисперсионного анализ показали, что на вырубке происходят изменения в эмиссии  $\text{CO}_2$  (табл. 2) во все периоды наблюдения, за исключением мая 2019 г. В связи с тем, что этот анализ не показывает, между какими элементами существуют различия, нами были проведены попарные сравнения. Выявлено, что интенсивность эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности пасечных участков вырубки сосняка в мае 2019 и 2020 гг. не отличается от выделения  $\text{CO}_2$  из почвы сосняка черничного ( $p_D > 0.05$ ), однако в остальные месяцы она достоверно ниже в 1.1–1.7 раза ( $p_D < 0.05$ ). Более высокая разница в потоках диоксида углерода между сосняком и пасечными участками отмечается в октябре, меньшая — в августе, что, вероятно, связано с особенностями температурного режима (более быстрое прогревание и остывание) верхних слоев почвы на вырубке (рис. 2). Сопоставление дыхания почвы фонового сосняка и волоков сплошной вырубки показало, что в 2019 г. различий данного показателя в июне, августе и сентябре не выявлено ( $p_D > 0.05$ ), а в мае выделение диоксида углерода с поверхности волоков

**Таблица 2.** Среднемесячные значения интенсивности потока CO<sub>2</sub> (г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>) и оценка эффекта сплошной рубки на дыхание почвы

Месяц	Контроль <sup>1</sup>	Вырубка сосняка		Влияние рубки и элементов вырубки <sup>2</sup>	Попарные сравнения <sup>3</sup>		
		пасека	волок		контроль–пасека	контроль–волок	пасека–волок
2019 г.							
Май	0.86 ± 0.02 <sup>4</sup>	0.85 ± 0.03	1.28 ± 0.13*	$\chi^2 = 12.98, p = 0.002$	0.232	0.002	0.000
Июнь	1.81 ± 0.07*	1.13 ± 0.09	2.08 ± 0.28*	$\chi^2 = 20.46, p = 0.000$	0.000	0.240	0.001
Июль	3.01 ± 0.15	2.26 ± 0.05*	2.27 ± 0.06*	$\chi^2 = 13.71, p = 0.001$	0.001	0.001	0.409
Август	2.20 ± 0.07	1.54 ± 0.04	2.22 ± 0.15*	$\chi^2 = 35.99, p = 0.000$	0.000	0.039	0.000
Сентябрь	1.51 ± 0.07	1.07 ± 0.08*	1.56 ± 0.12	$\chi^2 = 13.15, p = 0.001$	0.000	0.352	0.002
Октябрь	1.05 ± 0.05	0.61 ± 0.03*	0.87 ± 0.07*	$\chi^2 = 35.29, p = 0.000$	0.000	0.011	0.001
2020 г.							
Май	1.64 ± 0.21	1.30 ± 0.14	1.39 ± 0.05*	$F = 2.35, p = 0.131$	0.087	0.208	0.844
Июнь	2.58 ± 0.47	1.52 ± 0.07	1.92 ± 0.16*	$\chi^2 = 17.53, p = 0.000$	0.000	0.006	0.043
Июль	3.14 ± 0.15*	2.16 ± 0.23*	2.04 ± 0.15*	$\chi^2 = 22.31, p = 0.000$	0.000	0.000	0.476
Август	3.11 ± 0.05	2.74 ± 0.07	2.40 ± 0.12*	$\chi^2 = 28.04, p = 0.000$	0.001	0.000	0.010
Сентябрь	1.93 ± 0.08	1.32 ± 0.06*	1.19 ± 0.07	$\chi^2 = 41.78, p = 0.000$	0.000	0.000	0.144
Октябрь	1.45 ± 0.03	0.84 ± 0.03*	0.93 ± 0.07*	$\chi^2 = 44.27, p = 0.000$	0.000	0.000	0.292

<sup>1</sup> – контрольный сосняк черничный;

<sup>2</sup> – результат дисперсионного анализа: в случае использования критерия Краскела–Уоллиса приведено значение  $\chi^2$ , для ANOVA – значение F;

<sup>3</sup> – приведены значения p-value (для мая 2020 г. – тест Тьюки, в остальных случаях – тест Данна);

<sup>4</sup> – среднее ± стандартная ошибка.

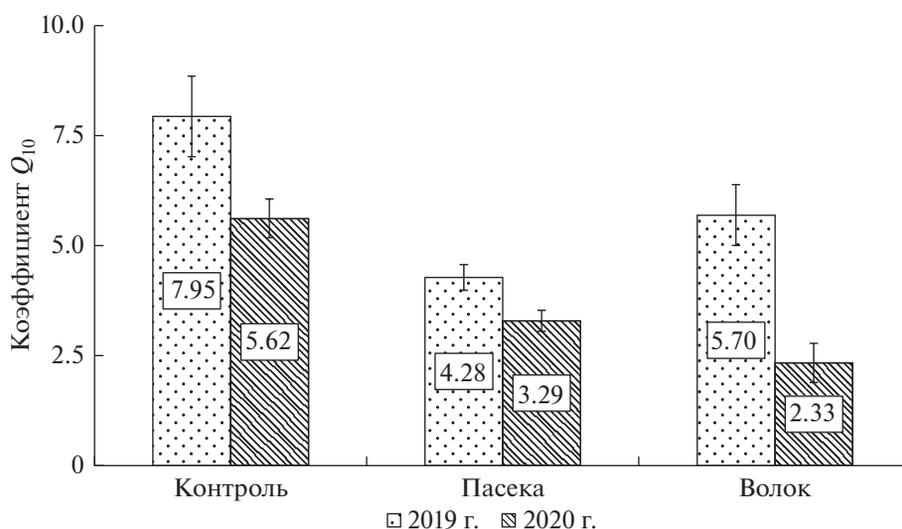
\* Отсутствует достоверная межгодовая вариация величины среднемесячного потока CO<sub>2</sub>.

происходило в 1.5 раза активнее ( $p_D = 0.002$ ), чем в сосняке черничном. В 2020 г., напротив, эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности почвы сосняка черничного превышала аналогичные среднемесячные показатели с поверхности волоков вырубки в 1.2–1.6 раза ( $p_D < 0.05$ ).

Сопоставление интенсивности эмиссии CO<sub>2</sub> между технологическими элементами вырубки показало, что в 2019 г. скорость дыхания почвы с поверхности волоков была в 1.4–1.8 раза выше ( $p_D < 0.05$ ), чем с поверхности пасечных участков во все периоды исследований, за исключением июля, когда они были сопоставимы (2.26–2.27 г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>). В течение 2020 г. достоверные различия в выделении диоксида углерода наблюдались в июне (на волоках в 1.3 раза выше,  $p_D = 0.043$ ) и августе (на волоках в 1.14 раз ниже, чем на пасечных участках,  $p_D = 0.010$ ), тогда как в остальные месяцы потоки CO<sub>2</sub> с поверхности почвы волоков и пасек были сопоставимы ( $p_D > 0.05$ ). Различная реакция дыхания почвы волоков в годы исследования, вероятно, определяется разложением порубочных остатков, которые были сложены на них с целью укрепления грунта. Известно, что основными деструкторами древе-

сины в бореальной зоне являются различные виды микроскопических грибов, которые чувствительны к влажности субстрата (Cornwell et al., 2009; Стороженко, 2016). Видимо, относительно влажный 2019 г. характеризовался более благоприятными условиями для их жизнедеятельности, что привело к усилению потока диоксида углерода с поверхности волоков. Однако повышенное количество осадков в 2019 г. вызвало снижение величин среднемесячной эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы сосняка черничного, в результате чего она была сопоставима с выделением диоксида углерода с поверхности волоков вырубки. Как отмечается в ряде исследований (Kudeyarov, Kurganova, 2005; Осипов, 2015; Bobrik et al., 2020; Ivanov et al., 2020), увеличение влажности почвы отрицательно сказывается на скорости потока CO<sub>2</sub> с поверхности почв таежных лесов, произрастающих в условиях переувлажнения.

**Взаимосвязь эмиссии CO<sub>2</sub> и температуры почвы.** Регрессионный анализ показал значимую ( $p < 0.05$ ) положительную взаимосвязь дыхания почвы от ее температуры как с поверхности почвы сосняка, так и отдельных технологических элементов вырубки сосняка во все периоды исследований (табл. 3). Коэффициенты аппроксими-



**Рис. 3.** Температурный коэффициент  $Q_{10}$  в годы исследований. Подпись на диаграмме – значение  $Q_{10}$ . Планки погрешностей – стандартная ошибка.

мации тренда линейных уравнений, рассчитанных для фонового сосняка и пасечных участков, были сопоставимы ( $R^2 = 0.60–0.73$ ). Технологические элементы вырубki (пасека и пасечный волок) сходным образом реагировали на изменение погодных условий. Так, в более влажный 2019 г. корреляция эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы с ее температурой была выше ( $R^2 = 0.67–0.72$ ) по сравнению с более теплым 2020 г. ( $R^2 = 0.35–0.60$ ). Реакция дыхания почвы фонового сосняка черничного на изменение температурного режима была обратная: увеличение  $R^2$  от 0.60 до 0.73 в более теплый год.

Температурный коэффициент  $Q_{10}$  в годы исследований различался (рис. 3). Так, в более влажный 2019 г. наблюдалась более выраженная (выше в 1.3–2.4 раза) реакция эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы при изменении ее температуры на  $10^\circ\text{C}$  на всех объектах исследования. Большой контраст между годами наблюдался на волоках, что, вероятно, связано с реакцией деструкторов древесины на уменьшение влажности субстрата в год с меньшим количеством осадков и более высокой температурой воздуха (рис. 1). Как отмечено в ряде работ, величина температурного коэффициента уменьшается при снижении влажности почвы лесных сообществ, что не подтверждается нашими данными (Davidson et al., 2006; Shabaga et al., 2015; Kurganova et al., 2020). Это, возможно, обусловлено особенностями увлажнения почв. Переувлажнение лесных почв на севере лимитирует процессы деструкции органического вещества и жизнедеятельность корней растений, важных участников процесса дыхания почв, тогда как температура почвы является ведущим фактором, определяющим интенсивность выделения диоксида углерода

(Kudeyarov, Kurganova, 2005). Ранее нами (Осипов, 2015; Osipov, 2018) было отмечено, что снижение содержания влаги в верхних почвенных горизонтах среднетаежных сосняков положительно влияет на скорость эмиссии  $\text{CO}_2$  и снижает значение температурного коэффициента  $Q_{10}$ . Такие же закономерности о влиянии влажности на поток диоксида углерода с поверхности почвы получены в ходе многолетних наблюдений в лиственных лесах Сибири (Masyagina et al., 2021).

Следует отметить, что реакция дыхания почв отдельных технологических элементов вырубki сосняка черничного на изменение температуры почвы на  $10^\circ\text{C}$  имеет сходные тенденции с ненарушенными насаждениями сосняков на севере таежной зоны. Однако этот отклик менее выражен (ниже в 1.7–2.4 раза) по сравнению с контрольным сосняком черничным, что, вероятно, определяется снижением дыхания корней деревьев древостоя и связанных с ними микробных сообществ, вносящих свой вклад в эмиссию  $\text{CO}_2$ .

**Таблица 3.** Параметры уравнений ( $R_s = \alpha T_s + \beta$ ) зависимости эмиссии  $\text{CO}_2$  ( $R_s$ ,  $\text{г С м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ ) от температуры почвы ( $T_s$ ,  $^\circ\text{C}$ ) на глубине 10 см ( $p < 0.001$  во всех случаях)

Объект (год наблюдения)	Коэффициенты уравнения		$R^2$
	$\alpha$	$\beta$	
Контроль (2019)	0.2073	–1.2890	0.60
Контроль (2020)	0.1727	–0.9106	0.73
Пасека (2019)	0.1454	–1.4344	0.72
Пасека (2020)	0.1192	–0.9337	0.60
Волок (2019)	0.1740	–1.2781	0.67
Волок (2020)	0.0848	–0.5084	0.35

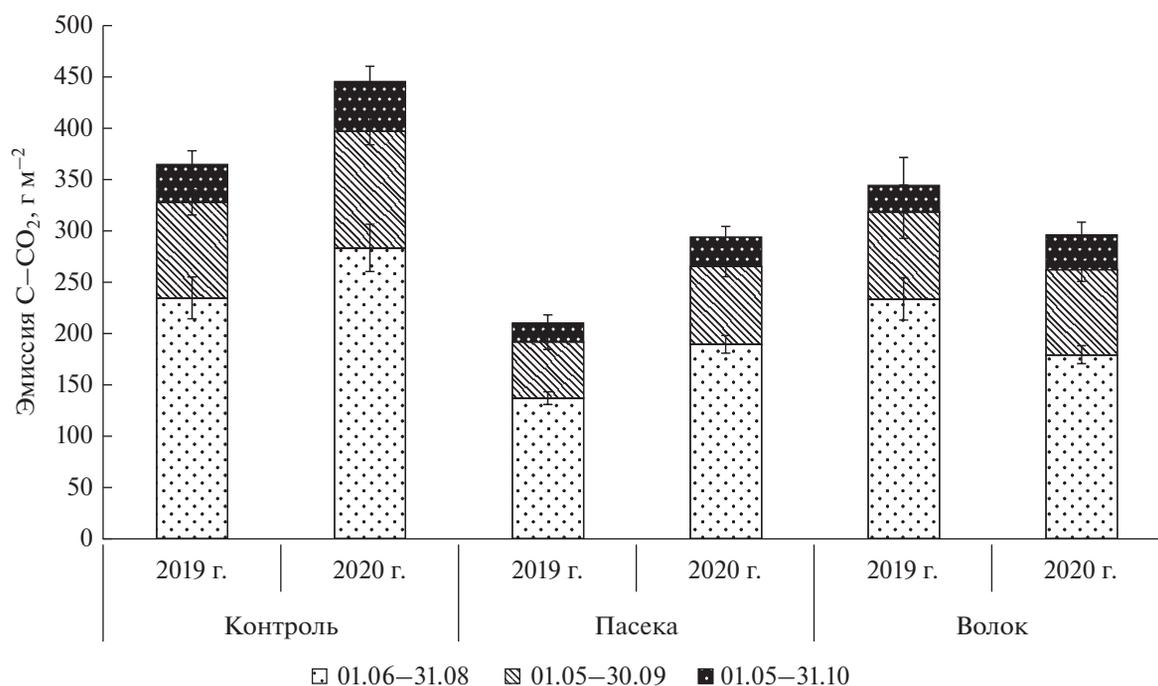


Рис. 4. Расчет выноса углерода с эмиссией  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы контрольного сосняка черничного и технологических элементов вырубki сосняка черничного.

**Вынос углерода с эмиссией  $\text{CO}_2$  с поверхности почв.** С поверхности почвы контрольного сосняка черничного в течение исследуемых бесснежных периодов в процессе дыхания почвы выделилось  $365\text{--}445 \text{ г С м}^{-2}$ , а более высокая величина отмечена в 2020 г. ( $p_t = 0.003$ ) (рис. 4). Вегетационный период и летние месяцы 2020 г. характеризовались более активными потерями углерода, превышая оценки эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы 2019 г. в 1.2 раза ( $p_t = 0.005$  и  $p_t = 0.007$  соответственно).

На пасечных участках вырубki сосняка черничного отмечаются сходные тенденции в интенсивности поступления углерода в атмосферу в отдельные годы исследований. Так, в 2020 г. поток  $\text{С-СО}_2$  с поверхности почвы был выше в 1.4 раза по сравнению с 2019 г. во все оцениваемые периоды ( $p_t < 0.05$ ). На волоках сплошной вырубki достоверных различий в выносе углерода с дыханием почвы между годами исследования не выявлено для всех временных интервалов ( $p_t > 0.05$  во всех случаях). Ранее (Osipov, 2018) показано, что погодные условия вегетационных периодов оказывают значимое влияние на величины выноса  $\text{С-СО}_2$  с поверхности почвы сосняков. Как отмечено выше, относительно благоприятный режим температуры воздуха в сочетании с меньшим количеством осадков в 2020 г. привел к более высоким среднемесячным значениям эмиссии  $\text{CO}_2$ , что, в свою очередь, увеличило вынос углерода с

поверхности почвы сосняка черничного и пасечных участков вырубki. Это привело к незначительному снижению потока  $\text{С-СО}_2$  с поверхности почвы волоков.

В результате сплошной рубки сосняка черничного отмечается снижение в 1.5–1.7 раза эмиссии  $\text{С-СО}_2$  с поверхности пасечных участков как в отдельные годы, так и в исследуемые периоды ( $p_t < 0.001$  во всех случаях). Вынос углерода с дыханием почвы с поверхности волоков в 2019 г. был сопоставим с сосняком черничным ( $p_t > 0.05$  для всех анализируемых периодов), тогда как в 2020 г. он был в 1.5–1.6 раза ниже ( $p_t = 0.001$  для всех анализируемых периодов), чем в контрольном сосняке черничном. Сравнение величины потерь  $\text{С-СО}_2$  с поверхности отдельных технологических элементов вырубki показало, что в 2019 г. процессы потока  $\text{С-СО}_2$  происходили интенсивнее на волоке ( $p_t < 0.05$  для всех периодов расчета), тогда как в 2020 г. они были сопоставимы ( $p_t > 0.05$  для всех периодов расчета). Мы считаем, что снижение выноса углерода с дыханием почвы на пасечных участках вырубki связано, возможно, с прекращением жизнедеятельности корней древесных растений и ассоциированных с ними микробных сообществ. Согласно обзору, проведенному Р.Д. Hanson с соавт. (2000), в сосняках доля автотрофного дыхания в общем потоке  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы изменяется от 44 до 90%, а одним из методов его определения является уда-

ление подземных органов. Следовательно, можно предположить, что эмиссия С—СО<sub>2</sub> с поверхности пасечных участков вырубки практически полностью сформирована гетеротрофным дыханием, учитывая небольшую массу оставшихся на вырубке деревьев, растений подроста и живого напочвенного покрова, а вклад гетеротрофного дыхания в общем выносе С—СО<sub>2</sub> с поверхности почвы контрольного сосняка черничного составляет 58–62%. Для лесной зоны России оценки вклада автотрофного дыхания в общий поток диоксида углерода из почвы разнятся от 7 до 56% в зависимости от типа почвы (Yevdokimov et al., 2010; Goncharova et al., 2019). Полученные результаты вполне сопоставимы с полученными нами данными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях Республики Коми с поверхности почвы среднетаежного сосняка черничного с эмиссией СО<sub>2</sub> в течение бесснежного периода выделяется 365–445 г С м<sup>-2</sup>, что определяется погодными условиями. Отмечается значимая положительная взаимосвязь температуры и дыхания почвы, которая увеличивается в более прохладный и влажный год. Сплошная рубка оказывает существенное влияние на почвенное дыхание среднетаежного сосняка черничного, которое выражается как в снижении скорости потока СО<sub>2</sub> в отдельные месяцы (в 1.1–1.7 раза), так и в выносе углерода с поверхности почвы (в 1.5–1.7 раза) пасечных участков в течение бесснежного периода. Полагаем, что на севере boreальной зоны снижение дыхания почвы на пасечных участках после рубки сосняка вызвано прекращением дыхания корней деревьев и связанных с ними микробных комплексов. Вынос углерода с дыханием почвы с поверхности волоков характеризуется как сопоставимыми с контрольным сосняком черничным величинами в год с более интенсивным выпадением осадков, так и близкими с пасечными участками значениями в более теплый и сухой год. Следовательно, при определении бюджета углерода на рубках необходимо учитывать оценку дыхания почв в отдельных ее технологических элементах (пасечные участки и волока).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Республики Коми / Отв. ред. Е.В. Корниенко. М.: Феория, 2011. 448 с.

Государственный доклад “О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2019 г.” / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, ГБУ РК “Территориальный фонд информации Республики Коми”. Сыктывкар, 2020. 162 с.

Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 г. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.

Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л. Факторы пространственно-временной изменчивости потоков СО<sub>2</sub> из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.

Лукина Н.В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник Российской академии наук. 2020. № 6. С. 528–532.

Осинов А.Ф. Эмиссия диоксида углерода с поверхности почвы спелого сосняка черничного в средней тайге Республики Коми // Лесоведение. 2015. № 5. С. 356–366.

Стороженко В.Г. Участие дереворазрушающих грибов в процессах деструкции и формирования лесных сообществ // Хвойные boreальной зоны. 2016. Т. 34. № 1–2. С. 87–91.

Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Makarov M.I., Timofeeva M.V. Spatial distribution of the components of carbon cycle in soils of forest ecosystems of the northern, middle, and southern taiga of western Siberia // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. № 11. P. 1549–1560.

Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. 2015. V. 128. P. 24–30.

Čater M., Darenova E., Simončič P. Harvesting intensity and tree species affect soil respiration in uneven-aged Dinaric forest stands // Forest Ecology and Management. 2021. V. 480. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638>

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepashchenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. № 3. P. 325–336.

Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Allison S.D., Bauhus J., Eggleton P., Preston C.M., Scarff F., Weedon J.T., Wirth C., Zanne A.E. Plant traits and wood fates across the globe: rotted, burned, or consumed? // Global Change Biology. 2009. V. 15. № 10. P. 2431–2449.

Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub> // Global Change Biology. 2006. V. 12. № 2. P. 154–164.

Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: A review // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. № 7. P. 780–790.

Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity // Environmental Development. 2018. V. 26. P. 68–75.

Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R. Assessment of the contribution of root and microbial respiration to the total efflux of CO<sub>2</sub> from peat soils and podzols in the North of Western Siberia by the method of component integration // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. № 2. P. 206–217.

Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation // Biogeochemistry. 2000. V. 48. № 1. P. 115–146.

[https://rp5.ru/Погода\\_в\\_Сыктывкаре](https://rp5.ru/Погода_в_Сыктывкаре) (дата обращения 29.10.2021)

Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J. Soil respiration in paludified forests of European Russia // *J. Forestry Research*. 2020. V. 31. № 5. P. 1939–1948.

Kudryakov V.N., Kurganova I.N. Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates // *Eurasian Soil Science*. 2005. V. 38. № 9. P. 983–992.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudryakov V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 53. № 10. P. 1421–1436.

Kuz'yakov Y. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods // *Soil Biology and Biochemistry*. 2006. V. 38. № 3. P. 425–448.

Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO<sub>2</sub> exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the southern taiga // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. V. 265. P. 252–268.

Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Menyailo O.V., Mori S., Koike T., Prokushkin S.G. Age-dependent changes in soil respiration and associated parameters in Siberian permafrost Larch stands affected by wildfire // *Forests*. 2021. V. 12. № 1. P. 1–25.

<https://doi.org/10.3390/f12010107>

Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // *Forest Ecology and Management*. 2020. V. 466. P. 118127.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>

Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of clear-cutting on soil CO<sub>2</sub> emission // *Biology Bulletin*. 2017. V. 44. № 2. P. 218–223.

Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J., Luyssaert S. Europe's forest management did not mitigate climate warming // *Science*. 2016. V. 351. P. 597–600.

Osipov A.F. Effect of interannual difference in weather conditions of the growing season on the CO<sub>2</sub> emission from the soil surface in the middle-taiga cowberry–lichen pine forest (Komi Republic) // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. № 12. P. 1419–1426.

Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. V. 333. № 6045. P. 988–993

Pukkala T. Carbon forestry is surprising // *Forest Ecosystems*. 2018. V. 5. № 1. P. 11.

<https://doi.org/10.1186/s40663-018-0131-5>

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. P. 409. <https://www.R-project.org/> (дата обращения 29.10.2021)

Schaphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A. Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // *Forest Ecology and Management*. 2016. V. 361. P. 432–444.

Schepaschenko, D., Moltchanova, E., Fedorov, S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. № 1. 12825.

Shabaga J.A., Basiliko N., Caspersen J.P., Jones T.A. Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting // *Forest Ecology and Management*. 2015. V. 348. P. 208–219.

Yevdokimov I.V., Larionova A.A., Lopes de Gerenyu V.O., Schmitt M., Bahn M. Experimental assessment of the contribution of plant root respiration to the emission of carbon dioxide from the soil // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43. № 12. P. 1373–1381.

Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Grabovsky V.I., Shulyak P.P. The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests // *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. V. 6. № 7П. P. 714–726.

## Clear Cuttings Affecting the Soil Respiration of the Middle Taiga Blueberry Pine Forest in the Komi Republic

A. F. Osipov\*

*Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch of the RAS, Kommunisticheskaya st., 28, Syktyvkar, 167982 Russia*

\*E-mail: [osipov@ib.komisc.ru](mailto:osipov@ib.komisc.ru)

Human economic activity has a significant impact on carbon cycles in forest ecosystems. At present time investigations of the influence clear-cuts has on forest soils respiration ( $R_s$ ) are very scarce, which determines the relevance of this study. The aim of this work was to determine the influence of Scots pine forest clear-cuts on  $R_s$ , taking into account separate technological elements of clear-cut area. The positive relationship of  $R_s$  with soil temperature has been established, both in the undisturbed Scots pine forest and in the apiary plots and skidding tracks. The relationship strength between these parameters was higher in a year with less precipitation and higher air temperatures in pine forest. On the contrary, at the clear-cut area high correlation between  $R_s$  and soil temperature was observed in a year with more precipitation and lower air temperatures. The  $R_s$  intensity from apiary plot's soil surface was lower than on undisturbed pine forest both in separate months

and periods of investigation (summer, growing season, snowless period). The CO<sub>2</sub> emission from skidding tracks surface differed during the years of investigation. Relatively high *R<sub>s</sub>* rates that were close to undisturbed pine forest were observed in the more humid 2019. But in the drier 2020 *R<sub>s</sub>* of skidding tracks was lower in comparison to pine forest and similar to apiary. Consequently, due to a significant area (to 25%) occupied by skidding tracks when modern timber harvesters are used, it is necessary to take into account roles of separate technological elements during carbon budget estimation on clear-cut areas.

*Keywords:* soil respiration, clear-cuts, apiary, pine forest, middle taiga, skidding track.

**Acknowledgements:** This study was performed under the state budget theme assignment to the Institute of Biology, Komi Science Center, on the theme “Zonal regularities in the dynamics of the structure and productivity of primary and anthropogenically modified phytocenoses of forest and bog ecosystems in the European North-East of Russia” (number of registration 1021051101417-8-1.6.19).

## REFERENCES

*Atlas Respubliki Komi* (Atlas of the Komi Republic), Moscow: Feoriya, 2011, 448 p.

Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Ryzhova I.M., Makarov M.I., Timofeeva M.V., Spatial distribution of the components of carbon cycle in soils of forest ecosystems of the northern, middle, and southern taiga of western Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, pp. 1549–1560.

Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G., Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux, *Global and Planetary Change*, 2015, Vol. 128, pp. 24–30.

Čater M., Darenova E., Simončič P., Harvesting intensity and tree species affect soil respiration in uneven-aged Dinaric forest stands, *Forest Ecology and Management*, 2021, Vol. 480, 118638.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118638>

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G., Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, pp. 325–336.

Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Allison S.D., Bauhus J., Eggleton P., Preston C.M., Scarff F., Weedon J.T., Wirth C., Zanne A.E., Plant traits and wood fates across the globe: rotted, burned, or consumed?, *Global Change Biology*, 2009, Vol. 15, pp. 2431–2449.

Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y., On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub>, *Global Change Biology*, 2006, Vol. 12, pp. 154–164.

Dymov A.A., The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: A review, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, pp. 780–790.

Evdokimov I.V., Larionova A.A., Lopes de Gerenyu V.O., Schmitt M., Bahn M., Experimental assessment of the contribution of plant root respiration to the emission of carbon dioxide from the soil, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, No. 12, pp. 1373–1381.

Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V., Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity, *Environmental Development*, 2018, Vol. 26, pp. 68–75.

Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R., Assessment of the contribution of root and microbial respiration to the total efflux of CO<sub>2</sub> from peat soils and podzols in the North of Western Siberia by the method of component integration, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, pp. 206–217.

*Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Komi v 2019 godu”* (State report “On the state of the environment of the Komi Republic in 2019”), Syktyvkar, Ministerstvo prirodnykh resursov i okhrany okruzhayushchei sredy Respubliki Komi, GBU RK “Territorial’nyi fond informatsii Respubliki Komi”, 2020, 162 p.

