СОДЕРЖАНИЕ

Номер 9, 2020

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

Влияние полезащитных лесных насаждений на локальное разнообразие почв (Белгородская область)

М. А. Смирнова, А. Н. Геннадиев, Ю. Г. Чендев, Р. Г. Ковач 1041

Почвы и почвенный покров горно-тундровых ландшафтов Полярного Урала на карбонатных породах: разнообразие, классификация, распределение углерода и азота

Е. В. Шамрикова, Е. В. Жангуров, Е. Е. Кулюгина, М. А. Королев, О. С. Кубик, Е. А. Туманова 1053

ХИМИЯ ПОЧВ

Взаимодействие водорастворимых органических веществ хвойной подстилки с минералами и горизонтами подзолистой почвы и подзолов

Е. И. Караванова, Д. Ф. Золовкина, А. А. Степанов 1071

ФИЗИКА ПОЧВ

Аналитическая математическая модель химической суффозии при промывках засоленных почв

Ф. Д. Микаилсой, Е. В. Шеин 1085

БИОЛОГИЯ ПОЧВ

Соотношение грибов и бактерий в темногумусовой лесной почве

Л. М. Полянская, Д. Д. Юмаков, З. Н. Тюгай, А. Л. Степанов 1094

МЕЛИОРАЦИЯ ПОЧВ

Возможность и целесообразность возврата в сельскохозяйственный оборот ранее мелиорированных солонцовых земель (обзор)

И. Н. Любимова, И. А. Салпагарова 1100

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

Восстановление свойств почв в технологии прямого посева

В. К. Дридигер, А. Л. Иванов, В. П. Белобров, О. В. Кутовая 1111

Аллелотоксичность почв и разработка сорбционно-стимулирующего препарата для ускорения начальной стадии развития растений из семян яровой пшеницы

Г. Н. Федотов, И. В. Горепекин, Л. В. Лысак, Д. И. Потапов 1121

Сравнительный анализ температуры горизонта О подзола на двух в различной степени деградированных участках техногенно трансформированной экосистемы (Кольский полуостров)

Г. М. Кашулина, Т. И. Литвинова, Н. М. Коробейникова 1132

Миграционная подвижность тяжелых металлов в сильнозагрязненных почвах в окрестностях комбината “Североникель” (Мурманская область)

А. С. Фрид, Т. И. Борисочкина 1144

Contents

No. 9, 2020

Genesis and Geography of Soils

Influence of Forest Shelter Belts on Local Pedodiversity (Belgorod Oblast)

M. A. Smirnova, A. N. Gennadiev, Yu. G. Chendev, and R. G. Kovach 1041

Soils and Soil Cover of Mountainous Tundra Landscapes of the Polar Urals on Calcareous Rocks: Diversity, Taxonomy, Nitrogen and Carbon Patterns

E. V. Shamrikova, E. V. Zhangurov, E. E. Kulyugina, M. A. Korolev, O. S. Kubik, and E. A. Tumanova 1053

Soil Chemistry

Interaction of Water-Soluble Organic Substances of Coniferous Litter with Minerals and Horizons of Podzolic Soil and Podzols

E. I. Karavanova, D. F. Zolovkina, and A. A. Stepanov 1071

Soil Physics

Analytical Mathematical Model of Chemical Suffosion While Washing Saline Soils

F. D. Mikailsoy and E. V. Shein 1085

Soil Biology

Fungi and Bacteria Ratio in the Dark Humus Forest Soil

L. M. Polyanskaya, D. D. Yumakov, Z. N. Tyugay, and A. L. Stepanov 1094

Soil Reclamation

Possibility and Feasibility of Returning the Formely Reclaimed Solonetz Lands to Agricultural Use (Review)

I. N. Lyubimova and I. A. Salpagarova 1100

Degradation, Rehabilitation, and Conservation of Soils

Restoration of Soil Properties by Using Direct Sowing Technology

V. K. Dridiger, A. L. Ivanov, V. P. Belobrov, and O. V. Kutovaya 1111

Soil Allelotoxicity and Creation of Sorption-Stimulating Preparation to Accelerate Plant Development from Spring Wheat Seeds at Early Stages

G. N. Fedotov, I. V. Gorepekin, L. V. Lysak, and D. I. Potapov 1121

Comparative Analysis of Soil Temperature on Two Degraded Sites of the Technogenic Ecosystem of Nickel Industrial Complex (Kola Peninsula)

G. Kashulina, T. Litvinova, and N. Korobeinikova 1132

Heavy Metals Mobilization Capacity in Strongly Polluted Soils near "Severonickel" Plant (Murmansk Region)

A. S. Frid and T. I. Borisochkina 1144

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1041–1052

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ЛОКАЛЬНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ПОЧВ (БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2020 г. М. А. Смирнова[a], *, А. Н. Геннадиев[a], Ю. Г. Чендев[b], Р. Г. Ковач[a]

[a] *МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119999 Россия*

[b] *Белгородский государственный университет, ул. Победы, 85, Белгород, 308015 Россия*

**e-mail: summerija@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.03.2020 г.
После доработки 15.03.2020 г.
Принята к публикации 01.04.2020 г.

На ключевом участке в пределах Белгородской области на юге Среднерусской возвышенности проведено детальное полевое картографирование почвенного покрова многорядной лесополосы 50-летнего возраста протяженностью 4 км, пересекающей различные элементы рельефа, и прилегающих пахотных участков сельскохозяйственных полей; 30 точек опробования были заложены в центральной (осевой) части лесополосы и на удалении 30 м по обе стороны от ее краев. Построены карты мощности гумусового профиля, содержания органического углерода, глубины обнаружения карбонатов, почвенная карта; рассчитаны индексы богатства, разнообразия Шеннона, Симпсона, Рао и таксономические расстояния как количественные показатели контрастности между почвами участка. Показано, что полезащитные лесонасаждения приводят к уменьшению контрастности почв по отношению друг к другу и к уменьшению значений индексов разнообразия для почв, формирующихся непосредственно под лесополосой.

Ключевые слова: структура почвенного покрова, Среднерусская возвышенность, педоразнообразие, черноземы (Chernozems), таксономические расстояния

DOI: 10.31857/S0032180X20090166

ВВЕДЕНИЕ

В результате реализации государственных программ агролесомелиорации на территории России, начиная с 1948 г., было обустроено большое количество полезащитных лесных полос, возраст которых в настоящее время достигает 50–70 лет. Лесополосы в процессе своего функционирования оказывали влияние на качественное состояние почв. Изучение результатов этого влияния проводилось многими исследователями, главным образом, с точки зрения их значимости для повышения плодородия почв. Опубликованные работы касались в основном прикладных аспектов оценки полезащитных лесонасаждений как факторов: а) повышения урожайности сельскохозяйственных культур за счет улучшения водного баланса; б) уменьшения интенсивности почвенной эрозии под воздействием барьерной роли лесопосадок; в) связывания углерода углекислого газа, ведущего к уменьшению парникового эффекта и т. д. [1, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 21, 24]. В то же время лесополосы рассматривались и как своеобразные объекты экспериментальной трансформации условий почвообразования, позволяющие расширить и углубить фундаментальные эволюционно-генетические представления о почвах и почвенном покрове. В частности, в этом контексте система лесополосы-почвы может выступать как контролируемая модель формирования и видоизменения почвенного разнообразия, параметры которой заданы в пространственно-временном измерении. В последние годы в географо-генетическом почвоведении вопросам разнообразия почв уделяется все большее внимание, это явление рассматривается в различных пространственных масштабах: глобальном, континентальном, региональном [3, 7, 15, 18–20, 23, 25, 27]. Исследование системы лесополосы-почвы позволяет и на локальном уровне количественно охарактеризовать и привязать к координате абсолютного времени особенности трансформации почвенного покрова и уровня его разнообразия под воздействием внешнего по отношению к почвам фактора, что и составляло цель данной работы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования проведены в лесостепной зоне юга Среднерусской возвышенности – на ключевом участке “Степное” (рис. 1), расположенном в Губкинском районе Белгородской

Рис. 1. Фрагмент космического снимка на ключевой участок исследования с указанием положения точек полевого опробования.