*Gosudarstvennyi doklad. O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2019 g.* (State report. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2019), Moscow: Minprirody Rossii; MGU imeni M.V. Lomonosova, 2020, 1000 p.

Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A., Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observation, *Biogeochemistry*, 2000, Vol. 48, pp. 115–146.

[https://rp5.ru/Pogoda\\_v\\_Syktyvkare](https://rp5.ru/Pogoda_v_Syktyvkare) (October 29, 2021)

Ivanov D., Tatarinov F., Kurbatova J., Soil respiration in paludified forests of European Russia, *J. Forestry Research*, 2020, Vol. 31, pp. 1939–1948.

Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Gitarskii M.L., Faktory prostranstvenno-vremennoi izmenchivosti potokov SO<sub>2</sub> iz pochv yuzhnotaezhnogo el’nika na Valdae (Spatiotemporal controls of soil CO<sub>2</sub> fluxes in south taiga spruce forest in European Russia), *Lesovedenie*, 2014, No. 4, pp. 56–66.

Kudeyarov V.N., Kurganova I.N., Respiration of Russian soils: database analysis, long-term monitoring, and general estimates, *Eurasian Soil Science*, 2005, Vol. 38, pp. 983–992.

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Saponov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N., Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-Terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, pp. 1421–1436.

Kuzyakov Y., Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods, *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, Vol. 38, pp. 425–448.

Lukina N.V., Global’nye vyzovy i lesnye ekosistemy (Global challenges and forest ecosystems), *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, No. 6, pp. 528–532.

Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A., Energy and CO<sub>2</sub> exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the southern taiga, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 265, pp. 252–268.

Masyagina O.V., Evgrafova S.Y., Menyailo O.V., Mori S., Koike T., Prokushkin S.G., Age-dependent changes in soil

- respiration and associated parameters in Siberian permafrost Larch stands affected by wildfire, *Forests*, 2021, Vol. 12, p. 107.  
<https://doi.org/10.3390/f12010107>
- Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J. Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L., Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis, *Forest Ecology and Management*, 2020, Vol. 466, 118127.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V., Effect of clear-cutting on soil CO<sub>2</sub> emission, *Biology Bulletin*, 2017, Vol. 44, pp. 218–223.
- Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J., Luyssaert S., Europe's forest management did not mitigate climate warming, *Science*, 2016, Vol. 351, pp. 597–600.
- Osipov A.F. Emissiya dioksida ugleroda s poverkhnosti pochvy spelogo sosnyaka chernichnogo v srednei taige Respubliki Komi (Carbon dioxide emission from the soil surface in mature bilberry pine forest in Middle Taiga of the Komi Republic), *Lesovedenie*, 2015, No 5, pp. 356–366.
- Osipov A.F., Effect of interannual difference in weather conditions of the growing season on the CO<sub>2</sub> emission from the soil surface in the middle-taiga cowberry–lichen pine forest (Komi Republic), *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, pp. 1419–1426.
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D., A large and persistent carbon sink in the world's forests, *Science*, 2011, Vol. 333, pp. 988–993
- Pukkala T., Carbon forestry is surprising, *Forest Ecosystems*, 2018, Vol. 5, p. 11.  
<https://doi.org/10.1186/s40663-018-0131-5>
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2020. <https://www.R-project.org/> (October 29, 2021)
- Schaphoff S., Reyer C.P.O., Schepaschenko D., Gerten D., Shvidenko A., Tamm Review: Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 361, pp. 432–444.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, p. 12825.
- Shabaga J.A., Basiliko N., Caspersen J.P., Jones T.A. Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 348, pp. 208–219.
- Storozhenko V.G., Uchastie derevorazrushayushchikh gribov v protsessakh destruktivnoy formirovaniya lesnykh soobshchestv (Participation of wood-destroying fungi in the processes of destruction and formation of forest communities), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2016, No 1–2, pp. 87–91.
- Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Grabovsky V.I., Shulyak P.P., The impacts of fires and clear-cuts on the carbon balance of Russian forests, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, pp. 714–726.

УДК 631.481;630\*114.351

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВ В КАТЕНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОГО ЗАПОВЕДНИКА<sup>1</sup>

© 2022 г. П. Р. Енчилик<sup>а</sup>, И. Н. Семенков<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

\*E-mail: [semenkov@geogr.msu.ru](mailto:semenkov@geogr.msu.ru)

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 13.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

В юго-восточной части Валдайской возвышенности исследован сопряженный ряд дерново-подзолистых и торфяно-подзолисто-глеевых почв. В торфяном (Т), органоминеральном (ао) и минеральном (ВТ) горизонтах изучена вариабельность физико-химических свойств (величины рН, содержания гранулометрических фракций и углерода органических веществ – Сор<sub>г</sub>) и элементного состава (валовое содержание и обменные, комплексные и специфически сорбированные формы As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn и Zr). Для показателей уровня “почва-память” (содержание Сор<sub>г</sub>, гранулометрических фракций и валового содержания химических элементов) и величины рН характерны низкие коэффициенты вариации (<30%) за исключением содержания крупного и среднего песка (>50%) и Сор<sub>г</sub> (>74%) в гор. ВТ. В гор. Т повышена вариабельность валового содержания Bi, Co, Cr, Fe, La, Mn, Rb, Sr, Ti, U, W и Zr. Содержание подвижных форм элементов – показатели уровня “почва-момент” – имеет высокую вариабельность. При этом, вариабельность содержания обменных и специфически сорбированных соединений всех изученных элементов снижается с глубиной, а комплексных меняется слабее. Подвижность химических элементов имеет низкую вариабельность, поскольку больший вклад в значение этого показателя вносят не подвижные соединения, а валовое содержание.

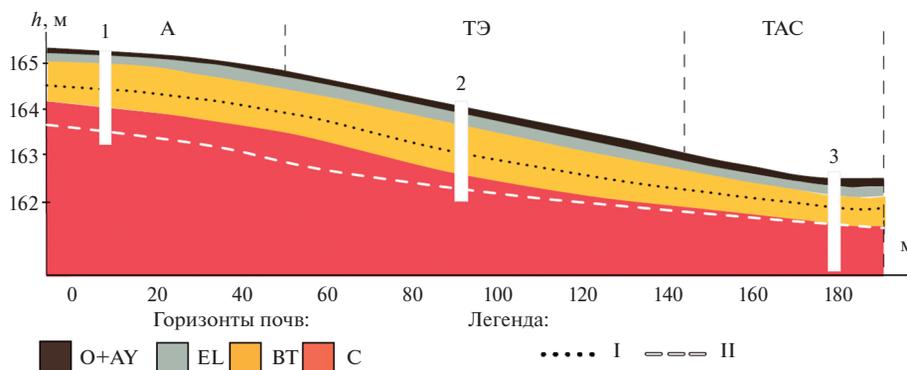
*Ключевые слова:* пространственная неоднородность, кислотность, фракционирование, тяжелые металлы и металлоиды, потенциально токсичные элементы, лесные экосистемы.

DOI: 10.31857/S0024114822030068

Пространственная вариабельность химических свойств почв и концентрации форм элементов – результат разномасштабных почвенных процессов. Память почвы (soil record) отражает запись результата этих процессов в различных характеристиках профиля (Соколов, Таргульян, 1976), т.е. соответствие между наблюдаемыми факторами почвообразования и свойствами почв (Таргульян, Бронникова, 2019). К показателям “почва-память” относят гранулометрический состав, валовое содержание химических элементов и органического углерода почв (Сор<sub>г</sub>), которые медленно трансформируются или наследуются от материнской породы (Соколов, Таргульян, 1976). К показателям “почва-момент” относят динамические свойства, связанные с существующими в данный момент условиями (Таргульян, Соколов, 1978).

С антропогенным фактором почвообразования связано поступление в почву разнообразных веществ. Если по валовому содержанию элементов часто сложно диагностировать воздействие, то отдельные индикаторные соединения чутко реагируют на изменения. Обменные соединения, которые можно обозначить F1, являются самыми подвижными и легко доступными для растений. Комплексные соединения (F2) представлены в почве прежде всего фульватами и гуматами и отражают интенсивность биологического круговорота веществ и разложения мертвого органического вещества. Сорбированные оксидами Fe и Mn соединения (F3) подвижны лишь в глеевой обстановке, т.к. в кислородной среде входят в состав железомарганцевых конкреций. Все эти три группы соединений принято называть подвижными (Соловьев, 1989, Семенков и др., 2016, 2017, Minkina et al., 2018), т.е. способными участвовать в физико-химической и биогенной миграции в противовес трудно растворимым соединениям многих первичных минералов (F4), находящимся в почве в форме силикатов и оксидов.

<sup>1</sup> Полевые и химико-аналитические работы выполнены при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”. Результаты обобщены в рамках проекта РНФ № 19-77-30004.



**Рис. 1.** Схематический профиль катены. Элементарные ландшафты: А – автономный, ТЭ – трансэлювиальный, ТАС – трансаккумулятивно-супераккумулятивный. Горизонты почв: О – органический, АУ – гумусовый, EL – элювиальный, BT – текстурный, С – почвообразующая порода. I – граница между покровными суглинками и моренными отложениями; II – верхняя граница вскипания от 10% HCl.

Оценка вариабельности почвенных свойств востребована при планировании и анализе результатов мониторинга (Авдеева, Фрид, 2000; Fraterrigo, Rusak, 2008; Козлова, 2009), а также характеристики степени загрязнения по небольшому числу проб. Если вариабельность агропочв и агрономических показателей изучена достаточно подробно, то природным почвам посвящены единичные исследования (Шапорина и др., 2018). Ранее исследована вариабельность физических свойств (плотности, влажности, водопроницаемости) и химических (величины pH, валового состава, содержания обменных катионов) в разных генетических горизонтах дерново-подзолистых почв (Самсонова, 2008, 2014). Однако сравнительный анализ вариабельности элементного состава почвенных горизонтов не проводили. Кроме того, до сих пор дискуссионны методы оценки вариабельности почвенных свойств.

Цель работы – характеристика уровня вариабельности физико-химических свойств и элементного состава горизонтов текстурно-дифференцированных почв в юго-восточной части Валдайской возвышенности. В рамках нашего исследования мы проверяли две гипотезы:

1. От гор. Т к гумусовому ао и текстурному BT вариабельность рассматриваемых показателей уменьшается за счет снижения неоднородности материала по мере ослабления педогенного преобразования;

2. Вариабельность показателей уровня “почва-память” ниже вариабельности показателей уровня “почва-момент”.

Настоящее исследование также востребовано в контексте эколого-геохимического мониторинга в Московском регионе, т.к. дает информацию о вариабельности свойств и элементного состава почв фоновых ландшафтов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проведено в Центральном-Лесном государственном природном биосферном за-

поведнике (ЦЛЗ), где почвообразующие породы обладают низкой водопроницаемостью (Пузаченко и др., 2007), что приводит к заболачиванию пониженных элементов рельефа и возникновению временных водотоков после сильных дождей даже в условиях слабого расчленения территории.

В южной части заповедной зоны ЦЛЗ исследована катена (рис. 1) от хорошо дренированной вершины холма с елово-липовым (*Picea abies* и *Tilia cordata*) лесом с примесью клена остролистного (*Acer platanoides*) и вяза шершавого (*Ulmus glabra*) (5E + 4Л + 1К, В) на (1) грубогумусированных подзолистых глееватых почвах (**Retisols** по (IUSS Working Group WRB, 2014) со следующим набором генетических горизонтов по классификации 2004 года: O–ao–AYEL–ELf–BEL–BT–2BTca–2BCg,ca–Cca. Выпуклый склон трансэлювиальной позиции также покрыт елово-липовым лесом с примесью клёна остролистного (5Л + 3Е + 1К), произрастающим на (2) дерново-подзолистых оглеенных почвах с горизонтами: O–ao–AYao–AYEL–ELf,g–BEL–BT–2BT(g)–2BC(g)–Cca. Трансаккумулятивно-супераккумулятивный ландшафт заболоченной потяжины с временным водотоком занят ельником с ивой козлей (*Salix caprea*) (8E + 2И, Л, К) на (3) торфянистых подзолистых оглеенных почвах (**Stagnosols**) со следующим набором горизонтов: T–EL–ELg–ELox–BELg–BT–2BTg–2G. Все почвы развиты на двучленных отложениях: покровных суглинках, подстилаемых моренными, местами остаточными карбонатными (Karavanova, Malinina, 2009; Пузаченко и др., 2007). Более детальное описание ландшафтов катены представлено в работе П.Р. Енчилик и др. (2020).

В девятикратной повторности в июне 2017 г. опробованы верхний горизонт (ao в дерново-подзолистых и T в торфяно-подзолисто-глеевых) и нижний (BT) в пределах площадок 10 м<sup>2</sup> (суммарно 54 пробы).

Величину рН измеряли в суспензии на рН-метре “Эксперт-рН” (Россия) в статических условиях, содержание Сорг – титриметрически по И.В. Тюрину, гранулометрический состав – на лазерном гранулометре “Analysette 22 comfort” (Fritsch, Германия) с выделением 7 гранулометрических фракций G1–G7, обозначенных в порядке увеличения размера частиц (в мкм): G1 – ил (<1); G2, G3 и G4 – мелкая, средняя и крупная пыль (5–1, 10–5 и 50–10 соответственно); G5, G6 и G7 – тонкий, средний и крупный песок (250–50, 500–250 и 1000–500). Подвижные соединения элементов извлечены по методике (Minkina et al., 2018) тремя параллельными вытяжками с инкубацией в течение 18 ч: ацетатно-аммонийный буфер (соотношение почва : раствор 1 : 5, рН 4.8), ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) с 1% трилоном Б (соотношение почва : раствор 1 : 5, рН 4.5) и 1 М HNO<sub>3</sub> (соотношение почва : раствор 1 : 10). Раствором ААБ экстрагированы обменные соединения (F1). Разница между содержанием элементов в вытяжке ААБ + 1% трилоном Б и ААБ характеризует долю комплексных соединений (F2). Разница в содержании элементов в 1 М HNO<sub>3</sub> и ААБ соответствует специфически сорбированным (связанным с оксидами Fe и Mn) соединениям (F3). Подвижность рассчитана как отношение суммы содержаний непрочно связанных соединений элемента (F1 + F2 + F3) к валовому. Содержание элементов в почвах и почвенных вытяжках измеряли методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS и ICP-AES) на приборах “Elan-6100” и “Optima-4300 DV” соответственно с двойной повторностью в 5% проб и анализом холостых проб экстрагентов. Для определения валового содержания элементов образцы почв разлагали путем кислотного вскрытия смесью HClO<sub>4</sub>, HF и HNO<sub>3</sub> в открытой системе (Карандашев и др., 2016).

Медианные значения показателей и значимость различий между выборками в гор. ао и ВТ рассчитаны с помощью Т-критерия Уилкоксона в программном пакете Statistica. Коэффициенты вариации (Cv, %), посчитанные в программном пакете Statistica, разделены на следующие градации: очень высокие (>80%), высокие (50–80%), средние (30–50%), низкие (10–30%), очень низкие (<10%). Соответствие (лог)нормальному распределению оценено с использованием критерия Уилка-Шапиро в программе “R” с использованием в качестве порогового уровня значимости  $p = 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Физико-химические характеристики и уровни содержания элементов.** Дерново-подзолистые и торфяно-подзолисто-глеевые почвы катены по гранулометрическому составу относятся к сугли-

нистым (табл. 1). Во всех почвах с глубиной значения рН увеличиваются, а содержание углерода органических веществ значительно уменьшается (табл. 1), что типично для почв таежной зоны.

В гор. ао изученных почв относительно гор. ВТ повышено валовое содержание Mn и Pb, понижено – Co, Cr, Cu, Fe, La, Mo, Ni, Rb, Sr, Ti, U, Zn, Zr. Гор. ао и Т значимо (табл. 1) обогащены обменными соединениями Pb, Rb, Sr, Zn, только гор. ао – As, Mn, Ti. В горизонте ао увеличивается содержание комплексных соединений Co, Mn, Pb, Zn, в Т-горизонте – содержание Pb и Zn.

В горизонте ВТ снижается содержание Co, Fe и Zr. Повышенные значения сорбированных гидроксидными Fe и Mn соединений обнаружены для Pb и Zn в горизонте ао (табл. 1) и Ti в горизонте ВТ потяжины, а пониженные – для Mn в торфе и Sr в горизонтах ВТ.

Высокая подвижность элементов наблюдается в верхних горизонтах почв. Наибольшей подвижностью (>50%) отличаются Bi, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, Zn; наименьшей (<10%) – Cr, Mo, Sb, W, Zr. К нижележащему минеральному гор. ВТ подвижность всех элементов, кроме W, уменьшается.

**Характер распределения значений изученных показателей.** В горизонтах почв междуречья и склонов нормально распределены показатель рН и содержание Сорг, большинства гранулометрических фракций и химических элементов. Их распределение сменяется на логнормальное в торфе за счет увеличения его неоднородности и более интенсивного накопления ряда веществ на латеральном биогеохимическом барьере. При этом в гор. ВТ почв потяжины сохраняется нормальность распределения рассматриваемых показателей.

Содержание обменных соединений большинства элементов в гор. ао и ВТ всех исследуемых ландшафтов имеет логнормальное распределение. Нормальное распределение во всех горизонтах наблюдается только у содержания Rb и Sr, в гор. ао и Т – у Cd и Pb, в гор. ВТ – у Fe и U.

Содержание комплексных соединений большинства элементов в гор. ао и Т по всей совокупности образцов имеет логнормальное распределение. Нормальное распределение свойственно только содержанию Bi и Pb. В гор. ВТ нормально распределено содержание комплексных соединений As, Cu, Fe, La, Mn, Ni, Zn, Zr. Для сорбированных гидроксидами Fe и Mn соединений характерна схожая ситуация.

Нормальное распределение имеют значения подвижности As, Cr, Cu, Ni во всех исследуемых горизонтах, Bi – в органоминеральных горизонтах, As, Cd, Co, Fe, La, Rb, Sr, U, Zn, Zr – в гор. ВТ.

**Уровни варибельности.** Содержание Сорг в почвах значительно снижается с глубиной вплоть

Таблица 1. Медианные значения и Св (%) химических свойств, содержания химических элементов в горизонтах почв

Позиция	Вся выборка				Автономный вершины холма				Трансэлювиальный склона холма				Трансаккумулятивно-супераккумулятивный потяжины			
	ао (n = 18)		ВТ (n = 27)		ао (n = 9)		ВТ (n = 9)		ао (n = 9)		ВТ (n = 9)		Т (n = 9)		ВТ (n = 9)	
	медиана	Св	медиана	Св	медиана	Св	медиана	Св	медиана	Св	медиана	Св	медиана	Св	медиана	Св
Гранулометрические фракции, %	0.4*	100	0*	—	0.1*	100	0*	—	0.4*	100	<0.1	—	—	—	<0.1	—
G7	6.3*	75	4*	100	6.4	92	4.6	100	6.3	60	12	51	—	—	0.1*	100
G5	37*	12	26	20	37	8	26	19	37	15	23	17	—	—	28	24
G4	38*	18	33*	37	40	13	29	15	38*	22	25*	22	—	—	55	8
G3	7	20	9.7*	32	8	14	10	14	7	24	10	12	—	—	5*	24
G2	8*	21	19*	42	8	16	21	16	8	26	20	13	—	—	7	19
G1	1.4	24	6.3*	32	1.4	17	6.9	12	1.3	31	6.3	9	—	—	3.1*	18
pH	5.2	9	5.3	9	5.1	9	4.8	8	5.4	8	5.8	5	—	—	5.1	5
Сорг, %	19	27	0.06	100	20	26	0.1	74	18	29	0.1	74	—	—	0.1*	100
Валовое содержание, мг/кг	2.2	29	2.7	23	2.3	30	2.5	21	2.1	30	3.1	18	—	—	2.6	28
As	0.3	37	0.2*	100	0.4	34	0.2*	100	0.3*	39	0.2*	100	—	—	0.1*	100
Bi	0.9	28	0.2*	25	1	29	0.2*	25	0.9	26	0.2	23	—	—	0.1	27
Cd	6.8	46	8.8	16	6.5	49	8.8	13	6.9	46	9	13	—	—	7.3	17
Co	21	14	42	20	20	12	43	11	21	14	45	14	—	—	30*	11
Cr	12*	20	20	14	11.7	25	21	8	12	13	22	10	—	—	17	11
Cu	5000	25	14800	15	4700	19	16100	9	6800	25	15600	9	—	—	12000	10
Fe	17	18	32	10	15	18	31	8	18	14	31	7	—	—	36	3
La	1400*	45	700*	25	1500	53	600	27	1300	18	800	25	—	—	800	22
Mn	0.7	25	0.4	26	0.8	22	0.4	12	0.6	17	0.4	18	—	—	0.3	23
Mo	10*	31	21	23	10.2	14	20.4	14	9.7*	42	24	17	—	—	15.1	20
Ni	38	24	15	7	44	26	16	8	36	14	15	8	—	—	15	4
Pb	44	20	74	10	44	18	80	5	48	21	77	7	—	—	65*	4
Rb	0.9	29	0.3*	79	1.1	25	0.3*	98	0.7	26	0.3	14	—	—	0.2	10
Sb	67*	18	99	12	66*	19	90	11	70	17	90	10	—	—	108	4
Sr	1950	23	3100	8	1700	22	3100*	8	2100*	21	2900	9	—	—	3100	7
Ti	1.3	14	1.7*	16	1.2	13	1.6	8	1.4	8	1.6	7	—	—	2.2	6
U	0.7	19	0.7	16	0.8	17	0.8	7	0.6	18	0.8	13	—	—	0.6	14
W	94*	27	56	26	99	28	66	11	83	21	56	17	—	—	38	10
Zn	230*	24	267*	27	209	25	260	7	244*	22	225	10	—	—	395	17
Zr													—	—		

Таблица 1. Продолжение

Позиция горизонт	Вся выборка						Автономный вершины холма						Трансэлювиальный склон холма						Трансаккумулятивно-супераккумулятивный потяжины						
	ao (n = 18)		VT (n = 27)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		ao (n = 9)		VT (n = 9)		
	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	
Обменные соединения, мг/кг	As	0.07*	100	<0.008	—	0.05	100	<0.008	—	0.08*	100	<0.008	—	0.08*	100	<0.008	—	0.08*	100	<0.008	—	<0.008	—	<0.008	—
	Bi	0.02*	35	<0.0001	—	0.02	31	<0.0001	—	0.02	39	<0.0001	—	0.02	39	<0.0001	—	0.02	39	<0.0001	—	0.02*	53	<0.0001	—
	Cd	0.5	34	0.01*	49	0.5	38	0.01*	49	0.5	31	0.01*	36	0.01*	36	0.01*	36	0.01*	36	0.01*	36	0.4	20	0.01	53
	Co	1.1*	100	0.02*	61	0.8*	100	0.03	50	1.4*	100	0.01*	35	0.01*	35	0.01*	35	0.01*	35	0.01*	35	0.6	37	0.02*	33
	Cr	<0.001	—	0.08*	52	<0.001	—	0.11	55	<0.001	—	<0.001	—	0.05*	60	0.06*	100	0.05*	60	0.06*	100	0.1	24	0.01	24
	Cu	0.3*	55	0.4*	44	0.3*	70	0.4*	48	0.3*	28	0.3*	24	0.3	24	0.3	24	0.3	24	0.3	24	0.4	45	0.5*	36
	Fe	18*	100	47	56	15*	100	49	43	19*	96	19*	24	24	68	55	87	24	68	55	87	67	35	67	35
	La	0.1*	100	3.3*	41	0.2*	100	5.7	36	0.1*	100	5.7	36	0.1*	26	0.4	44	2.7	26	0.4	44	3.1	11	3.1	11
	Mn	2131	45	7.2*	42	2164	53	7	32	2041	35	7	32	2041	35	6	98	6	24	6	98	8	42	8	42
	Ni	0.7*	52	0.5*	40	0.7	28	0.4*	44	0.4*	75	0.4*	40	0.6	40	0.6	31	0.6	40	0.6	31	0.6	31	0.5*	33
	Pb	5.4	48	0.4*	38	5.5	52	0.6	29	5.2*	46	0.6	29	5.2*	46	0.5	30	0.5	30	0.5	30	8.2	36	0.3	15
	Rb	2.2	54	0.7	26	2.5	48	0.8	23	1.5	54	0.8	23	1.5	54	0.7	20	0.7	20	0.7	20	3.3	37	0.6	20
	Sr	15	30	4.6	21	15	35	5	9	17	27	5	9	17	27	5	14	5	14	5	14	16	18	3*	19
	Ti	0.24*	70	<0.004	—	0.32*	79	<0.004	—	0.23	51	<0.004	—	<0.004	—	0.14	87	<0.004	—	0.14	87	<0.004	—	<0.004	—
	U	0.04*	97	0.09	20	0.04*	100	0.08*	20	0.04*	88	0.08*	20	0.04*	88	0.1*	16	0.08	16	0.08	16	0.08	70	0.08	25
	Zn	22	43	0.7	43	27*	49	0.4*	48	19	36	0.4*	48	19	36	1	40	1	40	1	40	9	37	1*	25
Zr	0.02*	89	0.03*	68	0.03*	92	0.02*	47	0.02*	88	0.02*	47	0.02*	88	0.04*	63	0.04*	63	0.04*	63	0.04	56	0.04	47	
Комплексные соединения, мг/кг	As	0.2	26	0.09	21	0.2	30	0.1	18	0.2	23	0.1	24	0.2	24	0.1	24	0.1	24	0.1	24	0.3	44	0.1	14
	Bi	0.1	35	0.01*	35	0.2	25	0.01*	13	0.1	29	0.01*	48	0.1	48	0.01*	48	0.01*	48	0.01*	48	0.1	33	0.01*	40
	Cd	0.3	37	0.05*	66	0.3	36	0.03*	100	0.2	35	0.06	45	0.2	45	0.2	23	0.2	23	0.2	23	0.2	23	0.05	59
	Co	3.3	51	3.1	21	4.1	56	3.1	22	3.1	46	3.4	18	3.1	46	3.4	18	3.1	46	3.4	18	0.7	28	2.7	19
	Cr	1.3*	31	0.2*	68	1.3	38	0.1	63	1.3	11	0.2*	78	0.2*	78	0.3*	43	0.2*	78	0.3*	43	0.3	36	0.3	36
	Cu	4*	35	0.8	46	4*	46	0.5	68	4	21	0.9	20	0.9	20	5	15	0.9	20	5	15	1*	36	1*	36
	Fe	1558	25	326	31	1587	29	366	18	1439	22	239	29	3937	40	385	27	3937	40	385	27	3937	40	385	27
	La	1.5*	95	1.6	35	1.6	59	1.4	39	1.3*	96	1.7*	35	1.7*	35	4	36	1.7*	35	4	36	4	36	1.8	20
	Mn	1253*	57	280	41	1623	51	222	49	926*	60	323	22	15	58	347	39	323	22	15	58	347	39	347	39
	Mo	0.03	37	0.03*	28	0.03	41	0.03*	27	0.03*	32	0.03	24	0.03*	24	0.03*	58	0.03	24	0.03*	58	0.03*	58	0.02*	36
Ni	2.8	38	2.39	66	3.1	27	1*	100	2.1*	49	3.2	42	3.2	42	2.4	15	3.2	42	2.4	15	2.4	15	2.8	50	
Pb	2.5	32	2.2*	34	36	31	2	28	2.3	16	3*	25	3*	25	2	14	3*	25	2	14	2	14	2	14	