области, в окрестностях села Степное (координаты центра лесополосы – 50.9988° с. ш., 37.3378° в. д.). Климат территории умеренно-континентальный; согласно метеостанции, расположенной в селе Богородицкое (18 км к северу от участка исследования), среднегодовая температура составляет +7.5°С; среднегодовое количество осадков – 558 мм/год (за период с 2015 по 2019 гг.)

На участке расположена протяженная многорядная лесополоса и прилегающие к ней сельскохозяйственные поля, размер участка 500 × 4000 м. Исследуемая лесополоса отображена на крупномасштабной топографической карте 1981 г., на которой в северной части лесополосы указана высота деревьев 5 м, а в южной части – 8 м, породный состав – клен и ясень. Учитывая, что деревья могут достигнуть такой высоты за 10–15 лет произрастания, возраст лесопосадки определяется примерно в 50–55 лет. Севообороты на прилегающих к лесополосе сельскохозяйственных полях представлены зерновыми культурами; обработка почв, в основном, проводится специализированной сельскохозяйственной техникой методом отвальной вспашки на глубину 25–30 см с оборотом пласта [5].

Лесополоса ориентирована с юга на север и пересекает различные элементы рельефа: водораздельную поверхность, пологие и крутые склоны северной и южной экспозиций, днища ложбин; перепад высот между указанными элементами рельефа составляет 5 м (рис. 2). Участок имеет общий слабый наклон с востока на запад, вследствие чего в весенний период в верховье ложбины, пересекаемом лесополосой и расположенном от нее к востоку, происходит застаивание влаги (рис. 3). В этом же направлении увеличивается степень расчленения рельефа.

Перпендикулярно лесополосе было заложено 10 параллельных трансект, на каждой из которых заложено по 3 точки исследования почв (рис. 1): одна – в осевой части лесополосы (ширина лесополосы составляет от 30 до 50 м), две – на удалении 30 м от ее края по обе стороны к востоку и западу на сельскохозяйственных полях (сокращенно на “В поле” и “З поле”). На каждой точке проведено описание рельефа, растительности, заложен почвенный разрез (точки трансект 7 и 9) или буровая скважина (точки трансект 1–6, 8 и 10) на глубину более 1.2 м. Классификация и диагностика почв выполнена в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [6].

Количество рядов в исследуемой лесополосе варьирует от 5 до 12. Породный состав неоднороден. Основной древесной породой южной части лесополосы (трансекты 1–3) является ясень, встречается клен; высота деревьев составляет 20–25 м, диаметр стволов до 35 см. Количество рядов варьирует от 10 до 12. В подлеске встречаются кизильник (*Cotoneaster*), робиния обыкновенная (*Robinia pseudoacacia*). Травянистый покров развит фрагментарно, степень проективного покрытия не превышает 10–15%. Поверхность почв плотно покрыта опадом прошлогодних листьев, встречаются крупные ветки, стволы деревьев. На участке между трансектами 3 и 4 древесная растительность отсутствует (деревья не были высажены). Участок лесополосы, пересекаемый трансектой 4, разрежен, состоит из пяти рядов, представленных березой. Высота деревьев не превышает 25 м, диаметр стволов – до 30 см. Степень проективного покрытия травянистого яруса – менее 30%. В центральной и северной частях лесополосы (трансекты 5–10) древесный ярус представлен кленом, березой, грушей. Количество рядов варьирует от восьми до двенадцати. Высота деревьев не превышает 25 м, диаметр стволов – менее 45 см.

В качестве почвообразующих пород выступают двучленные отложения; верхняя часть представлена карбонатным лёссовидным суглинком,