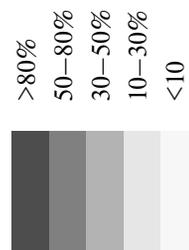
Таблица 1. Продолжение

Позиция горизонт	Вся выборка						Автономный вершины холма						Трансэлювиальный склона холма						Трансаккумулятивно-суперкальвый потяжины					
	ao (n = 18)		BT (n = 27)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)	
	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv	медiana	Сv
Sb	0.01*	100	<0.0005	—	0.01*	85	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	<0.0005	—	0.02	86	<0.0005	—	<0.0005	—
Ti	<0.002	—	2*	76	<0.002	—	4.5	76	<0.002	—	1.5	30	<0.002	—	<0.002	—	3.9	35	<0.002	—	3.9	35	<0.002	—
W	0.01*	94	0.01*	57	0.01*	50	0.01*	67	<0.0008	—	0.01*	3	<0.0008	—	<0.001	—	0.01*	38	<0.001	—	0.01*	38	<0.001	—
Zn	29	51	0.7	53	30*	51	0.4	74	28	48	0.1	21	28	42	43	0.7*	26	26	10*	43	0.7*	26	10*	43
Zr	0.1	48	2.6	14	0.1	55	2.6	9	0.1	44	0.1	21	0.1	21	65	2.7	12	12	0.1	65	2.7	12	0.1	65
As	0.4	31	0.06*	100	0.4	27	0.02*	100	0.4	35	0.05*	97	0.4	35	56	0.14*	56	56	0.2	56	0.14*	56	0.2	56
Вi	<0.0001	—	0.01*	44	<0.0001	—	0.02*	24	<0.0001	—	0.01*	45	<0.0001	—	<0.0001	—	0.01*	38	<0.0001	—	0.01*	38	<0.0001	—
Cd	0.3	45	0.02*	46	0.3	49	0.02*	66	0.3	38	0.3	34	0.3	38	38	0.02*	39	39	0.2	38	0.02*	39	0.2	38
Co	3.1*	61	1.1	24	3.1	69	0.9	18	3	56	1.4	15	3	56	49	1	24	24	0.2	49	1	24	0.2	49
Cr	0.7	68	3	18	0.5	75	2.6	23	0.7	61	3.1	14	0.7	61	14	3.2*	13	13	<0.001	—	3.2*	13	<0.001	—
Fe и Mn	3.8*	43	2.4*	17	3.8*	55	2.4*	26	3.9	26	2.3	8	3.9	26	17	2.8	11	11	4.2	17	2.8	11	4.2	17
соедине- ния, мг/кг	1362	37	2328	19	1205	33	2163	15	1773	34	1911	18	1773	34	1885	2611	14	14	1885	40	2611	14	1885	40
La	2*	97	8.1*	24	1.9	63	7.5	33	2*	100	9.3	17	2*	100	46	6.9*	10	10	3.3	46	6.9*	10	3.3	46
Mn	947	85	79	34	1002	68	48*	26	387	97	90	20	387	97	94	93	28	28	5	94	93	28	5	94
Ni	2.7	39	2.4	45	3.1	29	1.6*	56	2.1	50	3.1	29	2.1	50	21	2.4	29	29	1.9	21	2.4	29	1.9	21
Pb	24*	35	3	23	28	37	3.4	20	23	9	3.1	25	23	9	34	2.5	19	19	16	34	2.5	19	16	34
Rb	0.1*	100	<0.001	—	0.1*	100	<0.0001	—	0.3	83	<0.0001	—	<0.0001	—	<0.0001	—	0.1	53	<0.0001	—	0.1	53	<0.0001	—
Sb	0.01*	100	<0.001	—	0.02	85	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—	<0.001	—
Sr	7.9	74	1.1	58	8	75	0.55	52	7	73	1	72	7	73	39	1.5	27	27	8	39	1.5	27	8	39
Ti	<0.002	—	13	47	<0.002	—	12*	40	<0.002	—	10	25	<0.002	—	<0.002	—	23	17	<0.002	—	23	17	<0.002	—
U	0.03	74	0.1	14	0.02	84	0.1	17	0.03	62	0.1	14	0.03	62	45	0.1*	9	9	0.06	45	0.1*	9	0.06	45
W	0.01*	57	0.01*	29	0.01	53	0.01*	30	0.01*	57	0.01*	10	0.01*	57	10	0.01*	38	38	0.01*	10	0.01*	38	0.01*	10
Zn	32	49	8.2	18	34	49	9	17	28	48	8	14	28	48	42	7	14	14	10	42	7	14	10	42
Zr	0.1	53	0.5*	29	0.07	70	0.4	13	0.09	34	0.5	26	0.09	34	100	0.7	22	22	0.01*	100	0.7	22	0.01*	100
Подвиж- ность, %	33	24	5.4	49	33	24	5.3	24	33	24	4.2	41	33	24	90	10	28	28	43	90	10	28	43	90
Вi	59	21	15*	40	62*	19	19*	38	52	21	13	44	52	21	32	15*	40	40	88*	32	15*	40	88*	32
Cd	100*	10	55	35	100*	13	38	47	100*	4	57	24	100*	4	0	67	30	30	100*	0	67	30	100*	0
Co	100*	7	50	15	100*	9	45	13	100*	6	52	13	100*	6	33	52	13	13	92*	33	52	13	92*	33
Cr	10*	25	8	28	10*	23	6.2	20	8.1	26	7.8	15	8.1	26	24	10	6	6	5.7	24	10	6	5.7	24

Таблица 1. Окончание

Позиция горизонт	Вся выборка				Автономный вершины холма				Трансэлювиальный склона холма				Трансаккумулятивно-суперкальвый потяжины			
	ao (n = 18)		BT (n = 27)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		ao (n = 9)		BT (n = 9)		T (n = 9)		BT (n = 9)	
	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv	медiana	Cv
Cu	69	17	18	25	68	22	16	20	70	13	18	12	95*	13	25	8
Fe	53*	26	18	30	54*	28	17	12	52*	26	15	23	100*	19	25	16
La	25*	72	43	17	27	52	47	10	19*	89	45	10	100*	28	33	8
Mn	100*	0	50*	30	100*	0	46	18	100*	0	60	20	56	70	51	38
Mo	4.5	22	8.1*	44	4.5	27	6.8*	62	4.5	17	6.8	27	7.9*	100	9.1*	29
Ni	65	33	29	43	69	23	13*	66	50	42	30	22	95*	27	35	26
Pb	100*	0	38	18	100	0	39*	12	100*	0	43	16	100*	0	31	10
Rb	5.4*	69	1	16	5.6	68	1.1*	20	3.5	55	1	14	50	53	1	10
Sb	2*	96	<0.01*	—	2.7	82	<0.01*	—	1*	100	<0.01*	—	2.7*	100	<0.01*	—
Sr	36	38	6	24	34	36	6	13	38	41	7	18	100*	29	4.4*	23
Ti	100*	24	0.6*	100	100*	23	0.6*	100	100*	27	0.4	22	100*	72	0.8	16
U	5.9*	61	13	20	5.3*	73	14	8	6.3	50	14	15	39	36	10	13
W	2.5*	80	2.8*	31	2.7*	68	2.7*	43	1.7	98	2.7	17	<0.06*	—	3.3	21
Zn	86*	15	18	24	88	12	15	20	86	19	18	20	85	21	23	11
Zr	0.1*	67	1.1	22	0.1*	88	1.2*	9	0.1	38	1.4	16	1	75	0.9	15

Диапазоны значений Cv



Содержание элементов ниже предела обнаружения во всех проанализированных повторностях

Примечание. Показатели, отличающиеся значимо более высоким содержанием в соответствующем горизонте почв по парному T-критерию Уилкоксона, выделены полужирным ( $p < 0.05$ ) и полужирным курсивом ( $p < 0.01$ ). Звездочкой (\*) отмечены показатели с логнормальным законом распределения; распределение остальных показателей удовлетворяет нормальному закону. Содержание обменных форм Mo (2), Sb (1), W (1), комплексных Rb (0.4), Sr (6), U (0.1) и сорбированных Mo (2) ниже предела обнаружения во всех пробах (мкг/кг). Содержание обменных форм Mn выше, чем валовых, что можно объяснить природной вариабельностью элементного состава почв.

до нижнего предела обнаружения, поэтому вариабельность этого показателя, низкая в гор. ао (26–29%), увеличивается в гор. ВТ (74–100%; табл. 1). В гор. ао и ВТ содержание пылеватых и илистой фракций варьируют слабо ( $C_v = 10–30\%$ ), а крупного и среднего песка – сильно из-за близости к нижнему пределу обнаружения, что для крупного песка также наблюдали в гор. ВТ агросерых почв Брянского ополья (Кротов, Самсонова, 2009).

Величина рН хоть и относится к показателям уровня “почва-момент” характеризуется низкими значениями  $C_v$  во всех исследуемых горизонтах (5–9%; табл. 1), что согласуется с данными по пахотному Р горизонту агро-дерново-подзолистых почв базы “Чашниково” (Московская область), где у величины рН  $C_v = 4–11\%$  на участке  $200 \times 200$  м (Самсонова, Мешалкина, Дмитриев, 1999; Самсонова, Мешалкина, 2014). Низкая пространственная изменчивость показателя рН отмечена и в других работах (Fu et al., 2013; Bogunovic et al., 2014; Reza et al., 2017).

В гор. ао  $C_v$  валового содержания большинства элементов ниже 30%. Средняя и высокая вариабельность свойственна только содержанию Вi, Со, Мn, Ni. В гор. ВТ  $C_v$  содержания большинства элементов опускается ниже 30% (в том числе  $C_v < 10\%$  для содержания Cu, Fe, La, Pb, Rb, Ti, U) за исключением Вi ( $C_v > 80\%$ ) в обеих рассмотренных позициях и Sb (98%) в автономном ландшафте. В гор. Т торфяно-подзолисто-глеевых почв подчиненного ландшафта  $C_v$  валового содержания многих элементов существенно увеличивается (табл. 1). Это обусловлено повышенной неоднородностью торфяных почв (Beckwith et al., 2003; Wang et al., 2020), что также подтверждает высокая пространственная изменчивость зольности торфяных олиготрофных глеевых почв северо-востока Сахалина (Липатов и др., 2017).

В гор. ао и Т вариабельность максимальна у содержания обменных соединений As, Со, Cr, Fe, La, U, Zr, Pb и Mn. (табл. 1). Высокая пространственная изменчивость содержания обменного Pb ( $C_v = 75\%$ ) отмечена в дерново-подзолистой почве Ленинградской области (Витковская, 2011). В поверхностных горизонтах исследуемых почв ЦЛЗ низкие  $C_v$  обнаружены только у содержания обменного Cd в потяжине, Cu на склоне и Sr во всех ландшафтах. В дерново-подзолистой почве Ленинградской области (Витковская, 2011) пространственная изменчивость содержания Cu и Cd была несколько выше ( $C_v = 33\%$ ). В гор. ВТ всех выборок выявлена средняя и низкая вариабельность содержания обменных форм элементов (табл. 1).

Пространственная неоднородность содержания комплексных соединений слабее отличается по горизонтам почв ЦЛЗ. Она очень высока у комплексных соединений элементов с низким

содержанием (Rb, Sb, Sr). Ее высокие значения прослеживаются в гор. ао у Со, La, W, Zn, Zr, а также у Mn (51–60%) в поверхностных горизонтах всех почв. В гор. ВТ неоднородность содержания комплексных соединений снижается (<30%) у Со, Мо, Sb и Zr. Средней и низкой изменчивостью содержания комплексных соединений во всех исследуемых горизонтах почв характеризуются As, Вi, Fe, Ni, Pb.

Вариабельность соединений фракции F3 контрастно дифференцирована по горизонтам (табл. 1). Так, гор. ао и Т отличаются (очень) высокой вариабельностью содержания сорбированных соединений Mn, Rb, Sb, Со, Cr, La, Sr, W, Zr. Более низкая изменчивость содержания характерна для меньшего числа элементов (Cd, Cu, Ni, Fe, Pb, Zn) во всех позициях рельефа. Снижение вариабельности содержания сорбированных форм в гор. ВТ характерно для Со, Cr, Cu, Fe, La, Pb, U, W, Zn, Zr.

Вариабельность Cu (35%), Ni и Zn (28%) сопоставима с данными по сорбированным формам элементов в пахотных горизонтах агросерых почв Брянского ополья (Карпухина и др., 2012). В гор. ВТ  $C_v$  снижаются до низких значений у содержания сорбированных соединений Со, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, U, Zn, Zr. Высокая вариабельность характерна только для содержания As (56–100%).

Таким образом, показатели “почва-момент” имеют более высокую вариабельность, чем показатели “почва-память”. Данную закономерность отмечали ранее (Самсонова, Мешалкина, Дмитриев, 1999; Самсонова, Коротков, Лавринова, 2017; Самсонова, 2008). По значениям коэффициента  $C_v$  физико-химические свойства серых лесных и дерново-подзолистых почв Выгоничского района Брянской области выстраивались в ряд: рН (11%) < гумус (33%) < доступные Р и К (44–49%) (Самсонова, Коротков, Лавринова, 2017; Самсонова, 2008).

$C_v$  значений подвижности Cr, Cu, Fe и Zn во всех рассматриваемых горизонтах менее 30% (табл. 1). Значения подвижности Rb, Sb, W, Zr имеют  $C_v > 50\%$  в гор. ао и Т; La – в гор. АУ; As, Mn, Мо и Ti – в гор. Т. Высокая пространственная неоднородность значений подвижности в гор. ао и Т объясняется значительным вкладом непрочно связанных (F1, F2, F3) соединений в значениях показателя, что позволяет отнести подвижность в поверхностных горизонтах к уровню “почва-момент”.

В гор. ВТ изменчивость значений подвижности снижается, не превышая 30% у Со, Cr, Cu, Fe, La, Pb, Rb, Sb, Sr, U, Zn и Zr. Высокие и средние значения  $C_v$  имеет только значение подвижности Ti и As ( $C_v < 100\%$ ), Мо, Ni, Вi и Cd (<70%). Снижение  $C_v$  значений подвижности в гор. ВТ, где

преобладают прочно связанные соединения, позволяет рассматривать ее в минеральных горизонтах в качестве показателя уровня “почва-память”.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гор. Т и ао почв катены Центрально-Лесного заповедника нормальное распределение характерно для показателя рН и содержания Сорг, а также валового содержания большинства изученных элементов в автономном и склоновом ландшафте. Содержание трех подвижных форм соединений и как следствие подвижность большинства элементов соответствуют логнормальному распределению в гор. ао и Т и в меньшей степени в гор. ВТ.

В большинстве случаев для показателей уровня “почва-память” характерны низкие значения коэффициента С<sub>v</sub>. Лишь вариабельность содержания Сорг возрастает в гор. ВТ. Для валового содержания Вi, Со, Сг, Fe, La, Mn, Rb, Sr, Ti, U, W и Zg она высока в гор. Т подчиненного ландшафта. В гор. ВТ всех изученных почв катены значения С<sub>v</sub> минимальны.

Показатели уровня “почва-момент” обладают повышенной вариабельностью за исключением величины рН. Вариабельность содержания обменных и сорбированных гидроксидов Fe и Mn соединений снижается от поверхностных горизонтов к текстурному, а комплексных соединений остается неизменной.

Значение подвижности химических элементов обладает низкой вариабельностью. При этом, последняя увеличивается в поверхностных горизонтах ао и Т, что позволяет рассматривать ее в качестве показателя уровня “почва-память” в минеральных горизонтах, где преобладают прочно связанные соединения, и уровня “почва-момент” в поверхностных горизонтах, где повышен вклад прочно связанных соединений в значение показателя.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны руководителю исследований – академику Н.С. Касимову за консультации при подготовке текста рукописи. В Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ авторами выполнена пробоподготовка, проанализированы физико-химические свойства (содержание Сорг, гранулометрический состав и величина рН) и приготовлены почвенные вытяжки. Элементный состав почв и почвенных вытяжек определен в ВИМС им. Н.И. Федорова.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдеева Т.Н., Фрид А.С. Неоднородность плодородия почвенного покрова и ее учет при проведении полевых опытов // Современные проблемы почвоведения. На-

учные труды Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. М., 2000. С. 337–346.

Витковская С.Е. Пространственная изменчивость параметров плодородия дерново-подзолистой почвы в полевых опытах // Агрофизика. 2011. № 2. С. 19–25.

Енчилик П.Р., Семенов И.Н., Асеева Е.Н., Самонова О.А., Иовчева А.Д., Терская Е.В. Катенарная биогеохимическая дифференциация в южно-таежных ландшафтах (Центрально-Лесной заповедник, Тверская область) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 121–133.

Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.Ю., Бурмий Ж.П. Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.

Карпухина Н.Ю., Карпунин М.М., Самсонова В.П., Кротов Д.Г. Пространственная изменчивость содержания тяжелых металлов в агросерой почве в масштабе сельскохозяйственного угодья // Агрохимия. 2012. № 8. С. 57–65.

Козлова А.А. Сезонные изменения некоторых свойств почв Южного Предбайкалья, развитых в условиях реликтового микрорельефа // Вестник КрасГАУ. 2009. № 11(38). С. 30–34.

Кротов Д.Г., Самсонова В.П. Пространственная изменчивость гранулометрического состава агросерых почв и агросерых со вторым гумусовым горизонтом // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 1. С. 19–23.

Липатов Д.Н., Шеглов А.И., Манахов Д.В., Завгородняя Ю.А., Розанова М.С., Брехов П.Т. Пространственное варьирование свойств торфяных почв в нефтегазодобывающем регионе на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2017. № 7. С. 874–885.

Пузаченко Ю.Г., Желтухин А.С., Козлов Д.Н., Кораблев Н.П., Федяева М.В., Пузаченко М.Ю., Сиунова Е.В. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник. Популярный очерк. М.: Деловой мир, 2007. 84 с.

Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 156 с.

Самсонова В.П., Кротов Д.Г., Лавринова Е.Ю. Пространственная изменчивость агрохимических свойств сельскохозяйственных угодий Брянской области // Агрохимия. 2017. № 7. С. 11–18.

Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3. С. 36–44.

Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. Структуры пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1359–1366.

Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Латеральное распределение форм металлов в тундровых, таежных и лесостепных катенах Восточно-Европейской равнины // Вестник МГУ. Серия № 5 География. 2016. № 3. С. 29–39.

Семенов И.Н., Касимов Н.С., Терская Е.В. Поведение форм металлов в зональных почвенно-геохимических катенах // Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана / Под ред.

- Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. АПР Москва. 2017. С. 97–144.
- Соколов И.А., Таргульян В.О. Взаимодействие почвы и среды: почва–память и почва–момент // Изучение и освоение природной среды. М.: Наука, 1976. С. 150–164.
- Соловьев А.Г. Использование комплексных вытяжек для определения доступных форм микроэлементов в почвах // Мониторинг фоновое загрязнение природных сред. Л.: Гидрометеоздат, 1989. Вып. 5. С. 216–227.
- Таргульян В.О., Бронникова М.А. Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // Почвоведение. 2019. № 3. С. 259–275.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19030110>
- Таргульян В.О., Соколов И.А. Структурный и функциональный подход к почве: почва–память и почва–момент // Математическое моделирование в экологии. М.: Наука, 1978. С. 17–33.
- Шапорина Н.А., Чичулин А.В., Чумбаев А.С. Пространственная вариабельность водно-физических свойств темно-серой лесной почвы в условиях Предсалаирья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 10. С. 144–149.
- Beckwith C.W., Baird A.J., Heathwaite A.L. Anisotropy and depth related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat: I. Laboratory measurements. *Hydrol. Process.* 2003. № 17. P. 89–101.  
[https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116)
- Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Aurisic J., Bilandzija D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil & tillage research.* 2014. V. 144. P. 174–183.
- Fraterrigo J.M., Rusak J.A. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. *Ecol Lett.* 2008. V. 11. P. 756–770.
- Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Res.* 2013. V. 51. P. 503–512.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports.* № 106. FAO, Rome.
- Karavanova E.I., Malinina M.S. Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve. *Eurasian Soil Science.* 2009. V. 42. № 7. P. 725–737.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229309070035>
- Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Bauer T., Sushkova S. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. *MethodsX.* 2018. V. 5. P. 217–226.  
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>
- Reza S.K., Nayak D.C., Mukhopadhyay S., Chattopadhyay T., Singh S.K. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system. *Arch Agron Soil Sci.* 2017. V. 63(11). P. 1489–1498.
- Wang M., Liu H., Zak D., Lennartz B. Effect of anisotropy on solute transport in degraded fen peat soils. *Hydrol. Process.* 2020. V. 34(9). P. 2128–2138.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.v34.910.1002/hyp.13717>

## Spatial Variability of the Soils' Elemental Composition in the Central Forest Natural Reserve Catena

P. R. Enchilik<sup>1</sup> and I. N. Semenkova<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

\*E-mail: [semenkov@geogr.msu.ru](mailto:semenkov@geogr.msu.ru)

In the south-eastern part of the Valdai hills, a conjugated series of Retisols and Stagnosols was studied. In the peat (H), organic-mineral (O) and mineral (Bw) horizons, the variability of physical and chemical properties (pH value, content of particle size fractions and total organic carbon – TOC) and elemental composition (total content and exchangeable, weakly bound with complexes, nonsilicate Fe and Mn compounds of As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sr, Ti, U, W, Zn and Zr). Indicators of the “soil-memory” level (contentration of TOC, particle-size fractions and total content of chemical elements) and pH values with the exception of the coarse and medium sand content (>50%) and TOC (>74%) had low (<30%) variation coefficients in the Bw horizon. The variability of the total content of Bi, Co, Cr, Fe, La, Mn, Rb, Sr, Ti, U, W, and Zr increased in the H horizon. The content of mobile fractions of elements - the indicators of the “soil-moment” level - had higher variability. At the same time, the variability of exchangeable and specifically sorbed compounds of all the studied elements decreased with depth, while the changes in the content of fractions weakly bound with complexes, were less apparent. The chemical elements mobility had a low variability, since the greater contribution to the this indicator's value is made not by the mobile compounds, but by the total content.

*Keywords:* spatial heterogeneity, acidity, fractioning, heavy metals and metalloids, potentially toxic elements, forest ecosystems.

**Acknowledgements:** The field work and chemical analyses have been performed with a support from Interdisciplinary scientific and educational school of the Moscow State University “Planet's future and the environment's global changes”. The results were summarised within the framework of the RSF project No. 19-77-30004.

## REFERENCES

- Avdeeva T.N., Frid A.S., Neodnorodnost' plodorodiy pochvennogo pokrova i ee uchët pri provedenii polevykh opytov (Heterogeneity of soil fertility and its consideration during field experiments), In: *Sovremennye problemy pochvovedeniya* (Modern Issues of Soil Science), Nauchnye trudy Pochvennogo in-ta im. V.V. Dokuchaeva, Moscow, 2000, pp. 337–346.
- Beckwith C.W., Baird A.J., Heathwaite A.L., Anisotropy and depth related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat: I. Laboratory measurements, *Hydrol. Process*, 2003, No. 17, pp. 89–101.  
[https://doi.org/10.1002/\(ISSN\)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116](https://doi.org/10.1002/(ISSN)1099-108510.1002/hyp.v17:110.1002/hyp.1116)
- Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Aurisic J., Bilandzija D., Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil, *Soil & Tillage Research*, 2014, Vol. 144, pp. 174–183.
- Enchilik P.R., Semenov I.N., Aseeva E.N., Samonova O.A., Iovcheva A.D., Terskaya E.V., Katenarnaya biogeokhimicheskaya differentsiatsiya v yuzhno-taevnykh landshaftakh (Tsentral'no-Lesnoi zapovednik, Tverskaya oblast') (Catenary biogeochemical differentiation in the southern taiga landscapes (Central Forest Reserve, Tver oblast)), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2020, No. 6, pp. 121–133.
- Fraterrigo J.M., Rusak J.A., Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes, *Ecol Lett*, 2008, Vol. 11, pp. 756–770.
- Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C., Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements, *Soil Res.*, 2013, Vol. 51, pp. 503–512.
- IUSS Working Group WRB*, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, *World Soil Resources Reports*, 2015, No. 106, FAO, Rome.
- Karandashev V.K., Khvostikov V.A., Nosenko S.Y., Burmii Z.P., Ispol'zovanie vysokoobogashchennykh stabil'nykh izotopov v massovom analize obraztsov gornyykh porod, gruntov, pochv i donnykh otlozhenii metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoi plazmoi (Highly enriched stable isotopes in large scale analysis of rocks, soils, subsoils and bottom sediments using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)), *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, Vol. 82, No. 7, pp. 6–15.
- Karavanova E.I., Malinina M.S., Spatial Differentiation of the Chemical Composition of Solid and Liquid Phases in the Main Soil Types of the Central Forest State Natural Biospheric Reserve, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 7, pp. 725–737.  
DOI 10.1134/S1064229309070035
- Karpukhina N.Y., Karpukhin M.M., Samsonova V.P., Krotov D.G., Prostranstvennaya izmenchivost' soderzhaniya tyazhelykh metallov v agroserei pochve v masshtabe sel'skokhozyaystvennogo ugod'ya (Spatial variation of heavy metals in agrogray soil on the agricultural land scale), *Agrokimiya*, 2012, No. 8, pp. 57–65.
- Kozlova A.A., Sezonnaya izmeneniya nekotorykh svoystv pochv Yuzhnogo Predbaikal'ya, razvitykh v usloviyakh reliktoivogo mikrorel'efa (Seasonal changes of certain soils properties of the south prebaikalye formed in the relict microrelief conditions), *Vestnik KrasGAU*, 2009, No. 11(38), pp. 30–34.
- Krotov D.G., Samsonova V.P., Prostranstvennaya izmenchivost' granulometricheskogo sostava agroserykh pochv i agroserykh so vtorym gumusovym gorizontom (Spatial variability of soil composition of arable gray soil and arable gray soil with second humus horizon), *Vestnik MGU. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2009, No. 1, pp. 19–23.
- Lipatov D.N., Shcheglov A.I., Manakhov D.V., Zavgorodnyaya Y.A., Rozanova M.S., Brekhov P.T., Spatial variation of peat soil properties in the oil-producing region of north-eastern Sakhalin, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 7, pp. 850–860.
- Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Bauer T., Sushkova S., Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil, *MethodsX*, 2018, Vol. 5, pp. 217–226.  
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>
- Puzachenko Y.G., Zheltukhin A.S., Kozlov D.N., Korablev N.P., Fedyeva M.V., Puzachenko M.Y., Siunova E.V., *Tsentral'no-Lesnoi gosudarstvennyi prirodnyi biosfernyi zapovednik* (Central Forest State Biosphere Reserve), Moscow: Delovoi mir, 2007.
- Reza S.K., Nayak D.C., Mukhopadhyay S., Chattopadhyay T., Singh S.K., Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system, *Arch Agron Soil Sci*, 2017, Vol. 63(11), pp. 1489–1498.
- Samsonova V.P., Krotov D.G., Lavrinova E.Y., Prostranstvennaya izmenchivost' agrokhimicheskikh svoystv sel'skokhozyaystvennykh ugodii Bryanskoi oblasti (Spatial variability of agrochemical parameters of agricultural lands in Bryansk region), *Agrokimiya*, 2017, No. 7, pp. 11–18.
- Samsonova V.P., Meshalkina Y.L., Dmitriev E.A., Struktury prostranstvennoi variabel'nosti agrokhimicheskikh svoystv pakhotnoi dervno-podzolistoi pochvy (Structures of spatial variability of agrochemical properties of arable soddy-podzolic soil), *Pochvovedenie*, 1999, No. 11, pp. 1359–1366.
- Samsonova V.P., Meshalkina Y.L., Otsenka roli rel'efa v prostranstvennoi izmenchivosti agrokhimicheskikh vazhnykh pochvennykh svoystv dlya intensivno obrabatyvaemogo sel'skokhozyaystvennogo ugod'ya (Study of the relief contribution in the spatial variability of the agrochemically important soil properties for a intensively processed agricultural field), *Vestnik MGU. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2014, No. 3, pp. 36–44.
- Samsonova V.P., *Prostranstvennaya izmenchivost' pochvennykh svoystv: na primere dervno-podzolistykh pochv* (Spatial variability of soil properties: on the example of soddy-podzolic soils), Moscow: Izd-vo LKI, 2008, 156 p.
- Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V., Lateral'noe raspredelenie form metallov v tundroykh, taevnykh i leso-stepnykh katenakh Vostochno-Evropeskoi ravniny (Lateral distribution of metal forms in tundra, taiga and forest steppe catenae of the East European Plain), *Vestnik MGU, Seriya 5, Geografiya*, 2005, No. 3, pp. 29–39.
- Semenkov I.N., Kasimov N.S., Terskaya E.V., Povedenie form metallov v zonal'nykh pochvenno-geokhimicheskikh katenakh (Behavior of metal forms in zonal soil-geochemical catenas), In: *Geokimiya landshaftov* (Landscapes geochemistry), Moscow: APR 2017, pp. 97–144.

- Shaporina N.A., Chichulin A.V., Chumbaev A.S., Prostranstvennaya variabel'nost' vodno-fizicheskikh svoystv temno-seroi lesnoi pochvy v usloviyakh Predsalair'ya (Spatial variability of water-physical properties of dark gray forest soil in the conditions Pedaleira), *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2018, No. 10, pp. 144–149.
- Sokolov I.A., Targul'yan V.O., Vzaimodeistvie pochvy i sredy: pochva–pamyat' i pochva–moment (Interaction of soil and environment: soil–memory and soil–moment), In: *Izuchenie i osvoenie prirodnoi sredy* (Study and development of the natural environment), Moscow: Nauka, 1976, pp. 150–164.
- Solov'ev A.G., Ispol'zovanie kompleksnykh vytyazhek dlya opredeleniya dostupnykh form mikroelementov v pochvakh (The use of complex extracts to determine the available forms of trace elements in soils), In: *Monitoring fonovogo zagryazneniya prirodnykh sred* (Monitoring of background pollution of natural environments), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, Vol. 5, pp. 216–227.
- Targulian V.O., Bronnikova M.A., Soil memory: theoretical basics of the concept, its current state, and prospects for development, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 229–243.
- Targul'yan V.O., Sokolov I.A., Strukturnyi i funktsional'nyi podkhod k pochve: pochva–pamyat' i pochva–moment (Structural and functional approach to soil: soil–memory and soil–moment), In: *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii* (Mathematical modeling in ecology), Moscow: Nauka, 1978, pp. 17–33.
- Vitkovskaya S.E., Prostranstvennaya izmenchivost' parametrov plodorodiya dernovo-podzolistoi pochvy v polevykh opytakh (Spatial variability of sod-podzolic soil fertility parameters in field experiments), *Agrofizika*, 2011, No. 2, pp. 19–25.
- Wang M., Liu H., Zak D., Lennartz B., Effect of anisotropy on solute transport in degraded fen peat soils, *Hydrol. Process*, 2020, Vol. 34(9), pp. 2128–2138.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.v34.910.1002/hyp.13717>

УДК 630.111:551.587:551.588.6:551345.2

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРОДОЛЖАЮЩЕГОСЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ПОД ХВОЙНЫМИ ЛЕСАМИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2022 г. С. А. Гулый<sup>а</sup>, \*, Ю. Б. Скачков<sup>б</sup>, М. С. Рожина<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (СВНИМС ИМЗ СО РАН), ул. Портовая, д. 16, Магадан, 685000 Россия

<sup>б</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ С РАН), ул. Мерзлотная, д. 36, Якутск, 677013 Россия

\*E-mail: svnims@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 14.09.2020 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

На основании данных сайта Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) сделан анализ изменения температуры мерзлых грунтов за период наблюдений от 3 до 35 лет на глубинах годовых теплооборотов от 14 до 30 м для растительных покровов, соответствующих классификации, принятой на сайте GTN-P: “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, “травяного покрова”, “без растительности”, “хвойного леса”, “лиственного леса”. Анализ полученных данных показал, что из всех рассмотренных точек наблюдений в среднем у 72% точек происходит положительная динамика изменения температуры грунтов. Остальные имеют отрицательную (21%) или нулевую динамику (7%). Анализ по каждому виду растительности показал, что растительность “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, а также мест, где “нет растительности”, имеет примерно одинаковое процентное отношение точек, в которых происходит рост температуры грунтов – 72–82%. Для “хвойных лесов” оно равно 57%. Для скважин, расположенных в местах, где растительность представлена “травяным покровом” ни в одной из наблюдаемых точек не была зафиксирована отрицательная динамика изменения температур. Для точек, в которых “нет растительности” и в “кустарниковой тундре” отрицательная динамика изменения температур (вместе с нулевой динамикой) составляет соответственно 18% и 20%. Для “тундры” этот показатель повышается до 26%, для “лесной тундры” – до 28%. Под хвойными деревьями в районе 43% наблюдаемых точек потепление климата пока не может преодолеть существующую тепловую защиту и вызвать деградацию многолетнемерзлых грунтов. Анализ месторасположения точек наблюдений в северном полушарии при положительной, отрицательной (вместе с нулевой) динамикой изменения температуры в грунте для “хвойных лесов” показал, что для “хвойных лесов” широтная зональность на динамику изменения температуры в грунте не влияет.

*Ключевые слова:* многолетнемерзлые грунты, GTN-P, температура в скважинах, хвойные деревья.

DOI: 10.31857/S0024114822040039

В 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН по изменению климата (РКИК), в которой декларировалась озабоченность мирового сообщества потеплением климата. За последние 30 лет собрано достаточно данных как подтверждающих потепление климата в целом на Земле, так и доказывающих повышение температуры атмосферного воздуха и грунта в конкретных местах (Гаврилова, 2008; Дроздов и др., 2010; Решетько и др., 2016; Donglin Guo et al., 2017; Tonghua Wu et al., 2018). Однако нужно признать, что это происходит не повсеместно. Существуют территории, где температуры грунта как в деятельном слое, так и

на глубине годовых теплооборотов не меняются и даже продолжают снижаться (Дроздов и др., 2010; Скачков и др., 2011; Малкова и др., 2011; Скачков, 2013; Шац и др., 2016; Варламов и др., 2017; Fedorov et al., 2019).

Известно, что одним из факторов, который влияет на формирование многолетних пород, является растительность. Влияние растительности на температурный режим мерзлых грунтов было отмечено в исследованиях начала XX в. специалистами, занимающимися непосредственно растительностью и почвами и грунтами, в частности многолетнемерзлыми. Были получены результаты о

том, что при прочих равных условиях под любым растительным покровом температура почвы летом ниже, а глубина протаивания меньше, чем на участках, где растительность отсутствует. Зимой растительность замедляет охлаждение почвы. Исследованиями, приводимыми в настоящее время установлено, что при нынешнем потеплении климата существует обратная связь, усиливающая рост лесов и, следовательно, предотвращающая таяние многолетнемерзлой толщи (Fedorov et al., 2019). При этом мерзлые толщи и растительные покровы развиваются параллельно, реагируя на взаимные изменения (Скрябин и др., 1998; Николаев и др., 2004; Кнорре и др. 2009).

Первое упоминание о возможности формирования многолетней мерзлоты под сомкнутым еловым лесом было сделано в 1911 г. (Безайс, 1911). Он полагал, что обнаруженная им мерзлота сформировалась недавно и после гибели деревьев вновь создадутся условия для лучшего прогрева почвы и последующего исчезновения мерзлого слоя. А.П. Тыртиков (Тыртиков, 1969) в своей работе приводит данные результатов наблюдений за глубиной протаивания, температурой почвы и мощностью многолетнемерзлой толщи, в том числе в пойме р. Селемджи (левый приток р. Зeya в Амурской области) в пихтовом лесу с сомкнутостью крон 0.8–0.9 и тополевым лесу с сомкнутостью крон 0.7. Им было установлено, что в тополевым лесу с пихтой во II ярусе к концу августа 1955 г. сезонно-мерзлый слой протаял полностью, ниже мерзлота отсутствовала. В пихтовом лесу без мохового покрова на песчаной почве к этому же сроку глубина протаивания составила 1.5 м в мерзлых грунтах, где их мощность оценивалась не менее 2.8 м. В это же время в пихтовом лесу с покрытием из сфагновых мхов грунт протаял только на 0.65 м. А.П. Тыртиков сделал вывод о том, что формирование сомкнутого полога из темнохвойных пород (ель, пихта, сосна сибирская кедровая), а также накопление подстилки, состоящей в основном из опада хвои мощностью 3–5 см, изменяют условия прогревания почвы. После того как прогревание ее замедляется сезоннопромерзающие слои почвы летом полностью не протаивают, затем формируются перелетки, а впоследствии грунты переходят в мерзлое состояние, которое сохраняется два года и более.

Именно сильное затенение поверхности почвы темнохвойными породами деревьев, по мнению А.П. Тыртикова, являлось основной причиной, способствовавшей формированию многолетнемерзлых толщ на месте ранее немерзлых аллювиальных отложений. Та же закономерность была отмечена им в еловых лесах Енисейского кряжа и Алданского плоскогорья. В то же время в березовых, смешанных, лиственных, редкостойных заболоченных лесах возможность формирования перелетков и мерзлоты возникала

только при наличии торфянисто-мохового слоя на поверхности почвы.

Исследованиями сотрудников ИМЗ СО РАН (Скрябин и др., 1998) установлено, что в зависимости от типа леса и сомкнутости крон древесный покров может способствовать понижению температуры поверхности грунтов в среднем за теплый сезон на 2–3°C (в редкостойном сосновом лесу) или на 4°C (в сомкнутом лиственном лесу) по сравнению с открытым участком. Формирование новообразований мерзлых перелетков и многолетних пород было отмечено не только в естественной природной среде. Например, в случае значительных (более 2 лет) перерывов при строительстве зданий на территориях, где среднегодовая температура была ниже 0°C под возведенным, но не сданным в эксплуатацию зданием, формировались зоны мерзлых грунтов (Гулый, Власов, 2019).

В работе Фишера и др. (Fisher et al., 2016) описывается, что экспериментальное удаление кустарникового или карликового кустарника и осокового покрова в тундре значительно увеличивает мощность деятельного слоя. В бореальных лесах листья кроны деревьев выполняют ту же роль затенения, что и подлесок, при этом вечнозеленые кроны также задерживают снег на ветвях, уменьшая снежный покров на земле. Это улавливание может увеличить теплопотери от земли зимой и таким образом защитить многолетнемерзлую толщу.

А.Н. Федоров и др. (Fedorov et al., 2019) отмечают, что нетронутые старовозрастные лиственные леса с их устойчивым защитным слоем и сукцессионными стадиями восстановления леса после нарушения способствуют устойчивости ландшафтов в зоне распространения многолетнемерзлых пород, не вызывая значительного повышения температуры почвы и мощности деятельного слоя. Сукцессии лиственных пород при современном потеплении климата оказывают достаточное сопротивление, способствующее повышению температуры многолетнемерзлых пород.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что именно леса, в частности хвойные, могут оставаться теми территориями, где, несмотря на повсеместное повышение температуры атмосферного воздуха, продолжают сохраняться многолетнемерзлые породы.

Цель исследований – выявить влияние различного вида растительности на температурное состояние мерзлых грунтов в криолитозоне в современный период времени.

Для решения поставленной задачи была использована база данных сайта Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) (<http://gtnpdatabase.org>), где собрана информация о температуре мерзлых и талых грунтов на раз-

личных глубинах по всему миру (Douglas et al., 2008; Biskaborn et al., 2015).

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

На основании имеющихся данных на сайте Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) (<http://gtnpdatabase.org>) о температуре мерзлых грунтов на глубинах годовых теплооборотов (от 14 до 30 м) был сделан отбор скважин по следующим критериям:

- 1) данные о результатах измерений должны быть на сайте в открытом доступе;
- 2) температура в скважинах на выбранных глубинах должна быть отрицательная;
- 3) замеры температуры должны быть выполнены примерно в одно и то же время в период с конца августа по конец сентября;
- 4) абсолютная высота, на которой располагались скважины, не должна превышать 2000 м;
- 5) растительность (обозначение растительного покрова соответствует классификации, принятой на сайте GTN-P): “тундра”, “лесная тундра”, “кустарниковая тундра”, “травяной покров”, “без растительности” на поверхности или с растительностью в виде “хвойного леса” или “лиственного леса”;
- 6) период наблюдений должен быть не менее 3 лет.

Вычисление статистической характеристики выборки сделано как для всех единиц наблюдений, так и для каждого вида рассматриваемого вида растительности при количественной изменчивости признака, соответствующего положительной или отрицательной динамике изменения температуры грунта в скважине за период наблюдений. При систематизации данных принято, что температура 0°C будет соответствовать данным с отрицательной температурой. Выбраковка данных выполнена на основании проверки гипотезы о принадлежности “сомнительных” вариантов к совокупности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из 1380 зарегистрированных в настоящее время на сайте GTN-P скважин выбранным критериям соответствовало 54. Так как в некоторых скважинах было более одной точки наблюдения на разных глубинах, то всего для анализа было получено 102 точки. Из этого количества точек к типу растительный покров “тундра” относилось 35 точек, “хвойные леса” – 28, “лесная тундра” – 18, “поверхность без растительности” – 11, “кустарниковая тундра” – 5, “поверхность с травяным покровом” – 5. Точек с растительным покровом “лиственные леса” для выбранных критериев найдено не было. Наибольшее число точек на-

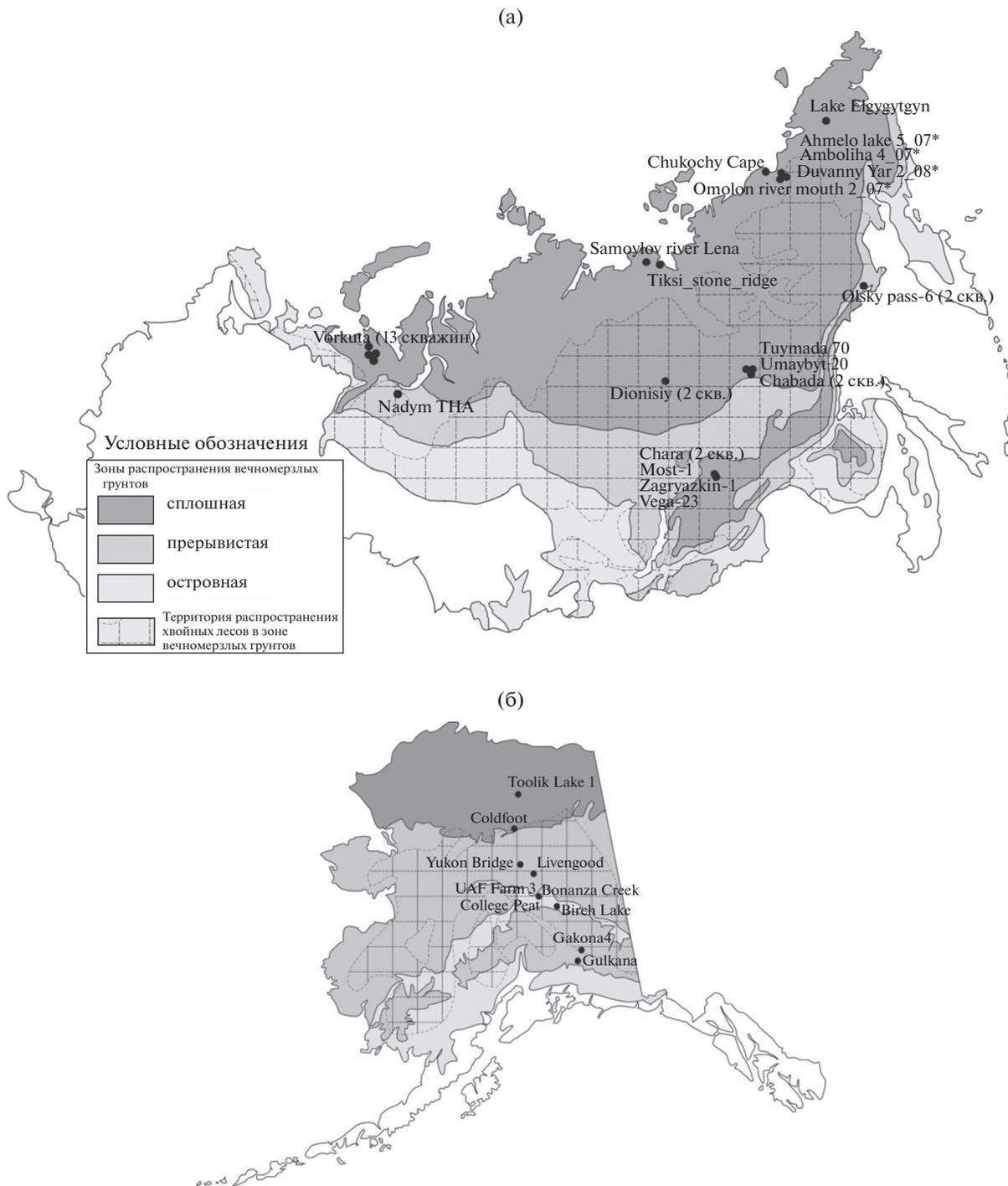
блюдения располагались в диапазоне глубин 14–19 м – 54 точки, 20–24 м – 30 точек, 25–30 м – 18 точек. Период наблюдений более 35 лет был отмечен только в двух точках. Наибольшее количество точек (49) имело период наблюдений 4–9 лет, 3 г. – 23 точки, 10–24 г. – 16 точек, 25–34 г. – 12 точек. Территориально выбранные скважины находятся в России, США, Канаде, Швейцарии, Норвегии, Исландии. Все скважины расположены в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Месторасположение скважин в России и на Аляске, выбранное для анализа, показано на рис. 1. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа, относящиеся к каждому из рассматриваемых видов растительности, представлены в табл. 1–6.

Так как сбор данных выполнялся по определенным критериям, то распределение в группы по виду растительного покрова определялось только наличием или отсутствием этих данных на сайте, то есть случайным образом. Количественных признаков в нашем случае всего два – это положительная или отрицательная динамика изменения температуры за период наблюдений. В настоящих исследованиях не ставится задача выяснить причины, почему в одних местах температура в скважинах поднимается, в других опускается, а в третьих остается неизменной. Здесь сделана попытка выяснить, в какой степени различный растительный покров может оказать влияние на динамику изменения температуры в скважине.

Из диаграммы распределения всех наблюдательных точек по динамике изменения температуры грунтов (рис. 2) за период наблюдений (положительной, отрицательной, нулевой) можно видеть, что в среднем 72% точек соответствует положительная динамика. Остальные имеют отрицательную (21%) или нулевую динамику (7%).

Далее рассмотрим, как отдельный тип выбранной растительности влияет на динамику изменения температуры грунтов в скважинах. Результаты распределения количественной изменчивости признака, соответствующего положительной, отрицательной и нулевой динамике изменения температуры грунта в скважинах за период наблюдений для различных видов растительности показаны на рис. 3.

Из диаграмм видно, что растительность “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, а также мест, где “нет растительности”, имеет примерно одинаковое процентное отношение точек, в которых происходит рост температуры грунтов – 72–82%. То же самое соотношение для “хвойных лесов” равно 57%. Таким образом, почти на половине (43%) территорий, где произрастают хвойные леса, не происходит повышение



**Рис. 1.** Месторасположение скважин на территории России (а) и Аляски (б), выбранных по заданным критериям для анализа.

температуры грунтов. Для скважин, расположенных в местах, в которых растительность представлена “травяным покровом” (табл. 5), ни в одной из наблюдаемых точек не была зафиксирована отрицательная динамика изменения температур. Для точек, где “нет растительности”, и в “кустарниковой тундре” отрицательная динамика изме-

нения температур (вместе с нулевой динамикой) составляет соответственно 18% и 20%. Для “тундры” этот показатель повышается до 26%, для “лесной тундры” – до 28%.

Имеющиеся данные о местонахождении рассматриваемых точек позволяют сделать оценку влияния географической широты, на которой

**Таблица 1.** Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “тундра”

№№ п/п	Название скважины (страна)	Глубина замера, м	Годы наблюдений		Период наблюдений, лет	Температура, °С		Изменение $\Delta T$ за 10 лет (°С*10)
			начало	окончание		начало	окончание	
1	Vorkuta Ya1 (Russia)	15	2007	2012	5	-0.25	-0.23	0.04
		22	2007	2012	5	-0.25	-0.28	-0.06
2	Samoylov rive Lena (Russia)	15.75	2006	2018	12	-9.09	-6.78	1.93
		20.75	2006	2018	12	-9.06	-7.36	1.42
		26.75	2006	2018	12	-8.99	-7.82	0.98
3	Endalen PYRN (Svalbard)	15	2008	2020	12	-3.26	-2.52	0.62
		19	2008	2020	12	-3.41	-2.52	0.74
4	Vorkuta R-71 (Russia)	15.6	2008	2010	2	-1.93	-1.81	0.60
5	Dionisiy-22 (Russia)	20	1987	2012	25	-4.5	-4.1	0.16
6	Dionisiy-111(2) (Russia)	20	1987	2012	25	-5.6	-3.7	0.76
7	Amboliha 4_07* (Russia)	14	2007	2011	4	-5.85	-5.67	0.45
		21	2007	2011	4	-5.7	-5.64	0.15
8	Chara 6 (Russia)	15	2006	2009	3	-5.17	-5.01	0.53
		20	2006	2009	3	-5.16	-5.14	0.07
9	Pangnirtung (Canada)	15	2008	2013	5	-5.19	-4.72	0.94
10	Igloolik (Canada)	15	2008	2011	3	-8.65	-8.14	1.70
11	Vorkuta 35 (Russia)	15.4	2007	2009	2	-1.76	-1.54	1.10
12	Vorkuta 100 (Russia)	14.2	2007	2009	2	-2.83	-2.68	0.75
13	Lake Elgygytgyn (Russia)	15	2009	2011	2	-5.59	-5.63	-0.20
		20	2009	2011	2	-5.93	-6.02	-0.45
		30	2009	2011	2	-6.42	-6.44	-0.10
14	Chukochoy Cape (Russia)	15	2007	2012	5	-10.05	-9.24	1.62
		25	2007	2012	5	-10.23	-9.71	1.04
15	Tiksi_stone_ridge (Russia)	20	1992	2016	24	-10.58	-9.82	0.32
		30	1992	2016	24	-11.05	-10.11	0.39
16	Vorkuta DS-3/VII-74 (Russia)	15	2007	2012	5	-0.53	-0.45	0.16
		23	2007	2012	5	-0.52	-0.52	0.00
17	Vorkuta ZS-115 (Russia)	15	2007	2012	5	-0.07	-0.12	-0.10
18	Vorkuta ZS-117 (Russia)	15	2007	2012	5	-0.09	-0.12	-0.06
		25	2007	2012	5	-0.2	-0.14	0.12
19	Vorkuta ZS-124 (Russia)	15	2007	2012	5	-1.3	-1.16	0.28
		24	2007	2011	4	-1.38	-1.27	0.28
20	Vorkuta ZS-25 (Russia)	15	2009	2011	2	-1.1	-1.1	0.00
		20	2009	2011	2	-0.958	-0.929	0.15
		30	2009	2011	2	-0.73	-0.85	-0.60

**Таблица 2.** Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “хвойные леса”

№№ п/п	Название скважины (страна)	Глубина замера, м	Годы наблюдений		Период наблюдений, лет	Температура, °С		Изменение $\Delta T$ за 10 лет (°С*10)
			начало	окончание		начало	окончание	
1	Gakona4 (USA)	15	2008	2012	4	-0.8	-0.8	0.00
		19	2008	2015	7	-0.79	-0.79	0.00
2	Chabada 5-81 (Russia)	20	1981	2017	36	-0.8	-0.6	0.06
3	Yukon Bridge (USA)	15	2005	2012	7	-2.37	-1.23	1.63
		20	2005	2012	7	-2.38	-1.3	1.54
4	Bonanza Creek (USA)	14	2009	2012	3	-1.3	-1.54	-0.80
		20	1994	2011	17	-1.3	-1.43	-0.08
5	College Peat (USA)	15	2005	2012	7	-2.56	-2.81	-0.36
		20	1983	2011	28	-2.6	-2.56	0.01
6	GL#1 (USA)	15	2010	2012	2	-0.34	-0.33	0.05
		20	2010	2012	2	-0.27	-0.26	0.05
7	GL#2 (USA)	15	2009	2012	3	-0.41	-0.4	0.03
		20	2009	2015	6	-0.39	-0.38	0.02
8	Livengood (USA)	16	2005	2010	5	-0.58	-0.78	-0.40
		26	2005	2011	6	-0.56	-0.74	-0.30
9	Chabada 8-82 (Russia)	15	1983	2015	32	-2.4	-2.9	-0.16
		20	1983	2017	34	-2.2	-2.7	-0.15
		30	1983	2017	34	-1.9	-2.2	-0.09
10	Birch Lake (USA)	15	2007	2012	5	-1.42	-1.67	-0.50
		20	1986	2012	26	-1.7	-1.45	0.10
11	Vega-23 (Russia)	20	1990	2013	23	-1.3	-1.1	0.09
		30	1990	2013	23	-0.5	-0.37	0.06
		14	2013	2019	6	-1.67	-2.04	-0.62
12	Umaybyt 20 (Russia)	20	1982	2019	37	-2.9	-2.56	0.09
13	Omolon river mouth 2_07* (Russia)	15	2007	2011	4	-4.32	-3.67	1.63
		25	2007	2011	4	-4.44	-4.2	0.60
14	Olsky pass-6 (Russia)	14.5	1990	2019	29	-0.56	0.09	0.22
		20	1990	2019	29	-0.48	-0.21	0.09

**Таблица 3.** Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “отсутствие растительности”

№№ п/п	Название скважины (страна)	Глубина замера, м	Годы наблюдений		Период наблюдений, лет	Температура, °С		Изменение $\Delta T$ за 10 лет (°С*10)
			начало	окончание		начало	окончание	
1	LAP_0198 (Switzerland)	16	2009	2018	9	-0.09	-0.06	0.03
		19.6	2009	2018	9	-0.02	-0.04	-0.02
2	Kapp Linne 1 (Norway)	15	2009	2014	5	-3.23	-2.81	0.84
		20	2009	2014	5	-3.21	-2.84	0.74
3	Kapp Linne 2 (Norway)	15	2008	2014	6	-3.17	-2.85	0.53
		20	2008	2014	6	-3.29	-2.97	0.53
		30	2008	2017	9	-3.5	-3.1	0.44
4	Saudafell near Snæfell (Iceland)	15	2004	2011	7	-0.55	-0.53	0.03
		20	2004	2011	7	-0.53	-0.53	0.00
5	Olsky Pass-9 (Russia)	14.5	1990	2019	29	-2.08	-1.27	0.28
		20	1990	2019	29	-1.88	-1.4	0.17

**Таблица 4.** Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “лесная тундра”

№№ п/п	Название скважины (страна)	Глубина замера, м	Годы наблюдений		Период наблюдений, лет	Температура, °С		Изменение $\Delta T$ за 10 лет (°С*10)
			начало	окончание		начало	окончание	
1	Zagryazkin-1 (Russia)	15	2012	2019	7	-4.44	-4.11	0.47
		19	2015	2019	4	-4.09	-3.96	0.33
2	Ahmelo lake 5_07* (Russia)	16	2007	2010	3	-2.88	-2.89	-0.03
3	Chara 38 (Russia)	15	1988	2009	21	-6.6	-5.35	0.60
		19	1988	2009	21	-6.2	-5.14	0.50
4	Gulkana (USA)	16	2009	2012	3	-0.73	-0.73	0.00
		20	2009	2012	3	-0.701	-0.678	0.08
		30	2009	2012	3	-0.567	-0.515	0.17
5	Coldfoot (USA)	22	2006	2012	6	-1.03	-0.87	0.27
		31	2006	2012	6	-1.22	-1.11	0.18
6	Most-1 (Russia)	14.1	1990	2012	22	-5.2	-5.5	-0.14
		19.8	1990	2011	21	-5.5	-5.34	0.08
7	Duvanny Yar 2_08* (Russia)	15	2009	2011	2	-5.85	-5.73	0.60
		25	2009	2011	2	-6.14	-6.07	0.35
8	Vorkuta_SH-15 (Russia)	14.5	2007	2010	3	-1.38	-1.13	0.83
		29	2007	2010	3	-1.44	-1.28	0.53
9	Nadym THA (Russia)	15	2008	2011	3	-0.4	-0.4	0.00
		30	2008	2011	3	-0.26	-0.26	0.00

**Таблица 5.** Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “травяной покров”

№№ п/п	Название скважины (страна)	Глубина замера, м	Годы наблюдений		Период наблюдений, лет	Температура, °С		Изменение $\Delta T$ за 10 лет (°С*10)
			начало	окончание		начало	окончание	
1	Toolik Lake 1 (USA)	15	2007	2011	4	-2.7	-2.4	0.75
2	Tuymada 70 (Russia)	15	1995	2019	24	-2	-1.6	0.17
		30	2008	2019	11	-2.2	-2.1	0.09
3	UAF Farm 3 (USA)	15	2006	2012	6	-0.13	-0.12	0.02
		17.5	2005	2012	7	-0.15	-0.14	0.01

**Таблица 6.** Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “кустарниковая тундра”

№№ п/п	Название скважины (страна)	Глубина замера, м	Годы наблюдений		Период наблюдений, лет	Температура, °С		Изменение $\Delta T$ за 10 лет (°С*10)
			начало	окончание		начало	окончание	
1	Vorkuta ZS-83a' (Russia)	15	2007	2012	5	-0.11	-0.13	-0.04
		28	2007	2012	5	-0.11	-0.06	0.10
2	Vorkuta 8C (Russia)	19	2007	2012	5	-0.06	-0.004	0.11
3	Vorkuta UP-35 (Russia)	20	2010	2013	3	-0.845	-0.816	0.10
		30	2010	2013	3	-0.788	-0.76	0.09

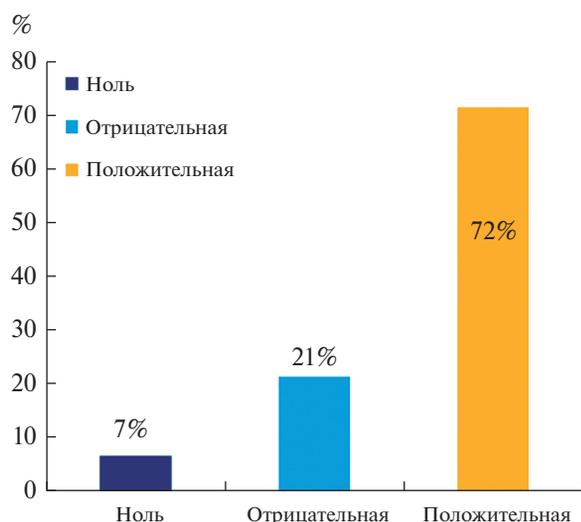


Рис. 2. Средний процент распределения наблюдательных точек по динамике изменения температуры грунтов за период наблюдений.