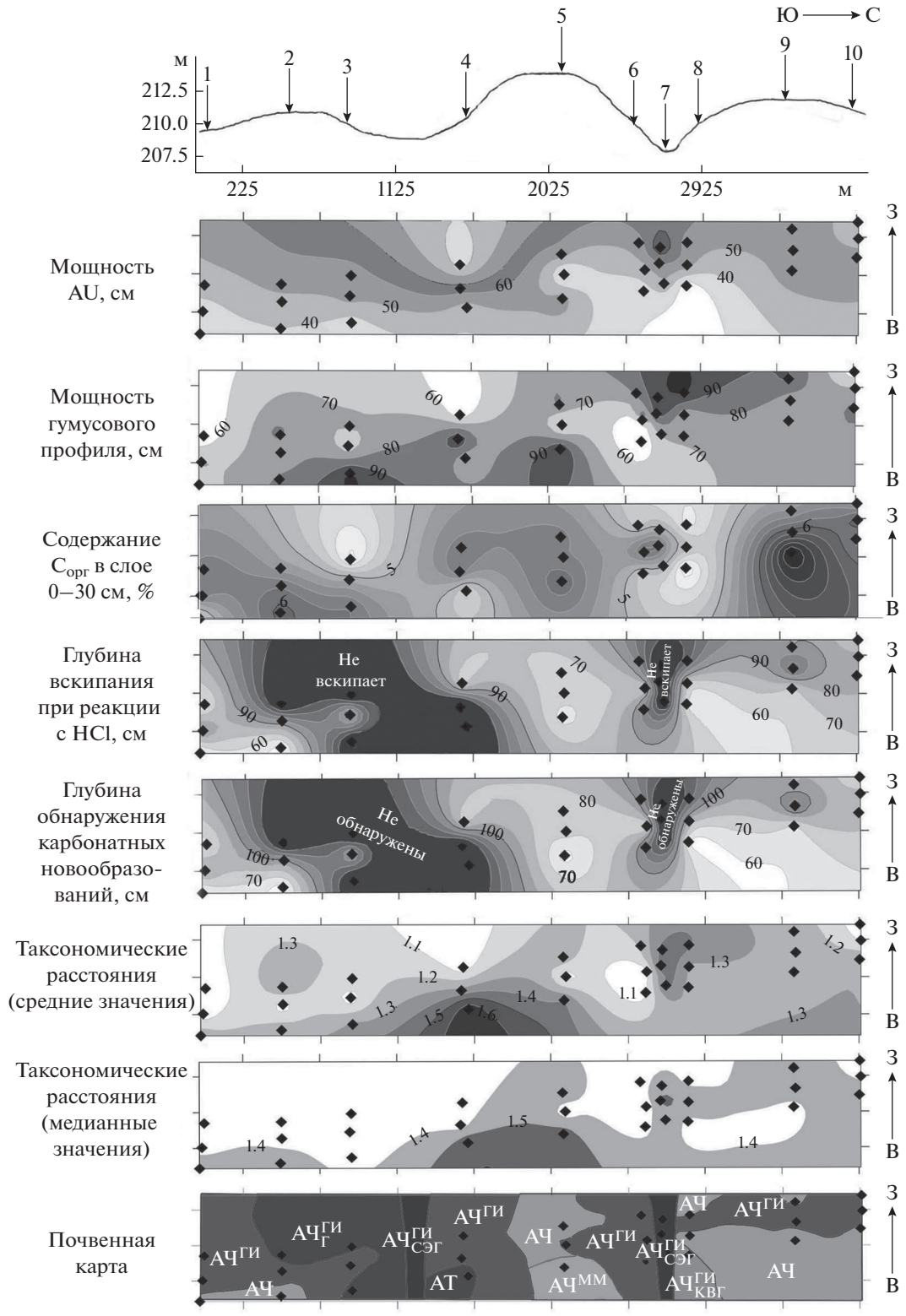

Рис. 2. Схематический профиль с указанием номеров трансект, карты свойств почв и почвенная карта ключевого участка. Условные обозначения на почвенной карте: АЧ – агрочерноземы мицелярные, $АЧ^{мм}$ – агрочерноземы миграционно-мицеллярные, $АЧ^{ги}$ – агрочерноземы глинисто-иллювиальные, $АЧ^{ги}_{сэг}$ – агрочерноземы стратифицированные элювиальные глинисто-иллювиальные, $АЧ^{ги}_{квг}$ – агрочерноземы глинисто-иллювиальные глубококвазиглееватые, $АЧ^{ги}_{г}$ – агрочерноземы глинисто-иллювиальные глубокоглееватые, АТ – агротемногумусовые элювиированные глубокоглееватые.

Рис. 3. Фрагмент лесополосы и “В поля” в мае 2019 г.

подстилаемым бескарбонатными глинами. Мощность верхнего субстрата в пределах участка исследований варьирует от 60 см до более чем двух метров. Глины встречаются на глубине менее метра в разрезах 7В, 2З, 3З, от 1 до 1.5 метров – в разрезах 3В, 4В, 4Л, 7Л, 7З, 8В и более двух метров – в остальных случаях. Изменение мощности верхнего субстрата не обнаруживает согласованности с рельефом.

Для определения содержания органического углерода в точках опробования были отобраны образцы почв из пахотного горизонта 0–30 см на полях и с глубин 0–10, 10–20, 20–30 см в лесонасаждениях; в почвах, приуроченных к водораздельной поверхности (трансекта 9) и днищу ложбины (трансекта 7), дополнительно отобраны образцы из всех генетических горизонтов. Для определения содержания углекислоты карбонатов были отобраны образцы из карбонатных горизонтов – первый, где наблюдалось вскипание при реакции 10% раствора HCl, но отсутствовали морфологически выраженные карбонатные новообразования, второй – из горизонта с карбонатными новообразованиями. Всего было отобрано 95 образцов на анализ содержания органического углерода, и 33 – на анализ содержания углекислоты карбонатов.

Для оценки контрастности почвенного покрова был использован метод расчета таксономических расстояний, подробно описанный в работах [9, 23]. На первом этапе была создана матрица свойств почв (рис. 4), где строки соответствовали почвенным свойствам, а столбцы – исследуемым почвам. В каждой ячейке матрицы было отмечено наличие (от 0.2 до 1) или отсутствие (0) в почве свойства. В качестве свойств были использованы таксономически значимые характеристики почвенных профилей, а их вес присваивался в соответствии с иерархической системой классификации:

1. Диагностические горизонты PU, AU, BI, BCA (независимо от наличия или отсутствия в них каких-либо других диагностических признаков), вес – 1;

2. Диагностические генетические признаки rh, el, lc, mc, q, g (без их привязки к генетическим горизонтам), вес – 0.5;

3. Градации родовых признаков – двучленность почвообразующей породы, вес 0.3;

4. Градации видовых признаков по мощности гумусового горизонта (среднемощные 50–80 см, мощные 80–120 см), содержания гумуса в верхнем горизонте (среднегумусные 6–9%, малогумусные 4–6%, слабогумусированные <4%), глубине залегания карбонатов (высоко карбонатные 30–50 см, среднекарбонатные 50–80 см, глубоко карбонатные 80–120 см), вес – 0.2.

Свойства			1В	2В	3В	4В	5В	6В	7В	8В	9В	10В	1Л	2Л	3Л	4Л	5Л	6Л	7Л	8Л	9Л	10Л	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103
Типовые		PU	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		AU	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		BI	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
		BCA	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1
Подтиповые		rh	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0
		el	0	0	0	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0
		lc	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		me	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5
		q	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		g	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0.5	0	0	0
Родовые		Двучленное строение	0	0	0.3	0.3	0	0	0.3	0.3	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0.3	0	0	0	0	0.3	0.3	0	0	0	0.3	0	0	0
Видовые	По мощности гумусового горизонта	Мощные	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2	0	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0	0
		Среднемощные	0.2	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0	0	0	0.2	0.2	0.2
	По содержанию гумуса	Среднегумусные	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Малогумусные	0	0.2	0.2	0	0.2	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0	0	0	0.2	0.2
		Слабогумусированные	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0
	По глубине залегания карбонатов	Высоко карбонатные	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Средне карбонатные	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0.2	0.2
		Глубоко карбонатные	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0

Рис. 4. Таблица-матрица почвенных свойств; PU, AU, AUlc – почвенные горизонты; 1В, 2В, 3В... – почвенные профили (разрезы).

Всего была использована информация по наличию или отсутствию 19-и свойств, комбинации из которых образуют все исследованные почвы участка. Было принято допущение, что набор введенных в таблицу свойств адекватно описывает почвы ключевого участка. Расчет таксономического расстояния между почвами производился согласно формуле [22]:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}, \quad (1)$$

где d_{ij} – таксономическое расстояние между почвами i и j, x_i и x_j – векторы-столбцы матрицы почвенных свойств. Контрастность почв по отношению друг к другу прямо пропорциональна значениям таксономического расстояния. Максимальное значение таксономического расстояния определяется количеством свойств в матрице (то есть общему количеству типовых, подтиповых и т. д. свойств), и баллам, присваиваемым за их наличие или отсутствие в почве; в нашем случае максимально возможное значение таксономического расстояния равно 2.98. Расчет таксономических расстояний был проведен для нескольких различных выборок почв: для выборок, включающих только почвы “В поля” (то есть только 10 почв), только почвы лесополосы (10 почв), только почвы “З поля” (10 почв); для выборок, характеризующих различные элементы рельефа: водораздельной поверхности и пологих склонов (15 почв), почв крутых склонов (12 почв), днища ложбины (3 почвы) и, наконец, для выборки, включающей все 30 исследованных почв. Для каждой выборки были определены средние, медианные, максимальные значения таксономических расстояний.

Статистическая обработка полученных результатов и построение карт проводились при помощи программных продуктов Statistica, QGIS, Surfer. Карты мощности гумусового горизонта, гумусового профиля, содержания Сорг., глубины вскипания почв при реакции с 10%-ным HCl, глубины обнаружения вторичных карбонатов и таксономических расстояний были построены методом ординарного крикинга. Почвенная карта была построена экспертным методом с применением методики, описанной в работе [11].