расположены точки, на динамику изменения температуры в грунте. Такой анализ выполнен для “хвойных лесов”. К группе А были отнесены точки с положительной динамикой изменения температуры в грунте, к группе Б – с отрицательной и нулевой.

Из данных группы А (56.9; 56.9; 59.6; 59.6; 61.4; 61.9; 64.3; 64.9; 64.9; 64.9; 64.9; 64.9; 65.9; 65.9; 68.7; 68.7) имеются крайние значения (56.9 и 68.7), которые принадлежат к “сомнительным” по отношению к общей совокупности значений. Проверим гипотезу об их принадлежности к совокупности.

Рассчитаем фактические значения критерия  $\tau$  и сравним их с теоретическими:

$$\text{для } X_1\tau = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} = \frac{59.6 - 56.9}{65.9 - 56.9} = 0.3,$$

$$\text{для } X_n\tau = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2} = \frac{68.7 - 65.98}{68.7 - 56.9} = 0.235.$$

Полученные значения  $\tau$  при  $n = 16$  для  $X_1$  и  $X_n$  меньше теоретических значений  $\tau_{05} = 0.369$  и  $\tau_{01} = 0.472$ . Оба варианта находятся в пределах возможных случайных колебаний и оснований для браковки крайних значений для группы А нет.

Для группы Б (59.6; 61.9; 61.9; 61.9; 62.4; 62.4; 64.3; 64.7; 64.7; 64.9; 65.5; 65.5) крайним значением, которое может относиться к сомнительным,

является значение, равное 59.6. Проверим гипотезу об его принадлежности к совокупности.

Рассчитаем фактические значения критерия  $\tau$  и сравним его с теоретическими:

$$\text{для } X_1\tau = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} = \frac{61.9 - 59.6}{65.5 - 59.6} = 0.389.$$

Полученное значения  $\tau$  при  $n = 12$  для  $X_1$  меньше теоретических значений  $\tau_{05} = 0.428$  и  $\tau_{01} = 0.541$ . Проверенное значение находится в пределах возможных случайных колебаний и может быть использовано для вычисления среднего значения для группы Б.

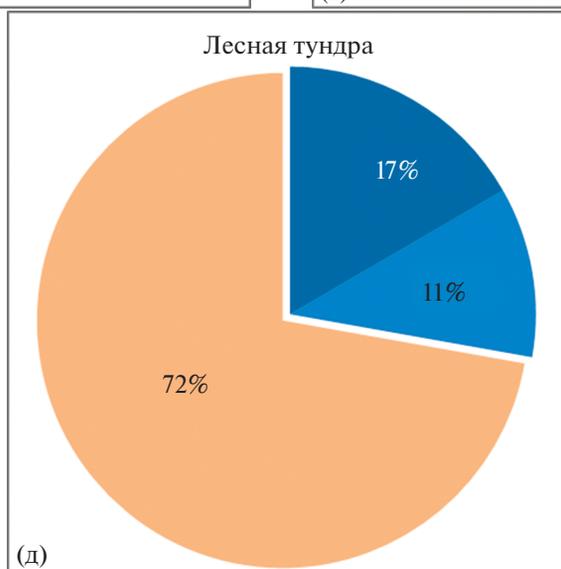
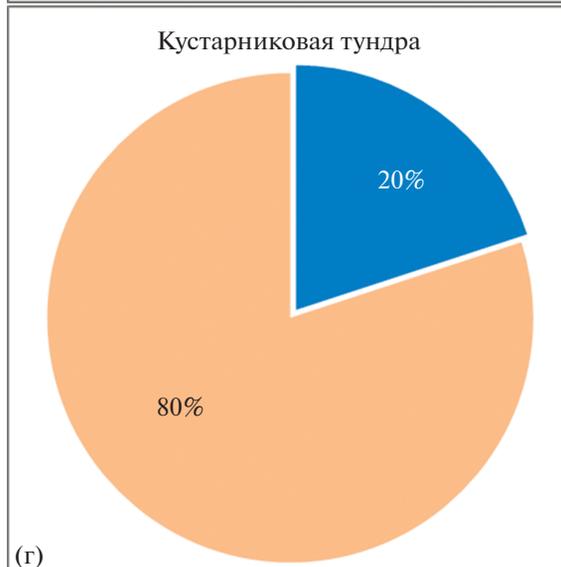
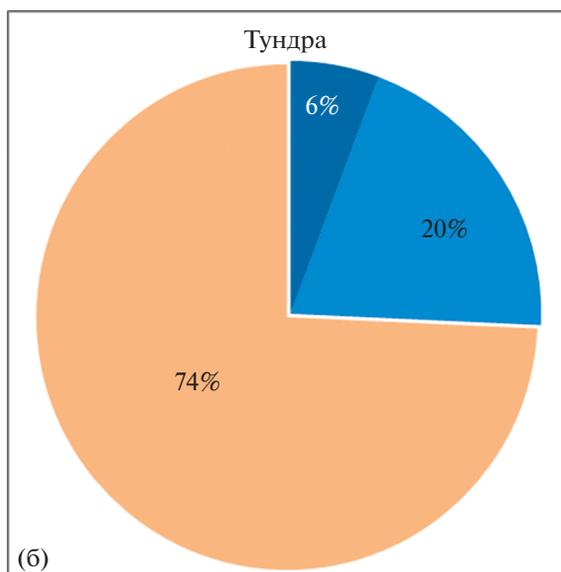
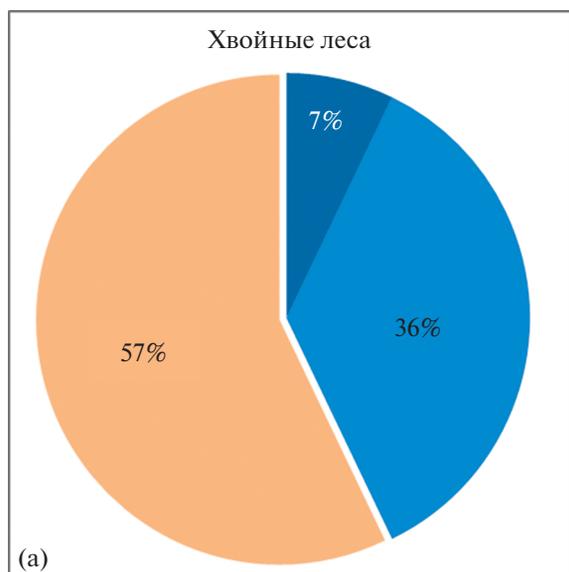
Полученные результаты анализа месторасположения точек наблюдений, расположенных в северном полушарии при положительной, отрицательной (вместе с нулевой) динамика изменения температуры в грунте для растительности “хвойный лес” показали, что для “хвойных лесов” широтная зональность на динамику изменения температуры в грунте не влияет.

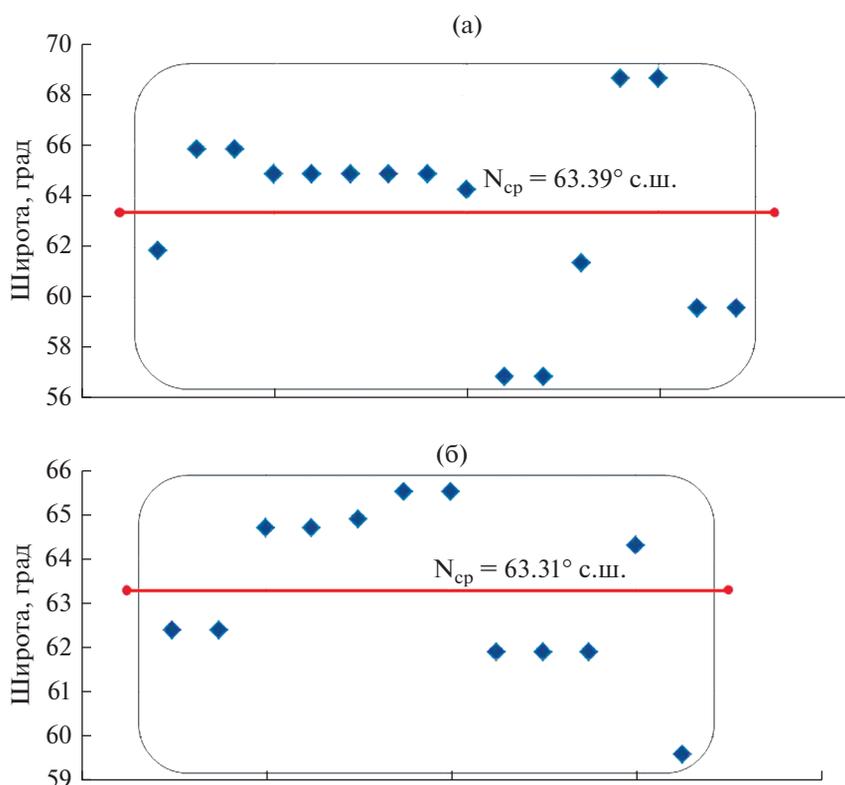
Однозначно ответить, какой из известных факторов (снежный покров, затененность, задымленность, хвойный опад и торф, влажность грунтов, скорость ветра) сдерживает рост температуры грунтов в 43% из рассмотренных нами скважинах на глубинах от 15 м до 30 м в хвойных лесах, пока не представляется возможным. Для этого требуются специальные исследования.

К сожалению, до последнего времени, кроме температуры грунтов в скважинах на разных глубинах, мы не собирали дополнительных данных о температуре воздуха и поверхности, высоте снежного покрова. Однако для одной скважины у нас имеются все необходимые данные. Расположена эта точка наблюдения (скважина 1М) в районе точки Olsky Pass-6 (Russia) около г. Магадана. В начале периода наблюдений в 2007 г. основным видом растительности на этой территории были кедровый стланик (60–180 см), лиственница (2–6 м), немногочисленные кустарники ольховника и березы (рис. 4а). Из-за этого при регистрации скважины на сайте GTN-P она была отнесена к “хвойным деревьям”. Однако через 10 лет на этой территории растительность в виде ольховника и березы стала преобладающей (рис. 4б).

Как изменялись температуры грунта на разных глубинах в этой скважине за период наблюдений? Если вести обработку данных по методике разовых замеров, выполняемых в сентябре каждого года, что было применено в настоящей работе при анализе данных GTN-P, то тренд температур

Рис. 3. Процент распределения количественной изменчивости признака, соответствующего положительной, отрицательной и нулевой динамике изменения температуры грунта в скважине за период наблюдений для различных видов растительности: (а) “хвойного леса”, (б) “тундры”, (в) “нет растительности”, (г) “кустарниковой тундры”, (д) “лесной тундры”.





**Рис. 4.** Распределение точек, обозначающих широту их расположения в северном полушарии, относительно среднего значения широты при положительной динамике изменения температуры в грунте в “хвойных лесах” для группы А (рис. 3а) и отрицательной или нулевой динамике изменения температуры в грунте в “хвойных лесах” для группы Б (рис. 3б).

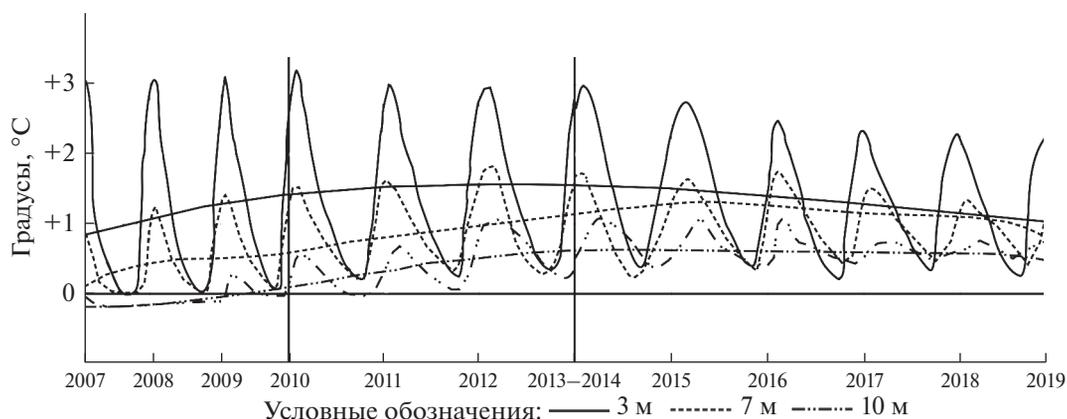


**Рис. 5.** Растительность около скважины 1М: (а) – 2002–2007 гг. (б) – 2018 г.

грунта с 2007 г. получается положительный. Так, для глубины 10.0 м с 2007 г. по 2019 г. температура выросла с  $-0.22^\circ\text{C}$  до  $+0.6^\circ\text{C}$ , для глубины 14.5 м – с  $-0.38^\circ\text{C}$  до  $+0.09^\circ\text{C}$ , 20.0 м – с  $-0.39^\circ\text{C}$  до  $-0.21^\circ\text{C}$ . Если же анализ температур на разных глубинах делать исходя из данных температур, полученных в результате непрерывных замеров проводимых через каждые 4 часа, то линия тренда приобретает другую форму. На рис. 5 видно, что с 2007 г. по 2013 г. тренд температур на глубинах 3, 7 и 10 м имел положительное значение. Но с 2012 г. для температур, измеряемых на глубине 3 м, по насто-

ящее время он уже стал отрицательным (рис. 5). С 2015 г. та же закономерность была отмечена для температур, измеряемых на глубине 7 м. На глубине 10 м отрицательного тренда вообще не было, но с 2013–2014 гг. и по настоящее время он стал нейтральным. По нашему мнению, именно растительность повлияла на изменение температуры в скважине 1М. Какие еще аргументы имеются в пользу этой гипотезы?

Во-первых, по нашим замерам, выполненным в летнее время в 2020 г., освещенность на поверхности почвы под кустарниками в месте располо-



**Рис. 6.** Результаты наблюдений за температурой грунтов в скважине 1М (в районе точки Olsky Pass-6) на разных глубинах с 2007 г. по 2019 г. С 2007 г. по 2010 г. наблюдения велись через каждые 4 ч, с 2010 г. — через 3 ч. Данные о наблюдениях с сентября 2013 г. по сентябрь 2014 г. отсутствуют из-за выхода из строя наблюдательного прибора. Линия тренда для 3 м представлена полиномиальной линией 3-й степени с двумя экстремумами, для 7 м — 6-й степени с 5 экстремумами, для 10 м — 4-й степени с 3 экстремумами.

жения скважины 1М в десять и более раз меньше по сравнению с открытой поверхностью.

Во-вторых, с 2013 г. нами были начаты наблюдения за температурой атмосферного воздуха над растительностью и температурой на поверхности почвы над скважиной 1 М. Если сравнивать полученную среднегодовую температуру атмосферного воздуха со среднегодовой температурой поверхности грунта, то за период наблюдений с 2013 г. по 2019 г. первая незначительно выросла с  $-1.4^{\circ}\text{C}$  до  $-1.3^{\circ}\text{C}$ , вторая снизилась с  $3.9^{\circ}\text{C}$  до  $3.0^{\circ}\text{C}$  за тот же период наблюдений. Мы считаем, что причиной этого явился интенсивный рост растительности. Именно увеличившаяся затененность поверхности в летнее время снизила интенсивность поступления тепла на поверхность грунта и явилась основной причиной, изменившей общий тренд наблюдаемых температур грунта на разных глубинах с положительного на отрицательный.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных сайта Global Terrestrial Network for Permafrost — Database (GTN-P) установлено, что на глубинах годовых теплооборотов от 14 до 30 м для растительных покровов, соответствующих классификации, принятой на сайте GTN-P: “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, “травяного покрова”, “без растительности”, “хвойного леса”, “лиственного леса” — в среднем у 72% точек происходит положительная динамика изменения температуры грунтов, остальные точки имеют отрицательную (21%) или нулевую динамику (7%). Растительность “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, а также мест, где “нет растительности”, имеет процентное отношение точек, где происходит рост температуры грунтов — 72–82%. Для “хвойных лесов” оно равно 57%. Для

точек, в которых “нет растительности”, и в “кустарниковой тундре” отрицательная динамика изменения температур (вместе с нулевой динамикой) составляет соответственно 18% и 20%. Для “тундры” этот показатель повышается до 26%, для “лесной тундры” — до 28%, для “хвойных деревьев” — до 43%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что растительность в виде хвойных деревьев из всех рассмотренных наилучшим образом способна защитить многолетнемерзлые грунты от их деградации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безайс Э.К. Условия почвообразования на Камчатке // Материалы по изучению русских почв. Вып. 20. СПб., 1911. С. 89–148.
- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре “Чабыда” (Центральная Якутия) // Наука и образование. 2017. № 2. С. 34–40.
- Гаврилова М.К. Изменение климата (температуры воздуха) на примере Западной Сибири и Якутии // В сб. материалов международных конференций “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, 2008. С. 217–220.
- Гулый С.А., Власов В.П. Особенности проектирования и строительства в условиях островного распространения вечномерзлых грунтов // Наука и техника в Якутии. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2019. № 1(36). С. 10–15.  
<https://doi.org/10.24411/1728-516X-2019-10002>
- Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 22–31.
- Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С. Оценка скорости подъема мерзлоты в лиственничниках Центральной Эвенкии методами дендрохронологии // Лесоведение. 2009. № 2. С. 77–80.

- Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36.
- Николаев А.Н., Федоров П.П. Влияние климатических факторов и термического режима мерзлотных почв Центральной Якутии на радиальный прирост лиственницы и сосны // Лесоведение. 2004. № 6. С. 3–13.
- Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 108–118.
- Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Варламов С.П. Изменение температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплосбалансовом стационаре за последние сорок лет: материалы IX Международного симпозиума “Проблемы инженерного мерзлотоведения”. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. С. 445–450.
- Скачков Ю.Б. Роль аномальных зим в межгодовой изменчивости термического режима многолетнемерзлых пород Центральной Якутии // Десятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: материалы докладов. Томск, 2013. С. 200–208.
- Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б., Варламов С.П. Потепление климата и мониторинг теплового состояния грунтов в Центральной Якутии // Проблемы геоэкологии. Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 31–39.
- Тыртиков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: МГУ, 1969. 192 с.
- Шац М.М., Скачков Ю.Б. Климат Севера: потепление или похолодание? // Климат и природа. 2016. № 2(19). С. 27–37.
- Biskaborn B.K., Lanckman J.-P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D.A., Cable W.L., Romanovsky V.E. The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) // Earth System Science Data. 2015. № 7. P. 245–259. <https://doi.org/10.5194/essd-7-245-2015>
- Donglin Guo, Huijun Wang Permafrost degradation and associated ground settlement estimation under 2°C global warming // Climate Dynamics. 2017. № 49. P. 2569–2583. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3469-9>
- Douglas T.A., Jorgenson M.T., Kanevski M.Z. Romanovsky V.E., Shur Y., Yoshikawa K. Permafrost Dynamics at the Fairbanks Permafrost Experimental Station Near Fairbanks, Alaska // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. 2008. P. 373–378.
- Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., Shestakova A.A. The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia // Polar Science. 2019. V. 22. P. 100483.
- Fisher J. P., Estop-Aragónés C., Thierry A., Charman D.J., Wolfe S.A., Hartley I.P., Murton J.B., Williams M., Phoenix G.K. The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest // Glob Change Bioljgy. 2016. № 22. P. 3127–3140. <https://doi.org/10.1111/gcb.13248>
- Global Terrestrial Network for Permafrost – Database. URL: <http://gtnpdatabase.org>
- Tonghua Wu, Yanhui Qin, Xiaodong Wu, Ren Li, Defu Zou, Changwei Xie Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai–Tibet Plateau from 1980 to 2013 // Theor Appl Climatol. 2018. № 132. P. 1187–1199. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2157-y>

## Analysing the Continuation of Permafrost Forming under the Coniferous Forests during the Global Warming

S. A. Gulyi<sup>1</sup>\*, Yu. B. Skachkov<sup>2</sup>, and M. S. Rozhina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>North-Eastern Permafrost Station of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, Portovaya st. 16, Magadan 685000 Russia

<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, Merzlotnaya st. 36, Yakutsk, 677013 Russia

\*E-mail: [svnims@mail.ru](mailto:svnims@mail.ru)

Based on the data from the Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) website, an analysis was made of the temperature change in permafrost soils over a period of observation from 3 to 35 years at depths of annual thermal cycles, from 14 to 30 m, for vegetation covers corresponding to the classification adopted on the GTN-P website: “tundra”, “forest tundra”, “shrub tundra”, “grass cover”, “no vegetation”, “coniferous forest”, “deciduous forest”. The analysis of the data obtained showed that out of all the observation plots considered, on average, 72% of the plots had a positive dynamics in the change in soil temperature. The rest have negative (21%) or stable dynamics (7%). An analysis for each type of vegetation showed that the vegetation of the “tundra”, “forest tundra” and “shrub tundra”, as well as the “no vegetation” areas, had approximately the same percentage of plots on which the ground temperature was on the rise – 72–82%. For “coniferous forests” it is equal to 57%. For wells located in places where the vegetation is represented by a “grass cover” in none of the observed points, a negative temperature change dynamics was recorded. For points where there is “no vegetation” and in “shrub tundra”, the negative dynamics of temperature changes (together with stable dynamics) is 18% and 20%, respectively. For the “tundra” this figure rises to 26%, for the “forest tundra” – up to 28%. Under coniferous trees, around 43% of the observed points the global warming was yet unable to overcome the existing insulation and cause degradation to permafrost soils. An observation plots’ location analysis in the northern hemisphere, with positive and negative (coupled with stable) temperature changes dynamics in the “coniferous forests” soils for showed that for those plots the latitudinal zonality does not affect the dynamics of soil temperature changes.

*Keywords:* permafrost soils, GTN-P, temperature in wells, coniferous trees.

## REFERENCES

- Bezais E.K., Usloviya pochvoobrazovaniya na Kamchatke (Conditions of soil formation in Kamchatka), In: *Materialy po izucheniyu russkikh pochv* (Materials on the study of Russian soils), Saint Petersburg, 1911, Vol. 20, pp. 89–148.
- Biskaborn B.K., Lanckman J.-P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D.A., Cable W.L., Romanovsky V.E., The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), *Earth System Science Data*, 2015, No. 7, pp. 245–259. DOI 10.5194/essd-7-245-2015
- Donglin Guo, Huijun Wang, Permafrost degradation and associated ground settlement estimation under 2°C global warming, *Climate Dynamics*, 2017, No. 49, pp. 2569–2583. DOI 10.1007/s00382-016-3469-9
- Douglas T.A., Jorgenson M.T., Kanevski M.Z., Romanovsky V.E., Shur Y., Yoshikawa K., Permafrost Dynamics at the Fairbanks Permafrost Experimental Station Near Fairbanks, Alaska, In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, 2008, pp. 373–378.
- Drozdov D.S., Ukrainitseva N.G., Tsarev A.M., Chekrygina S.N., Izmeneniya temperaturnogo polya merzlykh porod i sostoyaniya geosistem na territorii Urengoijskogo mestorozhdeniya za poslednie 35 let (1974–2008) (Change of permafrost temperature field and geosystem state on the Urengoy oil-gas-field territory during the last 35 years (1974–2008)), *Kriosfera Zemli*, 2010, Vol. 14, No. 1, pp. 22–31.
- Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., Shestakova A.A., The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia, *Polar Science*, 2019, Vol. 22, pp. 100483.
- Fisher J.P., Estop-Aragonés C., Thierry A., Charman D.J., Wolfe S.A., Hartley I.P., Murton J.B., Williams M., Phoenix G.K., The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest, *Glob Change Biology*, 2016, No. 22, pp. 3127–3140. DOI 10.1111/gcb.13248
- Gavrilova M.K., Izmenenie klimata (temperatury vozdukh) na primere Zapadnoi Sibiri i Yakutii (Climate change (air temperature) on the example of Western Siberia and Yakutia), *Cryogenic resources of polar and alpine regions. State and outlook of engineering geocryology*, Tyumen, V Proc. of International Conf., pp. 217–220.
- Global Terrestrial Network for Permafrost* – Database, available at: <http://gtnpdatabase.org>
- Gulyi S.A., Vlasov V.P., Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva v usloviyakh ostrovnogo rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov (Features of design and construction in the conditions of island distribution of permafrost soils), *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2019, Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, No. 1(36), pp. 10–15. DOI 10.24411/1728-516X-2019-10002
- Knorre A.A., Kirryanov A.V., Prokushkin A.S., Otsenka skorosti pod'ema merzloty v listvennichnikakh Tsentral'noi Evenkii metodami dendrokronologii (Estimation of rate of elevating permafrost table under Larch stands in the Cryolithozone of Central Evenkia by dendrochronological methods), *Lesovedenie*, 2009, No. 2, pp. 77–80.
- Malkova G.V., Pavlov A.V., Skachkov Y.B., Otsenka ustoychivosti merzlykh tolshch pri sovremennykh izmeneniyakh klimata (Assessing the stability of frozen strata under modern climate change), *Kriosfera Zemli*, 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 33–36.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Vliyanie klimaticheskikh faktorov i termicheskogo rezhima merzlotnykh pochv Tsentral'noi Yakutii na radial'nyi prirost listvennitsy i sosny (The influence of climatic factors and thermal regime of permafrost-affected soils on radial increment of pine and larch trees in Central Yakutia), *Lesovedenie*, 2004, No. 6, pp. 3–13.
- Reshet'ko M.V., Moiseeva Y.A., Klimaticheskie osobennosti i statisticheskie otsenki izmeneniya elementov klimata v raionakh vechnoi merzloty na territorii severa Zapadnoi Sibiri (Climatic features and statistical evaluation of climate change in permafrost regions in the north of Western Siberia), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2016, Vol. 327, No. 4, pp. 108–118.
- Shats M.M., Skachkov Y.B., Klimat Severa: poteplenie ili pokholodanie? (Climate of the North: warming or cooling?), *Klimat i priroda*, 2016, No. 2(19), pp. 27–37.
- Skachkov Y.B., Rol' anomal'nykh zim v mezhgodovoi izmenchivosti termicheskogo rezhima mnogoletnemerzlykh porod Tsentral'noi Yakutii (The role of anomalous winters in the interannual variability of the thermal regime of permafrost in Central Yakutia), *Desyatoe sibirskoe soveshchaniye po klimato-ekologicheskomu monitoringu* (Tenth Siberian meeting on climate and environmental monitoring), Tomsk, Abstracts of Papers, pp. 200–208.
- Skachkov Y.B., Skryabin P.N., Varlamov S.P., Izmeneniya temperatury gruntov sloya godovykh teplooborotov na yakutskom teplobalansovom stacionare za poslednie sorok let (Changes in soil temperature in the layer of annual heat exchanges at the Yakutsk heat balance station over the past forty years), *Problems of Engineering Permafrost*, Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, Proc. the IX International Symposium, pp. 445–450.
- Skryabin P.N., Skachkov Y.B., Varlamov S.P., Poteplenie klimata i monitoring teplovogo sostoyaniya gruntov v Tsentral'noi Yakutii (Climate warming and monitoring of the thermal state of soils in Central Yakutia), In: *Problemy geokriologii* (Challenges of permafrost studies), Yakutsk: Izd-vo SO RAN, 1998, pp. 31–39.
- Tonghua Wu, Yanhui Qin, Xiaodong Wu, Ren Li, Defu Zou, Changwei Xie, Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai–Tibet Plateau from 1980 to 2013, *Theor Appl Climatol*, 2018, No. 132, pp. 1187–1199, DOI 10.1007/s00704-017-2157-y
- Tyrtikov A.P., Vliyanie rastitel'nogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov (Influence of vegetation cover on freezing and thawing of soils), Moscow: MGU, 1969, 192 p.
- Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N., Rezul'taty 35-letnikh monitoringovykh issledovaniy kriolitozony na stacionare "Chabyda" (Tsentral'naya Yakutiya) (Results of 35 years of permafrost monitoring at the Chabyda station, Central Yakutia), *Nauka i obrazovanie*, 2017, No. 2, pp. 34–40.