Количественная оценка почвенного разнообразия была проведена для почвенного покрова лесополосы, “З поля” и “В поля”. В качестве критериев использованы количество почвенных таксонов, образующих почвенный покров (индекс богатства), индексы разнообразия Шеннона (2), Симпсона (3), квадратной энтропии Рао (4), рассчитанные согласно формулам [20, 26]:

$$H = -\sum_{i=1}^{c} p_i \ln p_i, \quad (2)$$

$$G = 1 - \sum_{i=1}^{c} p_i^2, \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{c} d_{ij} p_i p_j, \quad (4)$$

где p_i, p_j – доля площади, занимаемая почвами i и j от всего почвенного покрова участка, c – количество почвенных разностей на ключевом участке, d_{ij} – таксономическое расстояние между почвами i и j.

Индексы разнообразия Шеннона, Симпсона учитывают компонентный состав и долевое участие компонентов в составе почвенного покрова; чем больше количество компонентов, образующих почвенный покров, и чем ближе размеры почвенных ареалов, тем выше значение индекса [20].

Индекс квадратной энтропии Рао, кроме долевого участия и количества компонентов, учитывает степень контрастности между компонентами по отношению друг к другу [26]. В качестве параметра контрастности были использованы значения таксономических расстояний. При одинаковом количестве компонентов и их долевом участии в составе почвенного покрова, разнообразие

будет выше там, где больше степень контрастности компонентов по отношению друг к другу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенный покров ключевого участка характеризуется достаточно широким спектром почв: тремя типами почв, семью подтипами и восемнадцатью видами. На участке встречены следующие виды почв: агрочерноземы глинисто-иллювиальные среднемощные малогумусные среднекарбонатные (Luvic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрезы 1З, 4З, 10З, 3Л, 5Л), агрочерноземы мицелярные среднемощные слабогумусированные среднекарбонатные (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрезы 1В, 9В, 8З), агрочерноземы глинисто-иллювиальные глубокоглееватые мощные малогумусные на двучленных почвообразующих породах (Luvic Stagnic Chernic Phaeozems (Loamic, Aric, Pachic), разрезы 3В, 4Л, 2З), агрочерноземы мицелярные мощные малогумусные среднекарбонатные (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрезы 10В, 5З), агрочерноземы глинисто-иллювиальные среднемощные малогумусные глубококарбонатные (Luvic Chernic Phaeozems (Loamic, Aric, Pachic), разрезы 1Л, 2Л), агрочерноземы глинисто-иллювиальные стратифицированные элювиированные глубокоглееватые мощные слабогумусированные на двучленных почвообразующих породах (Luvic Greyzemic Stagnic Chernic Phaeozems (Loamic, Aric, Novic, Pachic), разрезы 7В, 7З), агрочерноземы мицелярные среднемощные малогумусные среднекарбонатные (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрезы 2В, 9З), агротемногумусовая элювиированная глубокоглееватая мощная слабогумусированная на двучленных почвообразующих породах (Greyzemic Stagnic Chernic Phaeozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 4В), агрочернозем миграционно-мицелярный мощный малогумусный среднекарбонатный (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 5В), агрочернозем глинисто-иллювиальный глубокоглееватый среднемощный слабогумусированный на двучленных почвообразующих породах (Luvic Stagnic Chernic Phaeozems (Loamic, Aric, Pachic, Raptic), разрез 3З), агрочернозем глинисто-иллювиальный глубококвазиглееватый мощный слабогумусированный глубококарбонатный на двучленных породах (Luvic Stagnic Chernic Phaeozems (Loamic, Aric, Pachic), разрез 8В), агрочернозем глинисто-иллювиальный мощный малогумусный глубококарбонатный (Luvic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 6Л), агрочернозем глинисто-иллювиальный мощный слабогумусированный глубококарбонатный (Luvic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 6З), агрочернозем глинисто-иллювиальный среднемощный среднегумусный среднекарбонатный (Luvic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 10Л), агрочернозем глинисто-иллювиальный среднемощный слабогумусированный глубококарбонатный (Luvic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 6В), агрочернозем глинисто-иллювиальный среднемощный среднегумусный глубококарбонатный (Luvic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 9Л), агрочернозем глинисто-иллювиальный стратифицированный элювиированный глубокоглееватый мощный малогумусный на двучленных почвообразующих породах (Luvic Greyzemic Stagnic Chernic Phaeozems (Loamic, Aric, Novic, Pachic), разрез 7Л), агрочернозем мицелярный среднемощный среднегумусный среднекарбонатный (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic), разрез 8Л).

Рассмотрим характеристики почв по изученным трансектам. В пределах водораздельной поверхности, к которой приурочена трансекта 9, почвы представлены агрочерноземами мицелярными на полях (разрезы 9В, 9З) и агрочерноземом глинисто-иллювиированным в пределах лесополосы (разрез 9Л). Почвы полей на этой трансекте слабо отличаются друг от друга; их гумусовые горизонты выщелочены от карбонатов, новообразования в виде диффузных пятен карбонатов и тонких трубочек встречаются в нижележащем переходном горизонте ABca на глубине 50 см в разрезе 9В и 83 см в разрезе 9З. В подстилающем аккумулятивно-карбонатном горизонте диагностированы рыхлые сегрегации карбонатов, обнаружены следы периодического переувлажнения в виде разрозненных редких оливковых и буровато-ржавых пятен (диаметром до 1 см) и железо-марганцевых примазок. Мощности гумусового горизонта и содержание органического углерода в почвах разрезов 9Л и 9З близки (рис. 5) и превышают таковые в почве разреза 9В. Содержание $C_{орг}$ в верхней части гумусового горизонта варьирует от 2.8 до 4.2%.

В почве лесополосы водораздельной трансекты 9, в отличие от почв полей, под выщелоченным от карбонатов гумусовым горизонтом на глубине 70–115 см залегает глинисто-иллювиальный горизонт BI. Для него характерно наличие тонких глянцевых пленок на гранях структурных отдельностей более темного цвета в сравнении с цветом внутрипедной массы. Карбонатные новообразования в виде диффузных пятен и трубочек встречаются с глубины 115 см в горизонте BCA. В горизонтах BI и BCA диагностированы признаки периодического переувлажнения почв в виде единичных оливковых и охристых зон диаметром до 1 мм и железо-марганцевых примазок. Таким образом, основное отличие почв полей от почвы лесополосы на водораздельной поверхности в пределах трансекты 9 заключается в наличии глинисто-иллювиального горизонта в почве под древесной растительностью и отсутствие такового в почвах под агроценозами. Данная особенность может быть обусловлена усилением

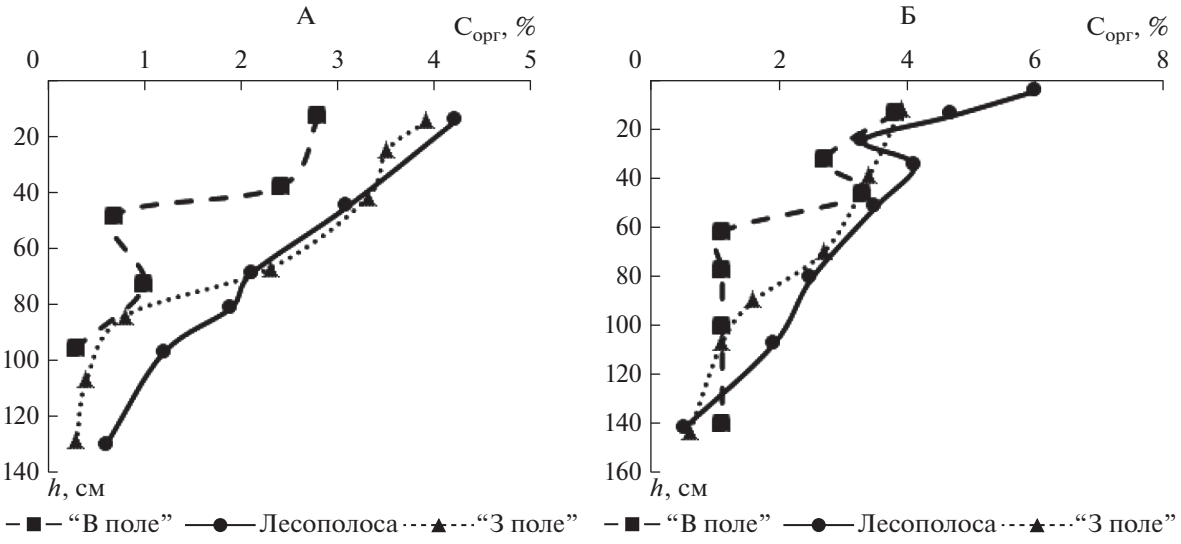

Рис. 5. Содержание органического углерода в почвах трансект водораздельной поверхности (А) и днища ложбины (Б).