УДК 630\*11+630\*18+574.45(571.1)

## ПРОДУКТИВНОСТЬ ДРЕВЕСНОГО ЯРУСА НА ВЕРХОВЫХ БОЛОТАХ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ<sup>1</sup>

© 2022 г. Н. Г. Коронатова<sup>а</sup>, \*, Н. П. Косых<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, просп. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090 Россия

\*E-mail: koronatova@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 15.10.2019 г.

После доработки 09.01.2020 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Проведена количественная оценка фракций живой и мертвой органической массы древесного яруса верховых болот таежной зоны Западной Сибири, где доминирует болотная форма сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. f. *litwinowii* с примесью сосны кедровой *P. sibirica* Du Tour. В результате дискриминантного анализа установлено значимое различие между модельными деревьями из южной, средней и северной тайги. Отдельно для каждой из таежных подзон получены полиномиальные уравнения регрессии, аппроксимирующие зависимости биомассы от диаметра ствола. Густота древесного яруса в болотах линейно уменьшалась к северу от  $20.3 \pm 6.6$  до  $3.5 \pm 0.9$  тыс. дер. га<sup>-1</sup>, что сопровождалось снижением суммарной фитомассы от 1057 до 333 г м<sup>-2</sup>, в то время как максимальный запас сухостоя и сухих ветвей отмечен в средней тайге. Максимальная масса корней в толще 0–30 см была в средней тайге, а минимальная – в северной. Характерно увеличение запаса корней сосен с глубиной в южной и средней тайге и снижение – в северной. Показано изменение структуры фитомассы и соотношения фракций вдоль широтного градиента. Надземная первичная продукция древесного яруса в южной, средней и северной тайге оценена в 70.7, 27.3 и 4.7 г м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> соответственно, с максимальным вкладом кедровой сосны в центре таежной зоны, не превышающим 5%. Вклад древесного яруса в общий запас фитомассы верховых болот уменьшался от 28% на юге территории до 9% на севере.

*Ключевые слова:* древесный ярус, *Pinus sylvestris* L. f. *litwinowii*, *P. sibirica* Du Tour, фитомасса, мортмасса, первичная продукция, верховые болота, таежная зона Западной Сибири.

DOI: 10.31857/S0024114822040052

Торфяные болота широко распространены на территории Западной Сибири, где они занимают 26% площади (Романова, 1985), или 1000330 км<sup>2</sup> (Yefremov, Yefremova, 2001), что составляет около 30% от всех торфяных болот умеренных широт (Moore, 2002). Поэтому болота данной территории играют существенную роль в формировании регионального, в том числе почвенного климата, регулировании речного стока, газовом обмене с атмосферой, а также вносят значимый вклад в глобальный круговорот углерода.

Преобладающим типом болот в Западной Сибири являются верховые, наиболее широко распространенные в таежной зоне, где занимают по разным оценкам от 216000 км<sup>2</sup> (Вомперский и др., 2005) до 336000 км<sup>2</sup> (Романова, 1985) и 416000 км<sup>2</sup> (Yefremov, Yefremova, 2001). При этом доля облесенных болот составляет в таежных подзонах от

50 до 58%, снижаясь до 39% в подтайге Западной Сибири (Вомперский и др., 2011).

Основной древесной породой верховых болот севера Европы и Сибири является сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., что отличает евразийские облесенные болота бореальной зоны от североамериканских, где преобладают лиственница американская *Larix laricina* (Du Roi) и ель черная *Picea mariana* (Mill.) Britt., Sterns&Pegg (Vitt, 1994). Сосновые ценозы болот Северной Евразии приурочены к наиболее дренированным участкам (Вомперский, Глухов, 1982). Сосны на верховых болотах характеризуются низкорослостью в связи с высоким уровнем стояния болотных вод, бедностью олиготрофных торфяных почв (Пьявченко, 1967; Биогеоэкологическое ..., 1982; Глебов, 1988) и недостаточным развитием опорной функции корней в рыхлом сфагновом очесе (Панов, 2007), и при высоте менее 10 м не бонитируются (Глебов, 1988). Высокая вариабельность среды на болотах приводит к внутривидовому формообразованию у деревьев (Минаева, Сирин, 2011). В за-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

висимости от линейных размеров и характера кроны выделяют несколько форм болотных сосен: *P. sylvestris* L. f. *uliginosa* Abol. высотой 10–12 м и кроной в верхней трети ствола; *P. sylvestris* L. f. *litwinowii* Sukacz. высотой 2–4 м и кроной в верхней части ствола; *P. sylvestris* L. f. *willkommii* Sukacz., имеющая вид деревца с обильным ветвлением от основания высотой 1–3 м; *P. sylvestris* L. f. *pumila* Abol., имеющая вид куста с обильным ветвлением от основания высотой до 1.5 м (Сукачев, 1973). Считается, что f. *willkommii* может быть как самостоятельной формой, так и переходить в f. *pumila* (Панов, 2007) либо быть подростом f. *litwinowii* (Лешок, Дыренков, 1988). Часто в качестве примеси к сосне обыкновенной на болотах встречается сосна сибирская кедровая *Pinus sibirica* Du Tour, которая в условиях олиготрофности и обводненности также приобретает специфические болотные формы (Храмов, Валуцкий, 1977; Велисевич, Чернова, 2014).

Согласно базе данных В.А. Усольцева (2007) о лесах Евразии, сведения о западносибирских болотных сосняках имеются главным образом для отдельных районов южнотаежной подзоны. Здесь параметры их фитомассы и продукции изучали Н.И. Пьявченко (1967), А.А. Храмов, В.И. Валуцкий (1977), Ф.З. Глебов (1988), С.П. Ефремов с соавт. (2005), Т.Т. Ефремова с соавт. (2008), Н.Г. Коронатова и Е.В. Миляева (2011), Е.А. Головацкая (2017). В более северных регионах данной территории такие исследования единичны (Махатков и др., 2007; Косых, Махатков, 2008).

Несмотря на значительную долю облесенных болот в Западной Сибири, при изучении круговорота углерода древесный ярус редко попадает в поле зрения исследователей по следующим причинам. Болотоведы-биогеоценологи сосредоточены на изучении основных продуцентов и эдификаторов – сфагновых мхов, а также травяно-кустарничкового яруса и используют методики, которые неприменимы для древесного яруса. Изучение запасов биомассы древесного яруса сфагновых болот требует модификации подходов, принятых в лесоведении, в связи с миниатюрностью болотных сосен. Хотя облесенные болота могут учитываться как леса (Торфяные болота ..., 2001), низкопродуктивные сосновые ценозы верховых болот обычно не представляют интереса для исследователей. Малодоступность западносибирских болот также обуславливает их меньшую изученность по сравнению с аналогичными экосистемами Северной Европы.

Цель данной работы – получение количественных оценок фракций биомассы и первичной продукции древесного яруса на верховых болотах в таежной зоне Западной Сибири, а также выявление закономерностей их изменения по широтному градиенту.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Ключевые участки располагались на верховых болотах разных таежных подзон Западно-Сибирской равнины (табл. 1). В пределах зоны распространения олиготрофных сфагновых болот деревья растут на повышенных, наиболее дренированных участках болотных микроландшафтов. К ним относятся гряды, которые входят в состав грядово-мочажинных и грядово-озерковых комплексов, а также сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы). В данной работе мы используем понятие “рям” как ландшафтную категорию для обозначения сосново-кустарничково-сфагновых гомогенных болот, которые встречаются на протяжении всей зоны олиготрофных сфагновых болот Западной Сибири (Храмов, Валуцкий, 1977; Боч, Мазинг, 1979; Лапшина, 2003; Филиппов, Лапшина, 2008; Терентьева и др., 2017). Основной породой, формирующей древесный ярус данных болот, является сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. с преобладающей формой f. *litwinowii*, а на высоких рямах – f. *uliginosa*. Также в небольшом числе часто присутствует сосна сибирская (кедровая) *P. sibirica*. В северной тайге, в зоне распространения бугристых болот, некоторые исследователи отмечают наличие на мерзлотных буграх редкой угнетенной сосны обыкновенной (Кац, 1941), либо лиственницы и кедровой сосны (Боч, Мазинг, 1979), либо всех перечисленных древесных пород (Пьявченко, 1985). Нами, как и в других современных работах (Москаленко, 2009), зафиксировано присутствие молодых деревьев сосны обыкновенной и иногда сосны кедровой на плоско- и крупнобугристых болотах в районе Сибирских Увалов.

В пониженных, наиболее обводненных болотных микроландшафтах – топях, мочажинах, ерсеях, которые образуют комплексы как с грядами, так и с мерзлотными буграми, – деревья не встречаются.

Сосны на верховых болотах отличаются низкорослостью и повышенной густотой (см. табл. 1) по сравнению с сосняками на суходолах, что потребовало модификации общепринятой методики. Во-первых, размер учетной площади сократили до 100 м<sup>2</sup>, поскольку на такой площади насчитывалось в среднем более 200 деревьев в южной тайге, где проводили первые исследования. В болотах средней и северной тайги применяли такую же методику, отработанную ранее в более южных районах. Небольшие размеры и вытянутая форма гряд обусловили выделение удлиненных прямоугольников для учета либо определяли площадь всей гряды. На выделенных площадях провели сплошной пересчет деревьев, подроста и сухостоя. Во-вторых, диаметр деревьев измеряли на уровне мохового покрова, поскольку измерение на высоте 1.3 м невозможно при средней высоте древес-

Таблица 1. Характеристика ключевых участков

Подзона	Название болота	Болотный микрорландшафт или его элемент	Географические координаты		Состав древесного яруса*	Число учетных площадей, шт.	Размер учетных площадок, м <sup>2</sup>	Густота древесного яруса, тыс. дер. га <sup>-1</sup> **			Высота деревьев, М***		Диаметр деревьев, мм***	
			с.ш.	в.д.				сосны обыкновенной	сосны кедровой	сухостоя	среднее значение	разброс значений	среднее значение	разброс значений
Южная тайга	Верх-Тарка	Рям	56°48'	78°42'	10С	1	10 × 10	11.3	0	2.4	1.0	0.4–2.5	25	6–90
	Плотниково	Гряды	56°48'	82°51'	10С, 10СедК	5	По размеру гряд 10 × 10	6.7 37.0 44.6	0 0 3.1	0.9 3.0 3.1	н.д. 1.5 1.0	н.д. 0.6–2.7 0.2–3.1	н.д. 37 25	н.д. 13–60 3–80
Средняя тайга		Рям	56°51'	82°50'	10СедК	2	10 × 10	11.1	0.1	1.2	1.4	0.6–2.0	31	10–50
	Юган	Рям	59°45'	75°37'	10СедК, 9С1К	3	10 × 10	11.0 24.0	0.2 0.5	0.8 1.1	1.3 1.9	0.5–2.7 0.7–5.1	26 45	5–85 6–200
		Гряды	59°39'	75°33'	8С2К	1	1.8 × 72	15.6	1.9	1.4	2.1	1.0–4.3	49	13–160
	Мухрино	Высокий рям	60°53'	68°39'	10Сед-КедБ	1	10 × 10	4.9	0	1.0	1.7	0.8–3.1	49	20–100
Северная тайга		Рям	60°53'	68°40'	10СедК	1	10 × 10	27.7	2.0	1.5	1.1	0.3–6.0	17	5–85
		Гряды	60°53'	68°40'	9С1К	4	1.5 × 10	13.0	2.0	1.7	1.2	0.3–3.3	26	5–90
	Нижневартовск	Гряды	60°54'	76°49'	9С1К	1	5 × 10	29.2	3.2	1.2	0.9	0.5–2.5	16	9–56
	Первое	Гряды	60°58'	69°45'	9С1К, 10С	2	5.5 × 10, 5.5 × 2.5	2.9 12.4	0.4 0	1.5 2.2	0.5 1.7	0.5–3.0 0.6–3.5	39 28	18–75 15–70
Северная тайга	Чистое	Рям	61°03'	69°27'	4С6К	1	10 × 10	1.9	2.4	0.4	1.8	0.5–5.2	33	11–64
	Неизвестное озеро	Гряды	61°20'	73°05'	10С	1	10 × 10	7.5	0	0.3	1.9	0.7–4.0	46	15–90
	Федоровское	Рям	61°25'	73°19'	9С1К	1	10 × 10	8.5	0.8	0.6	1.5	0.6–3.0	38	10–110
	Пограничное	Высокий рям	63°00'	75°12'	10С	1	10 × 10	4.2	0	0.1	2.7	0.5–7.0	70	10–290
		Рям	62°58'	75°11'	10С	1	10 × 10	4.2	0	0.3	2.4	0.4–5.3	54	5–120
	Тегу-Мамонтогий	Мерзлотный бугор	63°13'	75°43'	10С	1	10 × 20	0.5	0	0.05	1.0	0.5–1.8	30	8–45
Западно-Ноябрьское	Гряды	63°20'	75°22'	7С3К	7	1.5 × 10	2.5	1.7	0.5	1.7	0.4–3.7	37	8–80	
	Рям	63°20'	75°21'	10СедК	1	10 × 10	6.0	0.2	0.8	1.1	0.3–2.6	21	5–65	

\* Определен по количеству деревьев: С – сосна обыкновенная; К – сосна кедровая; Б – береза пушистая.

\*\* Включает все деревья высотой от 30 см и возрастом от 10 лет.

\*\*\* Данные высоты и диаметра приведены для сосны обыкновенной старше 20 лет.

ного яруса, составляющей полтора метра, а изменение на уровне шейки корня затруднено в связи с обрастанием мхами и погребением ствола в моховом очесе, так что шейка оказывается на глубине 30–40 см от поверхности болота. Точность измерения диаметра составила 1 мм в связи с малым средним диаметром древесного яруса (около 36 мм). Такие же подходы к оценке таксационных показателей древесного яруса болот можно найти в работах А.А. Храмова и В.И. Валуцкого (1977), Е.А. Романовой (1980), С.Э. Вомперского и др. (1982), Е.А. Головацкой (2017). Высоту деревьев измеряли с точностью до 1 см. Возраст деревьев установили по годичным кольцам срубленных модельных деревьев. Для расчета запасов фракций биомассы и первичной продукции на учетных площадках отбирали по 5–8 модельных сосен высотой от 30 см до 3 м и диаметром ствола 3–70 мм, включая ствол, погруженный в моховой очес, с комлем. Всего с 2006 по 2015 гг. отобрано 115 модельных деревьев болотной формы *f. litwinowii*: 39, 52 и 24 экземпляра в болотах южной, средней и северной тайги, соответственно (от 5 до 15 на каждой учетной площади). Полевые работы велись во второй половине августа или в сентябре, когда вегетация заканчивается.

Для учета корней отбирали почвенные монолиты вглубь от уровня поверхности болота, т.е. от поверхности сфагнового покрова. Такой подход принят при оценке продуктивности верховых болот (Титлянова, 2007; Kosykh et al., 2008; Головацкая, 2009) и связан с тем, что верхний живой слой сфагнового покрова, мощностью в единицы сантиметров, с глубиной обычно без явных морфологических признаков переходит в отмерший очес и далее в торф, образуя единый слой со сходными физическими свойствами плотности, пористости, водоудержания. Для сосудистых растений этот почвенно-моховой слой является субстратом, поверх которого они поселяются, формируют побеги с фотосинтезирующими органами, в то время как корни трав и кустарничков обнаруживаются уже в поверхностном живом слое мха. Поэтому части растений, расположенные выше поверхности болота (мохового покрова) принято относить к наземной фитомассе, а ниже — к подземной. Монолиты объемом 1 дм<sup>3</sup> отбирали послойно до глубины 30 см. Всего отобрано 104 монолита, из них 75 — в средней тайге, 12 — в южной и 17 — в северной (кроме бугристого болота). Для изучения распределения корней сосны в торфяной почве в ряме болотного комплекса Мухрино между двумя соснами, растущими на небольших кочках на расстоянии 2.05 м и с выровненным моховым покровом между ними, отбирали монолиты через каждые 15–20 см с отступом от стволов деревьев в 10 см. Отбор проводили послойно до глубины 40 см, поскольку болотные воды стояли ниже 45 см.

Высота одного дерева была 135 см, диаметр 28 мм, другого — 173 см и 40 мм соответственно.

В лаборатории модельные деревья разбирали на фракции хвои, ветвей и ствола выше и ниже мохового покрова, а также сухих побегов (сухие ветви и не опавшая сухая хвоя вместе). Разделение ствола на фракции коры и древесины не проводили. Хвою и ветви, в свою очередь, делили на приросты текущего года и предыдущих лет. Фракции высушивали и взвешивали. Возраст модельных деревьев варьировал от 10 до 60 лет; один экземпляр, отобранный в среднетаежном Сургутском полесье, насчитывал 90 лет, что, по нашим данным, близко к предельному времени жизни сосен на олиготрофных сфагновых болотах. С возрастом увеличивались диаметр и высота деревьев. В среднем сосны от 20 лет и старше обладали диаметром  $\geq 10$  мм и высотой над уровнем мохового покрова 40–60 см.

Фитомассу разных фракций аппроксимировали полиномиальными уравнениями второй степени в зависимости от диаметра ствола на уровне мохового покрова, что обеспечило получение наибольшего коэффициента детерминации  $r^2$  (табл. 2). Наиболее надежные результаты получены для фракций ствола выше и ниже мохового покрова. Высокие значения коэффициентов детерминации получены для деревьев, которые растут в южной и северной тайге. Средняя тайга включала в данное исследование наиболее протяженную по широте территорию с большим набором ключевых участков, что явилось причиной более низких значений коэффициентов детерминации. Недостатком использования этого типа уравнений явилось то, что в ряде случаев регрессионная кривая уходила в отрицательную область при наименьших значениях диаметра ствола. Поэтому на начальном этапе мы аппроксимировали массу фракций степенными уравнениями для деревьев с диаметром ствола менее 25 мм и полиномиальными — для более крупных модельных деревьев, а затем суммировали результаты для всего древесного яруса на учетной площади. Оказалось, что разница между результатами, полученными обоими способами, составляет от 0.4 до 4.1% как в большую, так и в меньшую сторону, в среднем 1.7%. То есть использование полиномиальных регрессий допустимо для расчета фитомассы всего древесного яруса, но непригодно для группы деревьев с минимальными диаметрами ствола. В северной тайге построение моделей проводили отдельно для деревьев сфагновых олиготрофных и плоскобугристых болот, поскольку их морфометрические и весовые показатели существенно отличались между собой. Число модельных деревьев с мерзлотного плоскобугристого болота составило четыре.

Генеративные органы (стробилы, шишки) встречались среди модельных деревьев возрастом

**Таблица 2.** Параметры уравнения зависимости фракций фитомассы модельных деревьев от диаметра ствола на уровне мохового покрова, полинома второй степени\*

Фракция фитомассы	Коэффициенты			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	детерминации $r^2$
Южная тайга ( $N = 39$ )				
Хвоя текущего года	0.0254	0.0917	-0.0582	0.956
Хвоя прошлого года	0.0306	0.0585	-0.2133	0.885
Трехлетняя хвоя	0.0250	-0.0995	0.7414	0.855
Хвоя 4-х и более лет	0.0060	0.2774	-2.1373	0.863
Ветви текущего года	0.0052	0.0393	-0.2324	0.886
Ветви прошлого года	0.0276	-0.7971	4.9316	0.839
Трехлетние ветви	0.0083	-0.0275	0.1549	0.937
Ветви 4-х и более лет	0.0705	1.0062	-8.3616	0.878
Надземная часть ствола	0.0913	3.7093	-22.6590	0.986
Часть ствола, погребенного мхом, и комель	0.1249	2.9011	-15.4780	0.937
Сухие ветви	-0.0395	3.2241	-17.3580	0.639
Средняя тайга ( $N = 52$ )				
Хвоя текущего года	-0.0075	1.2853	-7.7307	0.696
Хвоя прошлого года	-0.0047	1.3557	-8.0100	0.730
Хвоя трехлетняя	0.0011	1.1785	-7.5940	0.628
Хвоя четырехлетняя и старше	0.0039	1.1118	-8.3242	0.584
Ветви текущего года	-0.0015	0.2781	-1.6787	0.692
Ветви прошлого года	-0.0021	0.3247	-1.5865	0.682
Ветви трехлетние	-0.0022	0.3643	-1.7657	0.502
Ветви четырехлетние и старше	-0.0137	6.6325	-51.1470	0.674
Надземная часть ствола	0.1374	3.8854	-28.7280	0.955
Часть ствола, погребенного мхом, и комель	0.0959	4.0881	-24.7150	0.868
Сухие ветви	0.0019	2.8488	-24.5910	0.623
Северная тайга ( $N = 24$ )				
Хвоя текущего года	0.0039	0.1605	-0.4664	0.882
Хвоя прошлого года	0.0016	0.6196	-2.4420	0.916
Хвоя трехлетняя	-0.0080	0.8018	-3.6567	0.854
Хвоя четырехлетняя и старше	-0.0054	0.7179	-1.2208	0.447
Ветви текущего года	0.0018	0.0110	0.0737	0.916
Ветви прошлого года	0.0015	0.0732	-0.2170	0.938
Ветви трехлетние	-0.00007	0.1205	-0.4435	0.943
Ветви четырехлетние и старше	-0.0105	1.7930	-8.5726	0.836
Надземная часть ствола	0.6220	-10.2690	42.7260	0.995
Часть ствола, погребенного мхом, и комель	0.1833	0.3142	-2.6689	0.971
Сухие ветви	-0.0086	1.4013	-8.2968	0.871
Все таежные подзоны ( $N = 21$ )				
Шишки	-0.0007	0.3987	-4.8177	0.360

\*  $y = AX^2 + BX + C$ .

16 лет и старше, диаметром не менее 8 мм и высотой над моховым покровом не менее 45 см. Поскольку доля модельных деревьев с генеративными органами составила чуть более 18%, для оценки фитомассы шишек построили уравнение аппроксимации без разделения по подзонам. Коэффициент детерминации в этом случае составил 0.360, так что полученный результат можно расценивать как ориентировочный.

Модельные деревья сосны кедровой (9 экз.) отобраны на двух болотах: болоте Чистом и грядах Западно-Ноябрьского болота, а полученные регрессионные зависимости применены для деревьев по всей Западной Сибири. Несмотря на достаточно высокие значения коэффициентов детерминации (около 0.9 для части ствола выше и ниже мохового покрова, 0.8 — для многолетних ветвей и хвои, 0.6 — для ветвей и хвои текущего года), малая выборка заставляет рассматривать полученные результаты как предварительные, а коэффициенты регрессионных уравнений не приводятся.

Сухостой на болотах чаще всего представлял собой стволы без ветвей, так что его запас рассчитывали по уравнениям аппроксимации для фракции живых стволов выше и ниже мохового покрова. Сухостой и сухие ветви вместе называли морт-массой.

Первичная продукция (нетто-продукция) характеризует интенсивность образования биомассы за определенный период. Надземную первичную продукцию определяли как сумму запасов хвои и ветвей текущего года. Прирост стволовой древесины напрямую не определяли, а рассчитывали, исходя из соотношения годичного радиального прироста ствола к годичному приросту ветвей, равному 2 : 1 (Храмов, Валуцкий, 1977; Воуперский, Иванов, 1982). Прирост многолетних ветвей в толщину считали равным нулю. Оценка подземной продукции деревьев не проведена, поскольку корректное определение возможно на основе изучения динамики запасов корней в течение лета, что в этой работе не было предусмотрено.

Для характеристики почвенных физико-химических условий роста деревьев в болотах проводили замеры портативными приборами в близлежащих топях и мочажинах, которые являются приемниками болотных вод, стекающих с гряд, рямов, бугров. Кислотность болотных вод определяли портативным рН-метром ИТ-1101 (ООО «Измерительная техника», Москва), а общее содержание растворимых солей — солемером HANNA Dist-1 (HANNA Instruments, Германия).

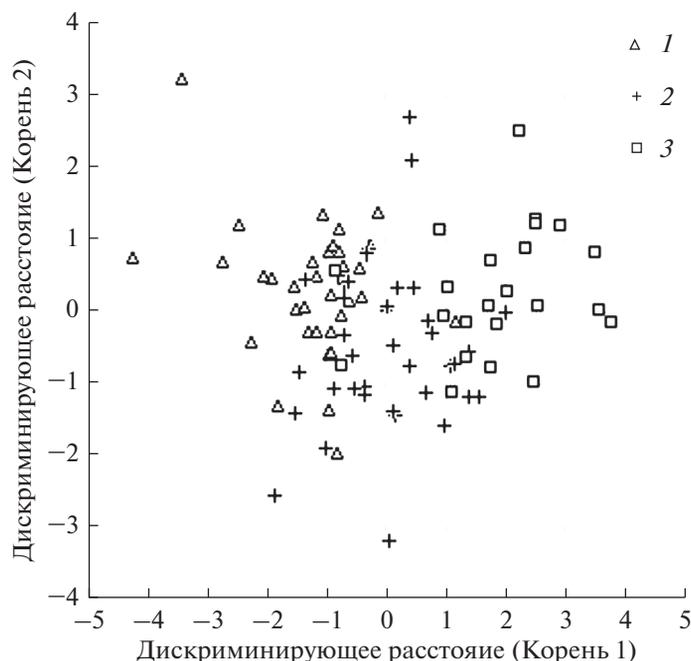
Полиномиальная регрессия, уравнения и степень детерминации зависимости массы фракций деревьев от диаметра ствола на уровне мохового покрова были получены в программе Microsoft Excel 7.0. Для подтверждения гипотезы, что сос-

ны, которые растут на сфагновых олиготрофных болотах в разных таежных подзонах, различаются параметрами фитомассы, в программе Statistica 8 применили процедуру дискриминантного анализа, где группирующим фактором выступили таежные подзоны, а независимыми переменными — запасы фракций фитомассы (хвоя текущего года и многолетняя, ветви текущего года и многолетние, ствол выше мохового покрова и часть ствола, погребенного мхом). Предварительно данные по разным фракциям фитомассы модельных деревьев подвергли логарифмическому преобразованию. Такой же анализ, где группирующим фактором был тип болотной экосистемы (рям и гряда), не выявил достоверных различий. В анализ включили модельные деревья олиготрофных сфагновых болот южной, средней и северной тайги и исключили модели из мерзлотного плоскобугристого болота северной тайги. Различия считали достоверными при значении уровня значимости  $P < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы ключевых сфагновых болот торфяные олиготрофные, бугристых болот — торфяные мерзлотные. Болотные воды в почвах ключевых участков стояли на глубине 20–50 см от поверхности мохового покрова. На сфагновых олиготрофных болотах в южной, средней и северной тайге средние значения рН были 3.6, 3.7 и 3.8, а содержание солей — 39, 34 и 26 мг л<sup>-1</sup> соответственно. В топях плоскобугристого мерзлотного болота рН 3.7, содержание солей — 20 мг л<sup>-1</sup>. Кислая реакция и чрезвычайно низкая минерализация типичны для верховых болот.