процесса внутрипочвенного перемещения глинистых частиц под древесной растительностью в сравнении с травянистой, как это было показано в работах [2, 13].

Тренд к усилению проявления глинисто-иллювиального процесса в почвах под лесополосой, в сравнении с почвами полей, повторяется и в других исследованных почвах водораздельной поверхности (трансекты 2, 5) и пологих склонов (трансекты 1, 10). Отметим, что формирование горизонта BI на ключевом участке происходит не только в почвах лесополосы, но и в некоторых почвах полей (например, разрезы 13, 103), однако мощность горизонта, целостность и толщина кутан в почвах лесополосы в сравнении с сопряженными почвами полей всегда выше. В целом, почвы водораздельной поверхности и пологих склонов обладают наименьшей контрастностью по отношению к другим почвам ключевого участка (табл. 1).

Почвы днища ложбины (трансекта 7) представлены агрочерноземами глинисто-иллювиальными стратифицированными элювиированными глубокоглееватыми. Общей особенностью всех трех почв является повышенная мощность пахотного горизонта: 54 см в разрезе 7В, 40 см в разрезе 7Л и 55 см в разрезе 7З. Такая мощность может быть обусловлена периодической аккумуляцией твердофазного вещества на поверхности почв, переносимого водными потоками с вышележащих участков рельефа, и вовлечением этого материала в процесс распашки. Заметно меньшая мощность старопахотного горизонта под лесополосой в сравнении с аналогичными горизонтами почв полей, может быть обусловлена противоэрозионным действием лесополосы, приведшей к накоплению материала на поверхности почвы перед лесополосой и уменьшением выноса материала с поверхности почвы за лесополосой. Под гумусовым горизонтом во всех почвах ложбины залегает переходный бурый с темно-серым оттенком и выраженной белесой присыпкой по граням комковато-ореховатых структурных отдельностей горизонт ABel. В нижележащем горизонте BIel белесая присыпка покрывает тонкие глинистые кутаны; как и в случае с почвами водораздельной поверхности и пологих склонов, горизонт BIel обладает лучшей степенью выраженности и большей мощностью в почве под лесополосой. В почвах "В поля" и "З поля" нижняя часть переходного к почвообразующей породе горизонта BDg характе-

Таблица 1. Значения таксономических расстояний между почвами

Показатель	Почвы					
	водораздельной поверхности и пологих слонов	днища ложбины	крутого склона	"В поля"	лесополосы	"З поля"
Средние значения	1.06	0.38	1.22	1.37	0.99	1.22
Медианные значения	1.41	0.57	1.31	1.47	1.28	1.41

ризуется явными признаками переувлажнения – встречаются сизовато-охристые зоны оглеения, поверхность педов покрыта тонкими кутанами сизоватого оттенка, в значительном количестве присутствуют мелкие железо-марганцевые примазки; в почве лесополосы признаки переувлажнения присутствуют только в виде тонких прерывистых кутан сизоватого оттенка и железо-марганцевых примазок. Во всех почвах трансекты 7 отсутствуют карбонаты. Содержание органического углерода имеет поверхностно-аккумулятивный элювиально-иллювиальный характер в почвах лесополосы и "В поля", аккумулятивный – в почве "З поля" (рис. 5, Б). Вероятно, такие особенности профильного распределения отражают особенности намыва гумусированного материала в днище ложбины. Содержание гумуса в верхнем горизонте варьирует от 3.9 до 6%. Почвы днища ложбины обладают очень высокими средними и медианными значениями таксономических расстояний (рис. 6), что свидетельствует об их высокой степени отличия от других почв ключевого участка; при этом сами по себе почвы ложбин слабо отличаются друг от друга (табл. 1).

Почвы крутых склонов (уклоны 4°–6°) представлены агрочерноземами глинисто-иллювиальными (разрезы 6В, 3Л, 6Л, 4З, 6З), в том числе глубокоглееватыми (разрезы 3В, 4Л, 3З), глубококвазиглееватыми (разрез 8В), агрочерноземами мицеллярными (8Л, 8З), а также агротемногумусовой элювиированной глубокоглееватой (4В). Последняя почва является наиболее необычной в генетическом плане, в сравнении с другими почвами исследуемого участка. В этой почве морфологический профиль имеет гумусовую прокраску до глубины 110 см, ниже залегает подстилающая порода – желтовато-бурая с сизоватостью глина. До глубины 80 см цвет почвы темно-серый, ниже он становится белесовато-серым, на гранях структурных отдельностей появляется белесая присыпка, ее количество увеличивается вниз по почвенному профилю. На глубине 100–110 см почва характеризуется серовато-белесым цветом, встречаются сизые и буровато-желтые пятна. На основании указанных выше морфологических признаков, в почве были выделены следующие горизонты: PU (0–30 см)–AU (30–80 см)–AUel (80–100 см)–ADel (100–110 см)–Dg (110–160... см). Отсутствие иллювиального горизонта при наличии признаков элювиирования в горизонтах AUel и ADel в этой почве может свидетельствовать о выраженности латерального глее-элювиального выноса продуктов почвообразования, который обусловлен подстиланием верхней более легкой части почв водоупорной глинистой толщей. Эта почва (разрез 4В) характеризуется наибольшим средним и медианным значением таксономического расстояния (рис. 6), что позволяет считать ее наиболее отличающейся от всех других исследованных почв ключевого участка.

В целом, расчет таксономических расстояний между почвами, приуроченными к "В полю", между почвами, формирующимися в пределах лесополосы, и между почвами, приуроченными к "З полю" (то есть при группировке почв в соответствии с характером землепользования и пространственным положением относительно лесополосы; в каждой выборке по 10 почв) показывает, что почвы лесополосы наименее контрастны по отношению друг к другу, чем почвы полей. При этом максимальной контрастностью по отношению друг к другу характеризуются почвы "В поля", как по средним, так и по медианным значениям таксономических расстояний (табл. 1).

На рис. 2 отображена почвенная карта ключевого участка (почвы диагностированы на уровне подтипа); наибольшие площади приходятся на агрочерноземы мицеллярные, затем, в порядке убывания площадей, агрочерноземы глинисто-иллювиальные, агрочерноземы глинисто-иллювиальные глубокоглееватые, агрочерноземы глинисто-иллювиальные стратифицированные элювиированные глубокоглееватые, агрочерноземы миграционно-мицеллярные, агрочерноземы глинисто-иллювиальные глубококвазиглееватые и агротемногумусовые элювиированные глубокоглееватые. Максимальное количество компонентов, с которыми соседствуют почвенные ареалы, равно трем, и наблюдается для ареалов агрочерноземов глинисто-иллювиальных стратифицированных элювиальных глубокоглееватых и для ареала агрочернозема мицеллярного. В среднем, почвенные ареалы соседствуют с двумя компонентами. Мы предполагаем, что структура почвенного покрова ключевого участка может быть охарактеризована как пятнистости агрочерноземов мицеллярных, миграционно-мицеллярных и глинисто-иллювиальных на водораздельной поверхности, на склонах – неупорядоченно-полосчатые вариации водно-миграционного и, в меньшей степени, эрозионного генезиса агрочерноземов мицеллярных и миграционно-мицеллярных, агрочерноземов глинисто-иллювиальных, в том числе глубокоглееватых и глубококвазиглееватых, агрочерноземов глинисто-иллювиальных стратифицированых элювиированных глубокоглееватых, сочетаниями агрочерноземов глинисто-иллювиальных глубокоглееватых и агротемногумусовых глубокоглееватых элювиированных.

Если обратить внимание на отдельные свойства почв (табл. 2, рис. 2), то можно отметить, что почвы, формирующиеся под лесополосой, обладают наименьшим разбросом значений в мощности гумусового горизонта, всего гумусового профиля и содержания органического углерода. Для этих почв, в целом (если не учитывать почвы,

	1В	2В	3В	4В	5В	6В	7В	8В	9В	10В	1Л	2Л	3Л	4Л	5Л	6Л	7Л	8Л	9Л	10Л	1З	2З	3З	4З	5З	6З	7З	8З	9З	10З
1В	0.00	0.28	1.95	1.40	0.64	1.44	1.99	1.94	0.00	0.40	1.47	1.47	1.44	1.95	1.44	1.50	2.07	0.28	1.47	1.44	1.44	1.95	1.91	1.44	0.40	1.47	1.99	0.00	0.28	1.44
2В	0.28	0.00	1.93	1.43	0.57	1.47	2.01	1.96	0.28	0.28	1.44	1.44	1.41	1.93	1.41	1.47	2.05	0.28	1.47	1.44	1.41	1.93	1.93	1.41	0.28	1.50	2.01	0.28	0.00	1.41
3В	1.95	1.93	0.00	1.53	1.97	1.34	0.91	0.79	1.95	1.91	1.31	1.31	1.31	0.00	1.31	1.28	0.71	1.95	1.34	1.34	1.31	0.00	0.40	1.31	1.91	1.31	0.91	1.95	1.93	1.31
4В	1.40	1.43	1.53	0.00	1.49	1.99	1.58	1.67	1.40	1.40	2.01	2.01	2.01	1.53	2.01	1.99	1.53	1.43	2.01	2.01	2.01	1.53	1.53	2.01	1.40	1.97	1.58	1.40	1.43	2.01
5В	0.64	0.57	1.97	1.49	0.00	1.58	2.05	2.00	0.64	0.50	1.55	1.55	1.53	1.97	1.53	1.53	2.09	0.64	1.58	1.55	1.53	1.97	2.01	1.53	0.50	1.55	2.05	0.64	0.57	1.53
6В	1.44	1.47	1.34	1.99	1.58	0.00	1.40	1.29	1.44	1.50	0.28	0.28	0.40	1.34	0.40	0.40	1.51	1.47	0.28	0.40	0.40	1.34	1.28	0.40	1.50	0.28	1.40	1.44	1.47	0.40
7В	1.99	2.01	0.91	1.58	2.05	1.40	0.00	0.89	1.99	1.99	1.43	1.43	1.43	0.91	1.43	1.40	0.57	2.01	1.43	1.43	1.43	0.91	0.91	1.43	1.99	1.37	0.00	1.99	2.01	1.43
8В	1.94	1.96	0.79	1.67	2.00	1.29	0.89	0.00	1.94	1.94	1.32	1.32	1.35	0.79	1.35	1.29	1.06	1.96	1.32	1.35	1.35	0.79	0.79	1.35	1.94	1.26	0.89	1.94	1.96	1.35
9В	0.00	0.28	1.95	1.40	0.64	1.44	1.99	1.94	0.00	0.40	1.47	1.47	1.44	1.95	1.44	1.50	2.07	0.28	1.47	1.44	1.44	1.95	1.91	1.44	0.40	1.47	1.99	0.00	0.28	1.44
10В	0.40	0.28	1.91	1.40	0.50	1.50	1.99	1.94	0.40	0.00	1.47	1.47	1.44	1.91	1.44	1.44	2.03	0.40	1.50	1.47	1.44	1.91	1.95	1.44	0.00	1.47	1.99	0.40	0.28	1.44
1Л	1.47	1.44	1.31	2.01	1.55	0.28	1.43	1.32	1.47	1.47	0.00	0.00	0.28	1.31	0.28	0.28	1.49	1.47	0.28	0.40	0.28	1.31	1.31	0.28	1.47	0.40	1.43	1.47	1.44	0.28
2Л	1.47	1.44	1.31	2.01	1.55	0.28	1.43	1.32	1.47	1.47	0.00	0.00	0.28	1.31	0.28	0.28	1.49	1.47	0.28	0.40	0.28	1.31	1.31	0.28	1.47	0.40	1.43	1.47	1.44	0.28
3Л	1.44	1.41	1.31	2.01	1.53	0.40	1.43	1.35	1.44	1.44	0.28	0.28	0.00	1.31	0.00	0.40	1.49	1.47	1.41	0.28	0.00	1.31	0.28	0.00	1.44	1.31	1.43	1.44	1.41	0.00
4Л	1.95	1.93	0.00	1.53	1.97	1.34	0.91	0.79	1.95	1.91	1.31	1.31	1.31	0.00	1.31	1.28	0.71	1.95	1.34	1.34	1.31	0.00	0.40	1.31	1.91	1.31	0.91	1.95	1.93	1.31
5В	1.44	1.41	1.31	2.01	1.53	0.40	1.43	1.35	1.44	1.44	0.28	0.28	0.00	1.31	0.00	0.40	1.49	1.44	1.41	0.28	0.00	1.31	0.28	0.00	1.44	1.31	1.43	1.44	1.41	0.00
6Л	1.50	1.47	1.28	1.99	1.53	0.40	1.40	1.29	1.50	1.44	0.28	0.28	0.40	1.28	0.40	0.00	1.46	1.50	0.40	0.49	0.40	1.28	1.34	0.40	1.44	0.28	1.40	1.50	1.47	0.40
7Л	2.07	2.05	0.71	1.53	2.09	1.51	0.57	1.06	2.07	2.03	1.49	1.49	1.49	0.71	1.49	1.46	0.00	2.07	1.51	1.51	1.49	0.71	0.81	1.49	2.03	1.49	0.57	2.07	2.05	1.49
8Л	0.28	0.28	1.95	1.43	0.64	1.47	2.01	1.96	0.28	0.40	1.47	1.47	1.47	1.95	1.44	1.50	2.07	0.00	1.44	1.41	1.44	1.95	1.93	1.44	0.40	1.50	2.01	0.28	0.28	1.44
9Л	1.47	1.47	1.34	2.01	1.58	0.28	1.43	1.32	1.47	1.50	0.28	0.28	1.41	1.34	1.41	0.40	1.51	1.44	0.00	1.44	1.41	1.34	1.41	1.41	1.50	1.92	1.43	1.47	1.47	1.41
10Л	1.44	1.44	1.34	2.01	1.55	0.40	1.43	1.35	1.44	1.47	0.40	0.40	0.28	1.34	0.28	0.49	1.51	1.41	1.44	0.00	0.28	1.34	0.40	0.28	1.47	1.31	1.43	1.44	1.44	0.28
1З	1.44	1.41	1.31	2.01	1.53	0.40	1.43	1.35	1.44	1.44	0.28	0.28	0.00	1.31	0.00	0.40	1.49	1.44	1.41	0.28	0.00	1.31	0.28	0.00	1.44	1.31	1.43	1.44	1.41	0.00
2З	1.95	1.93	0.00	1.53	1.97	1.34	0.91	0.79	1.95	1.91	1.31	1.31	1.31	0.00	1.31	1.28	0.71	1.95	1.34	1.34	1.31	0.00	0.40	1.31	1.91	1.31	0.91	1.95	1.93	1.31
3З	1.91	1.93	0.40	1.53	2.01	1.28	0.91	0.79	1.91	1.95	1.31	1.31	0.28	0.40	0.28	1.34	0.81	1.93	1.41	0.40	0.28	0.40	0.00	0.28	1.95	1.31	0.91	1.91	1.93	0.28
4З	1.44	1.41	1.31	2.01	1.53	0.40	1.43	1.35	1.44	1.44	0.28	0.28	0.00	1.31	0.00	0.40	1.49	1.44	1.41	0.28	0.00	1.31	0.28	0.00	1.44	1.31	1.43	1.44	1.41	0.00
5З	0.40	0.28	1.91	1.40	0.50	1.50	1.99	1.94	0.40	0.00	1.47	1.47	1.44	1.91	1.44	1.44	2.03	0.40	1.50	1.47	1.44	1.91	1.95	1.44	0.00	1.47	1.99	0.40	0.28	1.44
6З	1.47	1.50	1.31	1.97	1.55	0.28	1.37	1.26	1.47	1.47	0.40	0.40	1.31	1.31	1.31	0.28	1.49	1.50	1.92	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.47	0.00	1.37	1.47	1.50	1.31
7З	1.99	2.01	0.91	1.58	2.05	1.40	0.00	0.89	1.99	1.99	1.43	1.43	1.43	0.91	1.43	1.40	0.57	2.01	1.43	1.43	1.43	0.91	0.91	1.43	1.99	1.37	0.00	1.99	2.01	1.43
8З	0.00	0.28	1.95	1.40	0.64	1.44	1.99	1.94	0.00	0.40	1.47	1.47	1.44	1.95	1.44	1.50	2.07	0.28	1.47	1.44	1.44	1.95	1.91	1.44	0.40	1.47	1.99	0.00	0.28	1.44
9З	0.28	0.00	1.93	1.43	0.57	1.47	2.01	1.96	0.28	0.28	1.44	1.44	1.41	1.93	1.41	1.47	2.05	0.28	1.47	1.44	1.41	1.93	1.93	1.41	0.28	1.50	2.01	0.28	0.00	1.41
10З	1.44	1.41	1.31	2.01	1.53	0.40	1.43	1.35	1.44	1.44	0.28	0.28	0.00	1.31	0.00	0.40	1.49	1.44	1.41	0.28	0.00	1.31	0.28	0.00	1.44	1.31	1.43	1.44	1.41	0.00
Среднее	1.23	1.22	1.28	1.64	1.36	1.00	1.39	1.37	1.23	1.24	0.97	0.97	0.98	1.28	0.98	1.01	1.44	1.25	1.27	1.04	0.98	1.28	1.11	0.98	1.24	1.24	1.39	1.23	1.22	0.98
Медиана	1.44	1.44	1.31	1.55	1.53	1.34	1.43	1.35	1.44	1.44	1.31	1.31	1.33	1.31	1.33	1.28	1.49	1.44	1.42	1.35	1.33	1.31	1.29	1.33	1.44	1.31	1.43	1.44	1.44	1.33
Максимум	2.07	2.05	1.97	2.01	2.09	1.99	2.05	2.00	2.07	2.03	2.01	2.01	2.01	1.97	2.01	1.99	2.09	2.07	2.01	2.01	2.01	1.97	2.01	2.01	2.03	1.97	2.05	2.07	2.05	2.01