Дискриминантный анализ показал, что по запасам фракций фитомассы модельные деревья из южной и северной тайги достоверно различаются, а деревья из средней тайги занимают промежуточное положение, образуя в плоскости двух первых канонических дискриминантных функций совместные области как с северотаежными, так и с южнотаежными деревьями (рис. 1). Только первая дискриминантная функция статистически значима ( $P < 0.00001$ ) разделяла модельные деревья из разных подзон: собственное значение — 1.314104, коэффициент канонической корреляции — 0.75, критерий  $\chi^2 = 87.74226$  при числе степеней свободы 12. При этом различия между средними значениями зависимой переменной дискриминантных функций во всех трех исследуемых группах статистически значимы ( $P < 0.0001$ ). Наибольший вклад в дискриминацию трех исследуемых групп внесли фракции фитомассы хвои текущего года и прошлых лет ( $P < 0.0001$ ), а также части ствола выше мохового покрова ( $P = 0.0024$ ), в то время как фракции ветвей текущего года и части ствола, погребенного мхом, имели статистически значимое, но слабое влияние ( $P < 0.02$ ), а фракции мно-



**Рис. 1.** Распределение модельных сосен в плоскости двух первых канонических дискриминантных функций: 1 – южная тайга; 2 – средняя тайга; 3 – северная тайга. Показатель лямбда Уилкса = 0.3833,  $f$ -критерий = 9.1256,  $P < 0.00001$ . Расстояния Махаланобиса между центроидами подзон следующие: южная тайга – средняя тайга 1.9006, средняя тайга – северная тайга 3.7255, южная тайга – северная тайга 8.8013.

голетних ветвей – незначительное ( $P > 0.05$ ). Полученный результат послужил обоснованием расчета биомассы и продукции древесного яруса болот отдельно для каждой из таежных подзон.

Густота древесного ценоза составила  $20.3 \pm 6.6$  тыс. дер.  $\text{га}^{-1}$  в южной тайге,  $12.5 \pm 2.6$  – средней и  $3.5 \pm 0.9$  – северной, линейно уменьшаясь с юга на север. Средняя высота на рямах и грядах (без учета высоких ям) в южной тайге была  $106 \pm 3$  см, средней –  $103 \pm 3$  см, северной –  $137 \pm 11$  см; средний диаметр у поверхности мохового покрова  $25 \pm 1$ ,  $20 \pm 1$  и  $28 \pm 2$  мм соответственно. Известно, что древесному ярусу в болотах присуща абсолютная разновозрастность (Ефремов и др., 2005). Возраст сосен на ключевых участках во всех подзонах ограничивался обычно 80–100 годами, причем большая доля пришлась на деревья до 40 лет. Имеются сведения, что самые старые деревья на болотном массиве Мухрино достигают 250 лет и более при диаметре ствола около 18 см (Blanchet et al., 2016), что заставляет предположить их приуроченность к высоким рямам; на наших учетных площадках на этом же болоте таких старых и крупных сосен не встречалось.

Значительная доля сосны кедровой в составе древесного яруса отмечена только в двух местах – на Чистом болоте и грядах Западно-Ноябрьского болота, где средняя высота деревьев была  $64 \pm 16$  и  $26 \pm 3$  см, а средний диаметр –  $17 \pm 4$  и  $4 \pm 1$  мм соответственно. Возраст кедровой сосны на болотах за редким исключением не превышал 40 лет.

Суммарная усредненная надземная и подземная фитомасса древесного ценоза составила 1057, 613 и 333  $\text{г м}^{-2}$  в южной, средней и северной тайге (табл. 3). Эти данные оказались ниже, чем по оценкам многих авторов. Так, фитомасса сосняка кустарничково-сфагнового болота в европейской части России была 39.4  $\text{т га}^{-1}$  (Вомперский, Иванов, 1978), а такого же сосняка на юге Западной Сибири – 32.4  $\text{т га}^{-1}$  (Пьявченко, 1967). Однако в обоих случаях речь шла о высоких рямах, что можно утверждать в первом случае в связи с приведенной оценкой высоты первого яруса деревьев (9 м), а во втором случае – по уточнению, что ценоз сложен не только *f. litwinowii*, но и *f. uliginosa*. Такие же высокие оценки (22.7–33.9  $\text{т га}^{-1}$ ) есть в работе С.П. Ефремова с соавт. (2005): авторы уточняют, что данные приведены для низких рямов. Возможно, в их работе высокая оценка связана с иным методическим подходом, основанным на расчете запасов фракций фитомассы с помощью конверсионных коэффициентов в зависимости от объема стволовой древесины, либо обусловлена очень высокой плотностью древесного яруса, которая, к сожалению, не указана в работе. С другой стороны, в работе Е.А. Головацкой (2017) средняя надземная фитомасса сосен на Бакчарском болоте, где мы тоже проводили исследование, близка к нашим оценкам. Усредненный по подзонам вклад кедровой сосны в общую фитомассу древесного ценоза составил в средней тайге 14%, а в остальных подзонах был незначителен.

Таблица 3. Запасы фракций фитомассы древесного яруса, г м<sup>-2</sup>

Фракция фитомассы	Южная тайга	Средняя тайга	Северная тайга
<b>Сосна обыкновенная</b>			
Хвоя:			
текущего года	49.5 ± 13.1	14.1 ± 1.9	2.9 ± 0.2
прошлого года	56.9 ± 15.1	18.0 ± 2.3	3.6 ± 0.5
трехлетняя	41.7 ± 11.2	19.7 ± 2.5	1.9 ± 1.0
четырёхлетняя и старше	18.8 ± 4.8	19.8 ± 2.6	3.4 ± 0.9
Ветви:			
текущего года	10.6 ± 2.8	5.9 ± 0.8	0.9 ± 0.1
прошлого года	23.2 ± 6.9	3.8 ± 0.5	1.2 ± 0.1
трехлетние	14.0 ± 3.7	4.4 ± 0.6	0.8 ± 0.1
четырёхлетние и старше	153.8 ± 40.0	82.1 ± 10.1	7.3 ± 1.6
Ствол:			
выше мохового покрова	285.0 ± 72.9	185.1 ± 26.6	195.2 ± 47.4
погребенный мхом + комель	323.7 ± 83.8	156.1 ± 21.8	79.8 ± 12.4
Генеративные органы	6.3 ± 1.6	2.9 ± 0.9	1.1 ± 0.3
Сухие ветви	41.1 ± 9.2	39.3 ± 5.0	4.9 ± 1.2
Сухостой:			
выше мохового покрова	29.6 ± 4.3	128.6 ± 50.0	49.0 ± 24.4
ниже мохового покрова + комель	38.9 ± 5.4	102.6 ± 36.8	19.0 ± 9.5
Корни в слое 0–30 см	73.6 ± 23.4	100.9 ± 11.1	34.6 ± 8.2
<b>Сосна кедровая</b>			
Хвоя	0.4 ± 0.3	15.1 ± 9.0	0.4 ± 0.2
Одревесневшие части:			
надземные	0.8 ± 0.7	41.1 ± 25.0	0.9 ± 0.5
подземные + погребенные мхом	0.4 ± 0.3	31.9 ± 18.9	0.9 ± 0.5
Сухие ветви	0.01 ± 0.01	0.7 ± 0.2	0.1 ± 0.1

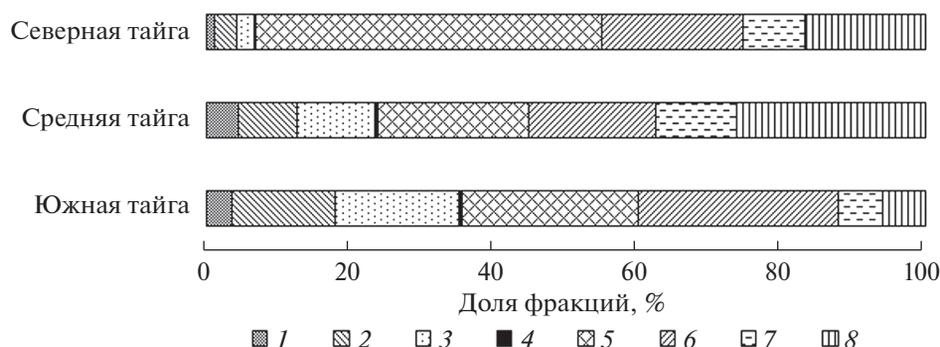
Примечание. С учетом ошибки среднеарифметического.

Запасы отдельных фракций в южной, средней и северной тайге составили соответственно 167, 72 и 12 г м<sup>-2</sup> для хвои; 202, 96 и 10 г м<sup>-2</sup> — для ветвей; 587, 341 и 275 г м<sup>-2</sup> — для ствола, включая часть, погребенную мхом. Запасы большинства фракций надземной и подземной фитомассы снижались от южной тайги к северной. Запасы хвои четырех лет и более, а также сухих ветвей, включая хвою, сходны в южной и средней тайге, а запас стволов выше мохового покрова сравним в средней и северной тайге.

В отличие от запаса фракций на единице площади, фитомасса фракций ствола в расчете на одно дерево увеличилась к северу, масса шишек была сходной в южной и северной тайге и уменьшилась в средней, а максимальная масса сухих ветвей пришлась на одно дерево в средней тайге (табл. 4). Масса хвои и веток на одном усредненном дереве также уменьшалась к северу, как и их площадные запасы.

В структуре фитомассы характерно снижение с юга на север доли хвои, ветвей и шишек от общего запаса (рис. 2). Древесный ценз в средней тайге отличался максимальным вкладом живых корней, сухих ветвей и сухостоя, а в северной — ствола выше мохового покрова. Полученные различия в структуре фитомассы соснового ценза разных таежных подзон подтверждают важность ее учета при оценке продуктивности древесного яруса разных регионов (Усольцев и др., 2018).

Максимальный запас корней на единице площади наблюдался в средней тайге, а при пересчете на одно дерево приходилось в среднем 36, 81 и 99 г корней в толще 0–30 см в южной, средней и северной тайге соответственно. В этом же ряду отношение всей фитомассы к его корням составило 13, 5 и 9 в пересчете на одно усредненное дерево. Это в целом согласуется с данными об увеличении фитомассы сосущих корней к северу с понижением среднегодовой температуры, полу-



**Рис. 2.** Соотношение запасов фракций на единице площади в древесном ярусе болот таежных подзон: 1 – сухие ветви; 2 – хвоя; 3 – ветви; 4 – шишки; 5 – ствол выше мохового покрова; 6 – часть ствола, погребенная мхом, и комель; 7 – корни мелкие (до 2 мм в диаметре); 8 – сухостой.

ченными для сосняков на минеральных почвах в Европе (Zadworny et al., 2016), что авторы объясняют адаптацией к снижению доступных ресурсов в более холодных почвах. Нарушение данной закономерности между средней и северной тайгой в нашей работе связано, вероятно, с разной обводненностью болот в этих подзонах.

В послойном вертикальном распределении корней сосен установлены следующие особенности. В северной тайге их запас снижался с увеличением глубины, составив 42% в толще 0–10 см, 37% – 10–20 см и 21% – 20–30 см. Снижение запаса корней с глубиной считается типичным для болотных сосняков (Згуровская, 1963). Однако в более южных районах нами получены данные, которые, напротив, свидетельствуют об увеличении запаса корней сосен с глубиной: в толще 0–10 см он составил 17 и 23%, 10–20 см – 39 и 32%, 20–30 см – 43 и 45% в южной и средней тайге соответственно. Такое распределение кажется труднообъяснимым для экосистем с близким стоянием болотных вод в почвенном профиле. Полагаем, что оно может быть связано с обогащением нижележащих горизонтов элементами питания в

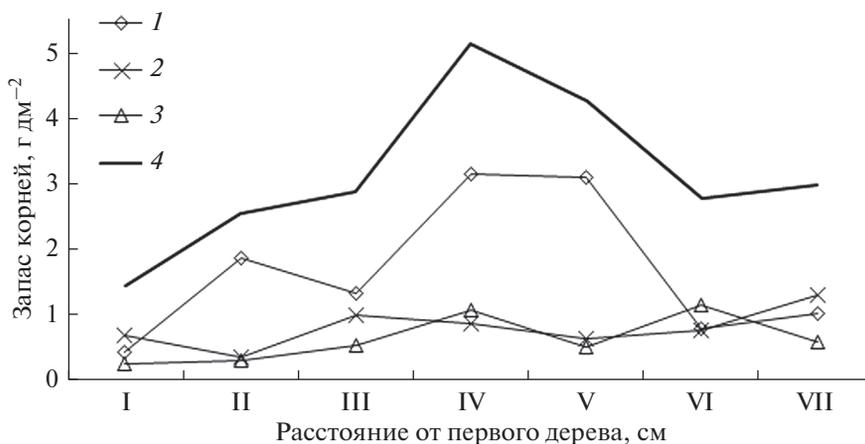
зоне периодического присутствия болотных вод, где деструкция торфа более интенсивна по сравнению с деструкцией вышележащего мохового очеса. Так, потери органического вещества при экспериментальной полевой деструкции в южной тайге за два года составили для мохового очеса из поверхностного слоя 26% (Вишнякова, Миронычева-Токарева, 2014), а для торфа, залегающего глубже, – 45% (Коронатова, 2010).

Более подробное изучение вертикального распределения фракций корней проведено на болоте Мухрино в средней тайге (рис. 3). Показано, что мелкие корни (диаметром менее 1 мм) были единственной фракцией на глубине 0–10 см и преобладали на глубине 20–40 см; фракция средних корней (1–3 мм) преобладала в толще 10–20 см и снижалась с глубиной; фракция крупных корней (более 3 мм) достигала максимума на глубине 30–40 см. Такое распределение отражало выполняемые функции и время жизни подземных органов: долгоживущие крупные проводящие корни находились на максимальной глубине, куда постепенно погружались с нарастанием вверх мохового покрова; отходящие от них средние корни нараста-

**Таблица 4.** Масса фракций фитомассы в расчете на одно дерево сосны обыкновенной

Фракция фитомассы, г	Таежная подзона		
	южная	средняя	северная
Хвоя	82.2	57.3	33.5
Ветви	99.3	77.0	29.1
Шишки	3.1	2.3	3.1
Ствол выше мохового покрова	140.4	148.1	557.7
Часть ствола, погребенного мхом	159.4	124.9	227.9
Корни	36.3	80.7	98.9
Сухие ветви	20.2	31.5	13.9
Сухостой	33.7	185.0	194.3

Примечание. Масса фракций рассчитана как отношение фракций согласно табл. 3 к средней густоте деревьев в подзоне.



**Рис. 3.** Распределение корней различного диаметра до глубины 40 см между двумя соснами, растущими на расстоянии 205 см друг от друга. Расстояние от первого дерева (см): I – 10–20; II – 38–48; III – 68–78; IV – 95–105; V – 128–138; VI – 158–168; VII – 185–195. Диаметр корней: 1 – <1 мм; 2 – 1–3 мм; 3 – >3 мм; 4 – все корни.

ли вверх вслед за повышающейся поверхностью; короткоживущие, быстро обновляющиеся мелкие сосущие корни оказывались в обогащенных элементами питания местах – в поверхностном слое, куда поступает свежий опад, и ниже 20 см, где более интенсивны процессы деструкции органического вещества. Оказалось также, что в толще 30–40 см содержится 36% от общего запаса, т.е. в условиях достаточно низкого стояния болотных вод треть массы корней может быть сосредоточена ниже 30 см. Отрицательная геотропия корневых систем болотных сосен, превышение их радиуса над радиусом кроны характерны для изученных сосен и также установлены Л.Н. Згуровской (1963). Особенностью наших результатов является отсутствие снижения запаса корней с глубиной, что мы объясняем интенсивным линейным ростом сфагновых мхов на ключевых участках (Косых и др., 2017) и деструкционными процессами на нижней границе аэробной толщи торфа.

При изучении горизонтального распределения корней сосны в торфяной почве установлено, что максимальный запас сосредоточен на наибольшем удалении от стволов деревьев, причем он обеспечен в основном мелкими сосущими корнями (см. рис. 3). Запас средних и крупных

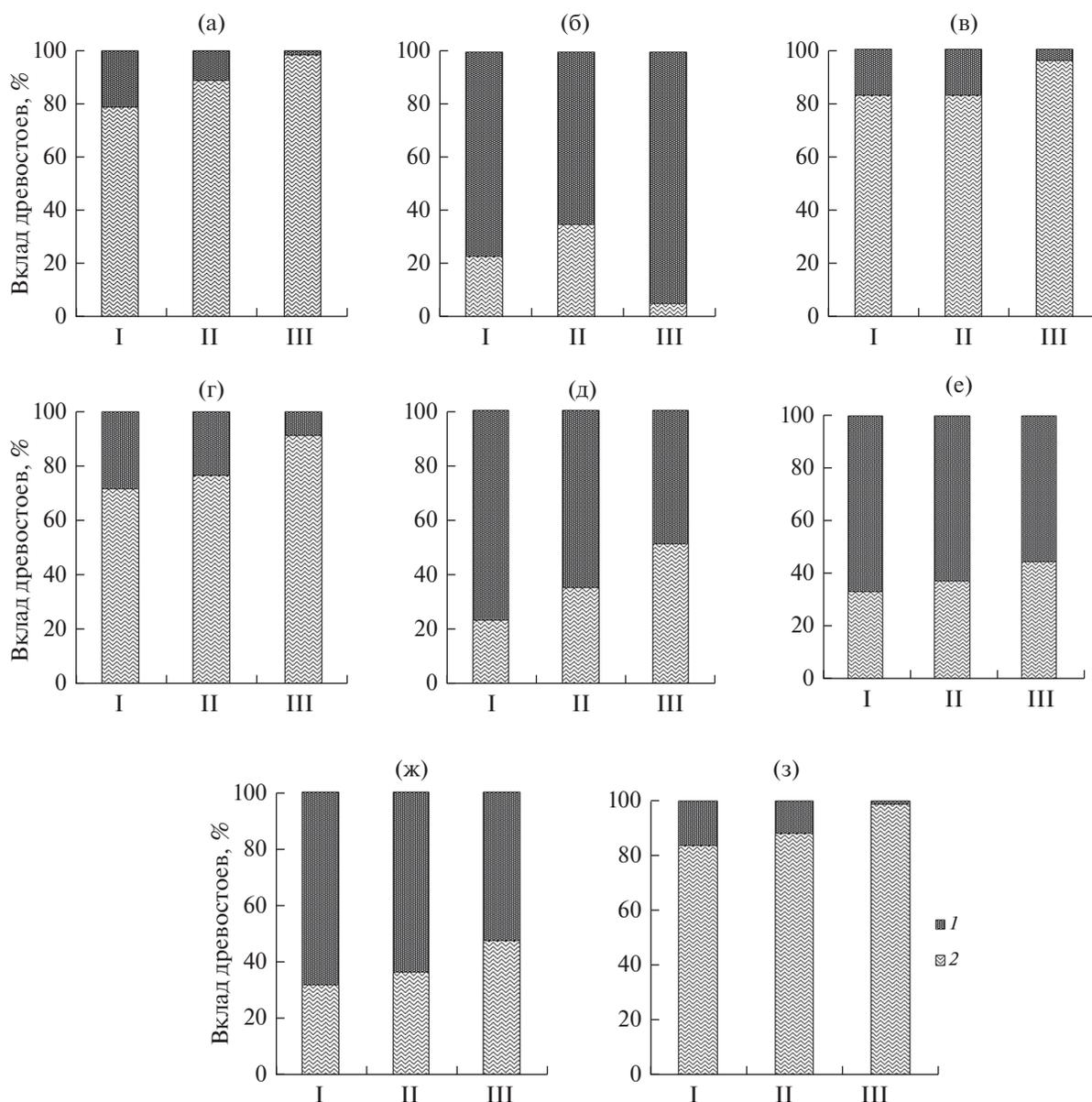
корней постепенно возрастал по направлению к более высокому дереву.

Надземная первичная продукция древесного яруса в южной, средней и северной тайге составила  $70.7 \pm 17.7$ ,  $27.3 \pm 3.9$  и  $4.7 \pm 0.6$  г м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> соответственно, включая сосну кедровую, причем ее вклад в общую продукцию древесного яруса был незначителен на юге территории и увеличился до 5% в средней тайге и 2% – в северной.

Для оценки участия древесного ценоза болот в биотическом круговороте углерода важны соотношения компонентов, из которых складывается общий запас органического вещества растительности (табл. 5). В пределах зоны распространения сфагновых олиготрофных болот (таежная зона) с юга на север происходит увеличение доли ствола выше мохового покрова по сравнению с погребенным в мох, а также доли нефотосинтезирующей фитомассы по сравнению с фотосинтезирующей. Отношения хвои к корням и генеративным органам показывают, что к северу меньше пластических веществ направляется на постройку ассимиляционного аппарата и больше – на продукцию корней и органов размножения деревьев. Известно, что доля хвои сосен выше в оли-

**Таблица 5.** Соотношение фракций фитомассы и время оборота вещества в зависимости от таежной подзоны

Соотношение	Южная тайга	Средняя тайга	Северная тайга
Нефотосинтезирующая фитомасса : хвоя	5.3	7.6	27.4
Ствол над моховым покровом : часть ствола, погребенная мхом	0.9	1.2	2.4
Хвоя : корни	2.3	0.7	0.3
Хвоя : генеративные органы	26.5	24.7	10.6
Вся фитомасса : вся мортмасса	9.6	2.3	4.3
Время оборота вещества (фитомасса : продукция), год	14.9	23.6	71.8



**Рис. 4.** Вклад фракций фитомассы древесного яруса в общий запас растительных фракций в олиготрофных сфагновых болотах: (а) – хвоя; (б) – нефотосинтезирующая надземная фитомасса; (в) – подземная фитомасса; (г) – вся фитомасса; (д) – надземная мортмасса; (е) – подземная мортмасса; (ж) – вся мортмасса; (з) – надземная продукция. Запасы торфа и мохового оочеса не включены. 1 – доля древесного яруса; 2 – суммарная доля мхов, кустарничков и трав. I – южная тайга; II – средняя тайга; III – северная тайга.

готрофных условиях по сравнению с мезотрофными и евтрофными, поскольку в худших условиях больше органического вещества тратится на поддержание ассимиляционного аппарата (Вомперский, Иванов, 1978). В нашем случае в олиготрофных условиях доля хвои падает с увеличением суровости климата. Вероятно, в экстремальных условиях большая доля ассимилятов направляется на развитие мелких сосущих корней (Zadworny et al., 2016) и органов размножения. Самая высокая доля мортмассы по сравнению с фитомассой была в средней тайге, самая низкая – в южной,

что можно объяснить наиболее благоприятными условиями на юге территории и высокой обводненностью в ее средней части. Время оборота вещества в древесном ярусе, которое рассчитывается как отношение фитомассы к продукции (Титлянова, 1977), замедлилось с 15 лет в южной тайге до 72 лет в северной, что характеризует древесный ярус в круговороте как сток углерода, который депонируется на десятилетия.

В отличие от остальных болот, мерзлотное болото Тету-Мамонтотая лежит в зоне распространения плоскобугристых болот. Здесь сосны пред-

ставлены молодняком возрастом около 20 лет, немногочисленная генерация включала 30–35-летние деревья. Древесный ярус обладал низкими запасами и незначительной годичной продукцией в силу своей разреженности: надземная фитомасса составила  $33.9 \text{ г м}^{-2}$ , подземная —  $6.6 \text{ г м}^{-2}$ , мортмасса —  $0.4 \text{ г м}^{-2}$ , а надземная продукция —  $2.4 \text{ г м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . В то же время дендрометрические показатели деревьев этого болота оказались значительно выше, чем у деревьев олиготрофных сфагновых болот той же северотаежной подзоны. Так, при сравнении модельных деревьев возрастом 25 и 32 г. оказывается, что, в отличие от модельных деревьев средней и северной тайги, сосны плоскобугристых болот сравнимы или выше на 40 см, их диаметр больше на 4–7 мм, а часть ствола, погребенного мхом, в 2–2.5 раза короче. Запас фракций в расчете на одно усредненное дерево был выше, чем в южной тайге, и составил для хвои — 95 г, для ветвей — 121 г, в то время как запас сухих ветвей оказался самым низким — 9 г. На болоте Тету-Мамонтотяй отсутствовали деревья более старшего возраста, а также сухостой. Складывается впечатление, что сосны появились 2–3 десятилетия назад, возможно, в связи с глобальными климатическими изменениями. Известно, что на границах распространения леса чувствительность к климатическим изменениям максимальна и на севере проявляется в увеличении сомкнутости древостоев (Замолотчиков, Краев, 2016). Для юга Западной Сибири А.В. Глызин с соавт. (2005) отметили оптимум роста сосны в 1993 г. Возможно, в середине 1990-х гг. сложились благоприятные условия для роста сосен по всей Западной Сибири, что могло вызвать появление деревьев на данном болоте, однако это предположение требует подтверждений.

Исходя из опубликованных данных о площадях различных типов болот и доли облесенных болот на территории Западной Сибири (Вомперский и др., 2005, 2011), можно оценить запасы фитомассы древесного яруса в таежной зоне. При расчете на основе данных, опубликованных С.Э. Вомперским с соавт. (2011), мы принимали во внимание, что болотам с редкостойным древесным ярусом соответствуют низкие рямы и гряды с доминирующей формой *f. litwinowii*, сомкнутым — высокие рямы с *f. uliginosa*, для которых полученные результаты утраивали согласно имеющимся в литературе данным фитомассы низких и высоких рямов (Вомперский, Иванов, 1982). В таком случае общая фитомасса древесных ценозов на верховых болотах Западной Сибири в южной тайге равна 13.17 млн т, в средней — 124.47 млн т, в северной — 1.90 млн т, а суммарная — 139.54 млн т, что на порядок меньше, чем по оценкам С.П. Ефремова с соавт. (2005), и в 20 раз больше, чем по оценкам А.М. Peregon et al. (2008). Запасы сухостоя оцениваются в 1.17 млн т в южной, 46.95 млн т — в средней и 0.39 млн т — в северной тайге. Сопоставляя эти величины с данными о запасе сухостоя сосняков

России (Замолотчиков и др., 2011), можно оценить вклад болот Западной Сибири в 4–9%.

Рассмотрим вклад древесного яруса в общую фитомассу и продукцию болот, которые складываются участием деревьев, трав, кустарничков, лишайников и мохового покрова (рис. 4). Данные о продуктивности лишайниково-мохового и травяно-кустарничкового ярусов получены в тех же болотных массивах и опубликованы ранее (Косых, 2004; Косых, Махатков, 2008; Косых и др., 2003, 2008, 2017; Kosykh et al., 2008, 2017 и др.). Вклад хвои и подземной фитомассы деревьев был менее 20% и уменьшался к северу, в то время как участие деревьев в общем запасе нефотосинтезирующей надземной фитомассы, надземной и подземной мортмассы (без учета торфа и мохового очеса) оказалось значительным. Вклад деревьев в надземную первичную продукцию составил 16, 12 и 1% в южной, средней и северной тайге соответственно, что для южной тайги согласуется с опубликованной для Томской области оценкой в 18% (Пьявченко, 1967; Головацкая, 2017). Полученные результаты согласуются с выявленным ранее на автоморфных почвах республики Коми закономерным снижением продукции сосняков и увеличением вклада растений напочвенного покрова по мере продвижения в северном направлении (Осипов, Бобкова, 2019).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В олиготрофных сфагновых болотах Западной Сибири биомасса и годичная продукция низкорослого древесного яруса, где преобладает *P. sylvestris* L. f. *litwinowii*, меняются вдоль широтного градиента. В связи с увеличением суровости климата с юга на север на единице площади уменьшались густота древесного яруса (от  $20.3 \pm 6.6$  до  $3.5 \pm 0.9$  тыс. дер. га<sup>-1</sup>), общая фитомасса (от 1057 до 333 г м<sup>-2</sup>) и запас большинства отдельных фракций. Запас фракций фитомассы в расчете на одно дерево также снижался с юга на север, кроме корней, в связи с более суровым климатом, и ствола, в связи с понижением уровня болотных вод в районе Сибирских Увалов. В средней тайге более высокая обводненность, чем в северной тайге, в сочетании с более суровым климатом, чем в южной тайге, послужили причиной максимальных запасов сухих ветвей и сухостоя (271 г м<sup>-2</sup>). Вклад кедровой сосны в фитомассу древесного яруса максимален в средней тайге, где достигает 14%.

В соотношении фракций древесного яруса олиготрофных сфагновых болот также прослеживаются закономерные изменения с юга на север: время оборота вещества в древесном ярусе замедлилось с 15 лет в южной тайге до 72 лет в северной, что сопровождалось увеличением доли нефотосинтезирующей фитомассы (ветвей, стебля,

корней) и доли генеративных органов, которые приходится на единицу фотосинтезирующей фитомассы. Самая высокая доля мортмассы по сравнению с фитомассой отмечена в средней тайге, самая низкая – в южной.

Установлены различия между древесным ярусом олиготрофных сфагновых и мерзлотных плоскобугристых болот: на мерзлотном болоте фитомасса и годовая продукция существенно выше в пересчете на одно дерево, но значительно снижаются в пересчете на единицу площади в связи с максимальной разреженностью деревьев.

Полученные оценки не претендуют на полностью, но позволяют сделать предварительные выводы об общих запасах биомассы низкорослого древесного яруса болот на территории Западной Сибири, которые составили в южной тайге 13,17 млн т, в средней – 124,47 млн т, в северной – 1,90 млн т, с вкладом сухостоя 4–9% от сухостоя сосняков на всей территории России. Вклад деревьев в общую фитомассу растительности олиготрофных болот достигает 20% в южной тайге и снижается до 9% в северной тайге, а вклад надземной первичной продукции снижается с 16 до 1% соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биогеоэкологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией / Под ред. Молчанова А.А. М.: Наука, 1982. 208 с.
- Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим / Под ред. Иванова К.Е., Новикова С.М. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 448 с.
- Боч М.С., Мазинг В.В. Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 188 с.
- Велисевич С.Н., Чернова Н.А. Морфогенез жизненных форм *Pinus sibirica* (Pinaceae) на олиготрофных болотах юга Западной Сибири // Ботанический журн. 2014. Т. 99. № 9. С. 988–1001.
- Вишнякова Е.К., Миронычева-Токарева Н.П. Разложение сфагновых мхов в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: Матер. IV междунар. полевого симпозиума (г. Новосибирск, 4–17 августа 2014 г.). Томск: Изд-во Томского гос. университета, 2014. С. 160–162.
- Вомперский С.Э., Глухов А.И. Геоморфологическое положение болотных лесов и безлесных болот различного генезиса // Биогеоэкологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией. М.: Наука, 1982. С. 50–56.
- Вомперский С.Э., Иванов А.И. Вертикально-фракционная структура и первичная продуктивность сосняков болотного ряда // Лесоведение. 1978. № 6. С. 13–23.
- Вомперский С.Э., Иванов А.И. Первичная биологическая продуктивность болотных сосняков // Биогеоэкологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией. М.: Наука, 1982. С. 94–132.
- Вомперский С.Э., Лебков В.Ф., Иванов А.И. Таксационное строение болотных сосняков // Биогеоэкологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией. М.: Наука, 1982. С. 57–94.
- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия РАН. Серия географическая. 2005. № 5. С. 39–50.
- Глебов Ф.З. Взаимоотношения леса и болота в таежной зоне. Новосибирск: Наука, 1988. 184 с.
- Глызин А.В., Размахнина Т.Б., Корсунов В.М. Дендрохронологические исследования в контактной зоне “лес – степь” как источник информации о ее динамике // Сибирский экологический журн. 2005. № 1. С. 79–83.
- Головацкая Е.А. Биомасса и продукция древесного яруса сосново-кустарничково-сфагновых болот южной тайги Западной Сибири // Лесоведение. 2017. № 2. С. 102–110.
- Головацкая Е.А. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южнотаежной подзоны Западной Сибири // Журн. Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2009. Т. 2. № 1. С. 38–53.
- Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Блоитен В. Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири // Сибирский экологический журн. 2005. № 1. С. 29–44.
- Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Опыт построения бонитировочной шкалы местообитаний болотных сосняков южнотаежной подзоны Западной Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2008. Т. 25. № 3–4. С. 269–276.
- Замолодчиков Д.Г., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4(48). С. 23–31.
- Замолодчиков Д.Г., Зукерт Н.В., Честных О.В. Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 61–71.
- Згуровская Л.Н. Строение и рост корневых систем древесных растений на различных типах болот // Заболоченные леса и болота Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 127–146.
- Кац Н.Я. Болота и торфяники: Пособие для университетов. М.: Учпедгиз, 1941. 400 с.
- Коронатова Н.Г. Исследование разложения торфа в болотах методом инкубации сухих и влажных образцов // Динамика окружающей среды и глобальное изменение климата. 2010. № 1. С. 65–71.
- Коронатова Н.Г., Милыева Е.В. Продуктивность болотных сосняков южной тайги Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск: Сибирская гос. геодезическая академия, 2011. Т. 4. С. 259–262.
- Косых Н.П. Болотные экосистемы таежной зоны Западной Сибири: фитомасса и продукция. Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.05. Томск, 2003. 149 с.
- Косых Н.П., Махатков И.Д. Структура растительного вещества в лесо-болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири // Вестник Томского гос. педагогического университета. 2008. Вып. 4(78). С. 77–80.

- Косых Н.П., Миронычева—Токарева Н.П., Паршина Е.К. Биологическая продуктивность болот лесотундры Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2008. № 4(78). С. 53–57.
- Косых Н.П., Миронычева—Токарева Н.П., Блейтен В. Продуктивность болот южной тайги Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Приложение № 7, сер. Биологические науки (биология, почвоведение, лесоведение). 2003. С. 142–152.
- Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Лапшина 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. 2017. Т. 8. № 1(15). С. 3–13.
- Лапшина Е.Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. 296 с.
- Лешок В.И., Дыренков С.А. Структура болотных сосняков Южной Карелии // Болотные экосистемы европейского Севера. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра АН СССР, 1986. С. 78–93.
- Махатков И.Д., Косых Н.П., Романцев С.А. Запасы фитомассы и годичная продукция верховых болот средней тайги // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Матер. II междунар. полевого симпозиума (г. Ханты-Мансийск, 24 августа–2 сентября 2007 г.). Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2007. С. 112–114.
- Минаева Т.Ю., Сиринов А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
- Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 18–23.
- Осипов А.Ф., Бобкова К.С. Первичная продукция сосняков республики Коми // Лесоведение. 2019. № 5. С. 423–434.  
<https://doi.org/10.1134/S0024114819050073>
- Панов В.В. Болотные формы *Pinus sylvestris* (Pinaceae) // Ботанический журн. 2007. Т. 92. № 5. С. 647–659.
- Пьявченко Н.И. Лесное болотоведение (основные вопросы). М.: Изд-во АН СССР, 1963. 192 с.
- Пьявченко Н.И. Биологическая продуктивность и круговорот веществ в болотных лесах Западной Сибири // Лесоведение. 1967. № 3. С. 32–43.
- Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. М.: Наука, 1985. 152 с.
- Романова Е.А. Роль гидрологического режима в развитии древесной растительности на верховых болотах Нечерноземья // Значение болот в биосфере. М.: Наука, 1980. С. 147–152.
- Романова Е.А. Растительность болот // Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. С. 138–161.
- Сукачев В.Н. О болотной сосне // Избранные труды. Л.: Наука, 1973. Т. 2. С. 13–24.
- Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Лапшина Е.Д., Смоленцев Б.А., Максюттов Ш.Ш. Новая карта болот южной тайги Западной Сибири для оценки эмиссии метана и диоксида углерода // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 2. С. 209–220.
- Титлянова А.А. Биологический круговорот углерода в травяных экосистемах. Новосибирск: Наука, 1977. 222 с.
- Титлянова А.А. Чистая первичная продукция травяных и болотных экосистем // Сибирский экологический журн. 2007. Т. 14, № 5. С. 763–771.
- Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / Под ред. А.А. Сирина, Т.Ю. Минаевой. М.: ГЕОС, 2001. 190 с.
- Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. 636 с.
- Усольцев В.А., Ценордей И.С., Шубаири С.О.Р., Дар Дж.А., Часовских В.П. Аддитивные аллометрические модели фитомассы деревьев и древостоев двухвойных сосен как основа региональных таксационных нормативов для Евразии // Эко-потенциал. 2018. № 1(21). С. 27–47.
- Филиппов И.В., Лапшина Е.Д. Типы болотных микроландшафтов озерно-болотных систем Среднего Приобья // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Новосибирск, 2008. Т. 8. Вып. 1. С. 115–124.
- Храмов А.А., Валуцкий В.И. Лесные и болотные фитосеннозисты восточного Васюганья (структура и биологическая продуктивность). Новосибирск: Наука, 1977. 222 с.
- Blanchet G., Guillet S., Calliari B., Corona Ch., Edvardsson J., Stoffel M., Bragazza L. Impacts of regional climatic fluctuations on radial growth of Siberian and Scots pine at Mukhrino mire (central-western Siberia) // Science of the Total Environment. 2016. V. 574. P. 1209–1216.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.225>
- 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 J. Ecology. 2017. V. 48. № 3. P. 203–211.  
<https://doi.org/10.1134/S1067413617030080>
- 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. 2008. V. 16. № 2. P. 139–153.  
<https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7>
- Moore P.D. The future of cool temperate bogs // Environmental Conservation. 2002. V. 29. P. 3–20.  
<https://doi.org/10.1017/S0376892902000024>
- Peregon A.M., Maksyutov Sh.Sh., Kosykh N.P., Mironycheva—Tokareva N.P. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. G01007.  
<https://doi.org/10.1029/2007JG000441>
- Vitt D.H. An overview of factors that influence the development of Canadian peatlands // Memoirs of the Entomological Society of Canada. 1994. V. 169. P. 7–20.
- Yefremov S.P., Yefremova T.T. Stocks and forms of deposited carbon and nitrogen in bog ecosystems of West Siberia // Proceedings of the International Field Symposium “West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present”. 2001. P. 148–151.
- Zadworny M., McCormack M.L., Mucha J., Reich P.B., Oleksyn J. Scots pine fine roots adjust along a 2000-km latitudinal climatic gradient // New Phytologist. 2016. V. 212. № 2. P. 389–399.  
<https://doi.org/10.1111/nph.14048>

## Forest Stand Productivity on Peat Bogs of Western Siberia's Taiga Zone

N. G. Koronatova<sup>1, \*</sup> and N. P. Kosykh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian branch of RAS,  
Akademika Lavrent'eva prosp. 8/2, Novosibirsk, 630090 Russia*

\*E-mail: koronatova@issa-siberia.ru

There has been conducted an estimation of different fractions of living and dead organic mass of the arborescent stratum in peat bogs of Western Siberia's taiga zone, where the dominating species is the swamp-dwelling form of Scots pine *Pinus sylvestris* L. f. *litwinowii* with an addition of cedar pine *P. sibirica* Du Tour. As a result of discriminant analysis, a significant difference was found between the model pines from the southern, middle, and northern taiga. Separately for each of the taiga subzones, polynomial regression equations have been obtained that approximate the dependences of different fractions of biomass on the trunk diameter. The arborescent stratum's thickness was decreasing linearly toward the north from  $20.3 \pm 6.6$  to  $3.5 \pm 0.9$  thousands trees  $\text{ha}^{-1}$ , that was accompanied by the total phytomass decreasing from 1057 to 333  $\text{g m}^{-2}$ , while the maximum stock of dead trees and limbs was noted in the middle taiga. The maximum mass of roots in a layer of 0–30 cm was in the middle taiga, and the minimum – in the northern one. There was also found that the mass of pine roots increases with depth in the southern and middle taiga and decreases in the northern one. The change was also shown in the structure of phytomass and the ratio of fractions along the latitudinal gradient. Aboveground primary production of forest stands in the southern, middle and northern taiga is estimated at 70.7, 27.3 and 4.7  $\text{g m}^{-2} \text{year}^{-1}$ , respectively, with the maximum contribution of cedar pine in the center of the taiga zone being less than 5%. The contribution of the arborescent stratum to the total phytomass reserve of peat bogs decreases from 28% in the south of the territory to 9% in the north.

**Keywords:** bog forest stands, *Pinus sylvestris* L. f. *litwinowii*, *P. sibirica* Du Tour, phytomass, mortmass, primary production, peat bogs, Western Siberia's taiga zone.

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of the State Contract with the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian branch of RAS, with a financial support from the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation.

### REFERENCES

- Blanchet G., Guillet S., Calliari B., Corona Ch., Edvardsson J., Stoffel M., Bragazza L., Impacts of regional climatic fluctuations on radial growth of Siberian and Scots pine at Mukhrino mire (central-western Siberia), *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 574, pp. 1209–1216. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.225>
- Boch M.S., Mazing V.V., *Ekosistemy bolot SSSR* (Ecosystems of bogs of the USSR), Leningrad: Nauka, 1979, 188 p.
- Bolota Zapadnoi Sibiri, ikh stroenie i gidrologicheskii rezhim* (Bogs of Western Siberia, their structure and hydrological regime), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 448 p.
- Efremov S.P., Efremova T.T., Bleuten W., Biologicheskaya produktivnost' i uglerodnyi pul fitomassy lesnykh bolot Zapadnoi Sibiri (Biological productivity and the carbon pool of forest swamps in West Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 1, pp. 29–44.
- Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P., Opyt postroeniya bonitirovochnoi shkaly mestoobitaniya bolotnykh sosnyakov yuzhnotaevzhnoi podzony Zapadnoi Sibiri (Experience in constructing a grading scale for the habitats of marsh pine forests in the southern taiga subzone of Western Siberia), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2008, Vol. 25, No. 3–4, pp. 269–276.
- Filippov I.V., Lapshina E.D., Tipy bolotnykh mikrolandshaftov ozerno-bolotnykh sistem Srednego Priob'ya (Peatland unit types of lake-bog systems in the Middle Priob'ie (Western Siberia)), *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata*, 2008, Vol. 8, No. 1, pp. 115–124.
- Glebov F.Z., *Vzaimootnosheniya lesa i bolota v taevzhnoi zone* (Interactions between forests and bogs in taiga domain), Novosibirsk: Nauka, 1988, 181 p.
- Glyzin A.V., Razmahina T.B., Korsunov V.M., Dendrokronologicheskie issledovaniya v kontaktnoi zone "les – step'" kak istochnik informatsii o ee dinamike (Dendrochronological studies in the forest-steppe contact zone as a source of information about its time course), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, No. 1, pp. 79–83.
- Golovatskaya E.A., Biologicheskaya produktivnost' oligotrofnyykh i evtrofnyykh bolot yuzhnotaevzhnoi podzony Zapadnoi Sibiri (Biological productivity of oligotrophic and eutrophic mires in the southern taiga of Western Siberia), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2009, Vol. 2, No. 1, pp. 38–53.
- Golovatskaya E.A., Biomassa i produktsiya drevesnogo yarusa osnovno-kustarnichkovo-sfagnovykh bolot yuzhnoi taigi Zapadnoi Sibiri (Biomass and production of tree story of pine shrubby sphagnum peatlands in boreal domain in West Siberia), *Lesovedenie*, 2017, No. 2, pp. 102–110.
- Kats N.Y., *Bolota i torfyaniki: Posobie dlya universitetov* (Wetlands and Peatlands: A Handbook for Universities), Moscow: Uchpedgiz, 1941, 400 p.
- Khramov A.A., Valutskii V.I., *Lesnye i bolotnye fitotsenozy Vostochnogo Vasyugan'ya* (Phytocoenoses of forests and bogs in eastern Vasyugan Region), Novosibirsk: Nauka, 1977, 221 p.
- Koronatova N.G., Issledovanie razlozheniya torfa v bolotakh metodom inkubatsii sukhikh i vlazhnykh obraztsov (Investigation of peat decomposition in bogs by method of

- dry and wet samples incubation), *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'noe izmenenie klimata*, 2010, No. 1, pp. 65–71.
- Koronatova N.G., Milyaeva E.V., Produktivnost' bolotnykh sosnyakov yuzhnoi taigi Zapadnoi Sibiri (Productivity of bog pine forests in the southern taiga of Western Siberia), *Interesko Geo-Sibir'*, 2011, No. 4, pp. 259–262.
- Kosykh N.P., *Bolotnye ekosistemy taezhnoi zony Zapadnoi Sibiri: fitomassa i produktsiya. Diss. kand. biol. nauk* (Bog ecosystems of the taiga zone of Western Siberia: phytomass and products. Candidate's biol. sci. thesis), Tomsk: 2003, 149 p.
- 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 J. Ecology*, 2017, Vol. 48, No. 3, pp. 203–211. DOI <https://doi.org/10.1134/S1067413617030080>
- Kosykh N.P., Koronatova N.G., Lapshina E.D., Filippova N.V., Vishnyakova E.K., Stepanova V.A., Lineinyi prirost i produktsiya sfagnovykh mkhov v srednei taige Zapadnoi Sibiri (Linear growth and production of sphagnum mosses in the middle taiga zone of West Siberia), *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'noe izmenenie klimata*, 2017, Vol. 8, No. 1(15), pp. 3–13.
- 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*, 2008, Vol. 16, No. 2, pp. 139–153. DOI <https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7>
- Kosykh N.P., Makhatkov I.D., Struktura rastitel'nogo veshchestva v lesobolotnykh ekosistemakh srednei taigi Zapadnoi Sibiri (The structure of plant matter in the forest-marsh ecosystems of the middle taiga of Western Siberia), *Vestnik Tomskogo gos. pedagogicheskogo universiteta*, 2008, Vol. 4(78), pp. 77–80.
- Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Bleiten V., Produktivnost' bolot yuzhnoi taigi Zapadnoi Sibiri (Productivity of swamps of the southern taiga of Western Siberia), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Prilozhenie № 7, ser. Biologicheskie nauki (biologiya, pochvovedenie, lesovedenie)*, 2003, pp. 142–152.
- Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K., Biologicheskaya produktivnost' bolot lesotundry Zapadnoi Sibiri (Biological productivity of forest-tundra bogs in Western Siberia), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*, 2008, No. 4(78), pp. 53–57.
- Lapshina E.D., *Flora bolot yugo-vostoka Zapadnoi Sibiri* (Bog flora in southeastern West Siberia), Tomsk: Izd-vo TGU, 2004, 296 p.
- Leshok V.I., Dyrenkov S.A., Struktura bolotnykh sosnyakov Yuzhnoi Karelii (The structure of swamp pine forests in South Karelia), In: *Bolotnye ekosistemy evropeiskogo Severa* (Bog ecosystems of the European North), Petrozavodsk: Izd-vo Karel'skogo nauchnogo tsentra AN SSSR, 1986, pp. 78–93.
- Machatkov I.D., Kosykh N.P., Romancev S.A., Zapasy fitomassy i godichnaya produktsiya verkhovykh bolot srednei taigi (Phytomass and production of bogs in the middle taiga), *West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present*, Proc. Conf., Khanty-Mansiysk, Russia, 24 August–2 September 2007, Tomsk: Izd-vo nauchno-tekhnicheckoi literatury, 2007, pp. 112–115.
- Minaeva T.Y., Sirin A.A., Peatland biodiversity and climate change, *Biology bulletin reviews*, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 164–175.
- Molchanov A.A., *Biogeotsenologicheskoe izuchenie bolotnykh lesov v svyazi s opytnoi gidromelioratsiei* (Biogeocoenological study of bog forests related to experimental hydrotechnical amelioration), Moscow: Nauka, 1982, 208 p.
- Moore P.D., The future of cool temperate bogs, *Environmental Conservation*, 2002, Vol. 29, pp. 3–20. DOI <https://doi.org/10.1017/S0376892902000024>
- Moskalenko N.G., Izmenenie temperatury porod i rastitel'nosti pod vliyaniem menyayushchegosya klimata i tekhnogeneza v Nadymskom raione Zapadnoi Sibiri (Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis), *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. XIII, No. 4, pp. 18–23.
- Osipov A.F., Bobkova K.S., Net primary production of carbon in pine forests on european north-east of Russia (Republic of Komi), *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 7, pp. 803–812.
- Panov V.V., Bolotnye formy *Pinus sylvestris* (Pinaceae) (Mire forms of *Pinus sylvestris* (Pinaceae)), *Botanicheskii zhurnal*, 2007, Vol. 92, No. 5, pp. 647–659.
- Peregona A.M., Maksyutov Sh.Sh., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, G01007. <https://doi.org/10.1029/2007JG000441>
- P'yavchenko N.I., Biologicheskaya produktivnost' i krugovorot veshchestv v bolotnykh lesakh Zapadnoi Sibiri (Biological productivity and circulation of substances in the swamp forests of Western Siberia), *Lesovedenie*, 1967, No. 3, pp. 32–43.
- P'yavchenko N.I., *Lesnoe bolotovedenie: osnovnye voprosy* (Forest paludology: basic issues), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, 192 p.
- P'yavchenko N.I., *Torfyanye bolota, ikh prirodnoe i khozyaistvennoe znachenie* (Peat bogs: the natural and economical value), Moscow: Nauka, 1985, 152 p.
- Romanova E.A., Rastitel'nost' bolot (Bog vegetation), In: *Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Vegetation cover of the West Siberian Plain), Novosibirsk: Nauka, 1985, pp. 138–161.
- Romanova E.A., Rol' gidrologicheskogo rezhima v razvitii drevesnoi rastitel'nosti na verkhovykh bolotakh Nechernozem'ya (The role of the hydrological regime in the development of woody vegetation on raised bogs of the Non-Chernozem Region), In: *Znachenie bolot v biosfere* (The significance of bogs in the biosphere), Moscow: Nauka, 1980, pp. 147–152.
- Sukachev V.N., O bolotnoi sosne (On swamp pine), In: *Izbrannyye trudy* (Selecta), Leningrad: Nauka, 1973, Vol. 2, pp. 13–24.
- Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S., A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide, *Water Resources*, 2017, Vol. 44, No. 2, pp. 297–307.
- Titlyanova A.A., *Biologicheskii krugovorot ugleroda v travyanykh ekosistemakh* (Biological carbon cycling in grass ecosystems), Novosibirsk: Nauka, 1977, 222 p.

- Titlyanova A.A., Chistaya pervichnaya produktsiya travyanykh i bolotnykh ekosistem (Net primary production of grasslands and peat lands), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2007, Vol. 14, No. 5, pp. 763–771.
- Torfyanye bolota Rossii: k analizu otraslevoi informatsii* (Peatlands of Russia: supplementary information to the sectoral analysis), Moscow: GEOS, 2001, 190 p.
- Usol'tsev V.A., *Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoi Evrazii: metody, baza dannykh i ee prilozheniya* (Biological production of the forests of Northern Eurasia: methods, database and applications), Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2007, 636 p.
- Usol'tsev V.A., Tsepordei I.S., Shubairi S.O.R., Dar D.A., Chasovskikh V.P., Additivnoe allometricheskie modeli fitomassy derev'ev i drevostoev dvukhvoinnykh sosen kak osnova regional'nykh taksatsionnykh normativov dlya Evrazii (Additive allometric models of tree and stand biomass of two-needled pines as a basis of regional taxation standards for Eurasia), *Eko-potentsial*, 2018, No. 1(21), pp. 27–47.
- Velisevich S.N., Chernova N.A., Morfogenez zhiznennykh form *Pinus sibirica* (Pinaceae) na oligotrofnykh bolotakh yuga Zapadnoi Sibiri (Morphogenesis of *Pinus sibirica* (Pinaceae) life-forms in oligotrophic bogs in the south West Siberia), *Botanicheskii zhurnal*, 2014, Vol. 99, No. 9, pp. 988–1001.
- Vishnyakova E.K., Mironycheva-Tokareva N.P., Razlozhenie sfagnovykh mkhov v bolotnykh ekosistemakh taezhnoi i lesotundrovoi zon Zapadnoi Sibiri (Sphagnum mosses decomposition in bog ecosystems of West Siberia taiga and forest-tundra zone), *West siberian peatlands and carbon cycle: past and present*, Novosibirsk, Proc. of Fourth International Field Symposium, August 4–17, 2014 Tomsk: Izd-vo Tomskogo gos. universiteta, pp. 160–162.
- Vitt D.H., An overview of factors that influence the development of Canadian peatlands, *Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 1994, Vol. 169, pp. 7–20.
- Vomperskii S.E., Glukhov A.I., Geomorfologicheskoe polozhenie bolotnykh lesov i bezlesnykh bolot razlichnogo genezisa (Geomorphological position of bog forests and treeless bogs of various genesis), In: *Biogeotsenologicheskoe izuchenie bolotnykh lesov v svyazi s opytnoi gidromelioratsiei* (Biogeocenological study of bog forests in connection with experimental hydromelioration), Moscow: Nauka, 1982, pp. 50–56.
- Vomperskii S.E., Ivanov A.I., Pervichnaya biologicheskaya produktivnost' bolotnykh sosnyakov (Primary biological productivity of bog pine forests), In: *Biogeotsenologicheskoe izuchenie bolotnykh lesov v svyazi s opytnoi gidromelioratsiei* (Biogeocenological study of bog forests in connection with experimental hydromelioration), Moscow: Nauka, 1982, pp. 94–132.
- Vomperskii S.E., Ivanov A.I., Vertikal'no-fraktsionnaya struktura i pervichnaya produktivnost' sosnyakov bolotnogo ryada (Vertical fractional structure and primary productivity of bog pine forests), *Lesovedenie*, 1978, No. 6, pp. 13–23.
- Vomperskii S.E., Lebkov V.F., Ivanov A.I., Taksatsionnoe stroenie bolotnykh sosnyakov (Taxation structure of bog pine forests), In: *Biogeotsenologicheskoe izuchenie bolotnykh lesov v svyazi s opytnoi gidromelioratsiei* (Biogeocenological study of bog forests in connection with experimental hydromelioration), Moscow: Nauka, 1982, pp. 57–94.
- Vomperskii S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A., Bolota i zabolochennyye zemli Rossii: popytka analiza prostranstvennogo raspredeleniya i raznoobraziya (Peatlands and Paludified Lands of Russia: Attempt of Analyses of Spatial Distribution and Diversity), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2005, No. 5, pp. 39–50.
- Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 734–741.
- Yefremov S.P., Yefremova T.T., Stocks and forms of deposited carbon and nitrogen in bog ecosystems of West Siberia, “*West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present*”, Proceedings of the International Field Symposium, 2001, pp. 148–151.
- Zadworny M., McCormack M.L., Mucha J., Reich P.B., Oleksyn J., Scots pine fine roots adjust along a 2000-km latitudinal climatic gradient, *New Phytologist*, 2016, Vol. 212, No. 2, pp. 389–399. DOI <https://doi.org/10.1111/nph.14048>
- Zamolodchikov D., Kraev G., Vliyanie izmenenii klimata na lesa Rossii: zafiksirovannyye vozdeistviya i prognoznyye otsenki (Effects of climate changes on forests of Russia: Records and forecasts), *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, 2016, No. 4(48), pp. 23–31.
- Zamolodchikov D.G., Zukert N.V., Chestnykh O.V., Podkhody k otsenke ugleroda sukhostoya v lesakh Rossii (Approaches to Assessment of Carbon in Dead Standing Trees), *Lesovedenie*, 2011, No. 5, pp. 61–71.
- Zgurovskaya L.N., Stroenie i rost kornevykh sistem drevesnykh rastenii na razlichnykh tipakh bolot (Structure and growth of root systems of woody plants in various types of bogs), In: *Zabolochennyye lesa i bolota Sibiri* (Boggy forests and bogs of Siberia), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963, pp. 127–146.