Рис. 6. Таксономические расстояния между почвами ключевого участка. Интенсивность заливки указывает на значение таксономического расстояния; чем темнее цвет заливки, тем больше значение. 1В, 2В, 3В... – номера разрезов.

Таблица 2. Свойства почв лесополосы и прилегающих участков полей

Приуроченность почв	Среднее значение	Медианное значение	Минимум	Максимум	Разброс значений
Мощность гумусового горизонта, см					
“В поле”	49.5	50	32	65	33
Лесополоса	60.8	60	30	60	30
“З поле”	55	60	28	72	44
Мощность гумусового профиля, см					
“В поле”	71.0	70.0	50	100	50
Лесополоса	72.5	75.0	55	100	45
“З поле”	70.8	71.0	40	100	60
Содержание органического углерода, %					
“В поле”	3.86	3.65	2.8	4.9	2.1
Лесополоса	4.73	4.65	4	5.9	1.9
“З поле”	3.99	4.1	2.9	4.5	1.6
Глубина вскипания при реакции с 10%-ным HCl					
“В поле”	68.7	51.0	40.0	120.0	80.0
Лесополоса	78.1	75.0	60.0	115.0	55.0
“З поле”	67.9	60.0	50.0	100.0	50.0
Глубина обнаружения вторичных карбонатов в почвах					
“В поле”	68.7	51.0	40.0	120.0	80.0
Лесополоса	78.1	75	60.0	115.0	55.0
“З поле”	67.9	60	50	100.0	50
Содержание CO_2 карбонатов, в горизонте с положительной реакцией с 10%-ным HCl, %					
“В поле”	2.2	2.1	1.0	4.4	3.4
Лесополоса	2.5	1.8	0.7	5.7	5.0
“З поле”	3.0	2.5	1.0	6.6	5.6
Содержание CO_2 карбонатов, в горизонте обнаружения вторичных карбонатов, %					
“В поле”	3.0	3.4	1.0	5.3	4.3
Лесополоса	3.3	3.7	0.7	5.7	5.0
“З поле”	4.2	4.1	1.2	6.6	5.4

формирующиеся при близком залегании к поверхности бескарбонатных глин), характерны более глубокое вскипание при реакции с 10% р-ром HCl и обнаружение вторичных карбонатов, что также подтверждается работами [2, 17] по изучению стадиальности изменения карбонатного профиля черноземов при заселении их лесной растительностью. Для почв “В поля” характерен наибольший разброс значений этих величин. По-видимому, почвы “В поля” формируются в наиболее контрастных условиях увлажнения. Закономерно, по направлению от почв “В поля” к почвам лесополосы и почвам “З поля” (вслед за наклоном поверхности и по предполагаемому направлению общего движения водных потоков) происходит увеличение содержания карбонатов как в горизонте вскипания почвы при реакции с 10% HCl (но при выраженном отсутствии новообразований), так и в горизонте с карбонатными новообразованиями.

В табл. 3 приведены значения индексов разнообразия; среди факторов, обусловливающих пространственное разнообразие почв ключевого участка, важную роль играют неоднородность строения почвообразующих пород (локальные выходы бескарбонатных глин) и лесонасаждения. Двучленное строение почвообразующих пород диагностировано в четырех разрезах почв “В поля”, трех разрезах почв “З поля” и двух разрезах почв лесополосы. Древесные растения выступают в качестве физического барьера, задерживающего снег, подтягивают влагу из глубоких горизонтов и эвапотранспирируют, создают микроклиматические особенности, и тем самым, влияют на процессы перемещения поверхностного и внутрипочвенного стока. В частности, лесополоса способствует сезонному переувлажнению почв “В поля” в пределах ложбины (рис. 3). В результате наложения указанных факторов, участок, прилегающий к лесополосе с востока, характеризуется несколь-

Таблица 3. Значения индексов разнообразия почв

Индекс	Почвы “В поля”	Почвы лесополосы	Почвы “З поля”
Богатства	9	8	8
Шеннона	1.60	0.89	1.42
Симпсона	0.87	0.83	0.86
Рао	0.60	0.42	0.54

ко более высокими количественными показателями почвенного разнообразия (табл. 3). Значения индексов Шеннона, Симпсона и Рао (табл. 3), рассчитанные для почв “В поля” и “З поля” варьируют в пределах 1.42–1.6, 0.86–0.87 и 0.54–0.6 соответственно. Мы предполагаем, что до проведения лесомелиорации, значения индексов разнообразия для почв, находящиеся сейчас под лесополосой, должны приблизительно укладываться в указанные интервалы; вместе с тем, рассчитанные значения индексов для почв лесополосы 50–55-летнего возраста существенно ниже. Таким образом, сравнение индексов разнообразия (табл. 3), средних и медианных значений таксономического расстояния (табл. 1) свидетельствуют об уменьшении пространственного разнообразия почв и их контрастности по отношению друг к другу под лесополосой 50–55-летнего возраста, в сравнении с почвами прилегающих полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование почв лесополосы и прилегающих сельскохозяйственных полей, анализ влияния длительно-функционирующих лесонасаждений в агроландшафтах лесостепной зоны на локальное почвенное разнообразие позволило сформулировать следующие выводы:

– полезащитные лесонасаждения за полувековой период приводят к уменьшению контрастности почв по отношению друг к другу непосредственно под лесополосой;

– почвы лесополосы по сравнению с почвами полей характеризуются наименьшими значениями разброса по мощности гумусового горизонта, гумусового профиля и содержания органического углерода;

– более низкие значения индексов разнообразия Шеннона, Симпсона и Рао для почвенного покрова лесополосы, наблюдаемого на фоне более высоких и близких значений этих индексов для почв прилегающих полей, может свидетельствовать об уменьшении пространственного разнообразия почв в результате появления лесонасаждений.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую благодарность Н.Б. Хитрову за обсуждение результатов исследования, внесение замечаний и предложений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00056.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическое состояние черноземов ЦЧО / Под общ. ред. Щербакова А.П., Васенева И.И. Курск, 1996. 330 с.
2. *Александровский А.Л.* Модели педолитогенеза и эволюция почв // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в европейской России и на сопредельных территориях. Белгород, 22–25 октября 2019 г. Белгород: ИД “Белгород” НИУ “БелГУ”, 2019. С. 23–30.
3. *Алябина И.О.* Картографическая оценка разнообразия почв России // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 1. С. 8–15.
4. *Ерусалимский В.И., Рожков В.А.* Многофункциональная роль защитных лесных насаждений // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. № 88. С. 121–137.
5. *Заздравных Е.А.* Пространственно-временные особенности трансформации пахотных почв лесостепи на юге Среднерусской возвышенности. Дис. ... канд. геогр. н. Белгород: НИУ “БелГУ”, 2017. 200 с.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
7. *Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С.* Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С. 1–13. https://doi.org/10.7868/S0032180X1801001X
8. *Кретинин В.М.* Мониторинг плодородия почв лесоаграрных ландшафтов лесостепной зоны // Докл. ВАСХНИЛ. 1992. № 3. С. 16–20.
9. *Смирнова М.А., Герасимова М.И.* Отделы в Классификации почв России: оценка корректности выделения по таксономическим расстояниям // Поч-

воведение. 2017. № 3. С. 275–288. https://doi.org/10.7868/S0032180X1703011X

10. *Стеценко А.В.* Возможности предотвращения негативных изменений в сельском хозяйстве с помощью экономических механизмов, заложенных в Киотском протоколе. [Электронный ресурс], 2011. URL: http://kyotoforests.narod.ru
11. *Хитров Н.Б.* Создание детальных почвенных карт на основе интерполяции данных о свойствах почв // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1045–1056.
12. *Чегодаева Н.Д., Каргин И.Ф., Астрадамов В.И.* Влияние полезащитных лесных полос на водно-физические свойства почвы и состав населения жужелиц прилегающих полей: монография. Саранск: Мордовское кн. изд-во, 2005. 125 с.
13. *Чендев Ю.Г., Криушин В.П.* Пространственно-временные изменения некоторых черноземов Восточно-Европейской равнины // Известия РАН. Сер. Географическая. 2007. № 1. С. 73–82.
14. *Щеглов Д.И.* Черноземы центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. М.: Наука, 1999. 214 с.
15. *Bockheim J.G., Schliemann S.A.* Soil richness and endemism across an environmental transition zone in Wisconsin, USA // Catena. 2014. V. 113. P. 86–94. https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.011
16. *Brandle J.R., Hodges L., Zhou X.H.* Windbreaks in North American agricultural systems // Agroforestry Systems. 2004. № 61. P. 65–78.
17. *Chendev Yu., Gennadiev A., Sauer T., Terekhin E., Matveev S.* Forests advancements to grasslands and their influence on soil formation: Forest Steppe of the Central Russian Upland // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 392. P. 012003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012003
18. *Costantini E.A.C., L'Abate G.* The soil cultural heritage of Italy: Geodatabase, maps, and pedodiversity evaluation // Quaternary International, 2009. Iss. 1–2. P. 142–153. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.02.028
19. *Fu T., Han L., Gao H., Liang H., Liu J.* Geostatistical analysis of pedodiversity in Taihang Mountain region in North China // Geoderma. 2017. V. 11. № 32. P. 91–99. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.010
20. *Ibanez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A.* Pedodiversity State of the Art and Future Challenges // Pedodiversity. London: CRC press, 2013. P. 1–28. https://doi.org/10.1201/b14780-2
21. *Kort J.* Benefits of windbreaks to field and forage crops // Agricultural Ecosystems and Environment. 1988. V. 22/23. P. 165–190. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-43019-9.50018-3
22. *Minasny B., McBratney A.B.* Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes // Geoderma. 2007. V. 142. P. 285–293. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.022
23. *Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E.* Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base // Geoderma. 2010. V. 155. P. 132–139. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024
24. *Perry C.H., Woodall C.W., Liknes G.C., Schoeneberger M.M.* Filling the gap: improving estimates of working tree resources in agricultural landscapes // Agroforestry Systems. 2009. V. 75. № 1. P. 91–101. https://doi.org/10.1007/s10457-008-9125-6
25. *Petersen A., Grongroft A., Miehlich G.* Methods to quantify the pedodiversity of 1 km^2 areas – results from southern African drylands // Geoderma. 2009. V. 155(3–4). P. 140–146. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.009
26. *Rao C.R.* Diversity and dissimilarity coefficients: A unified approach // Theoretical Population Biology. 1982. V. 21. № 1. P. 24–43. http://dx.doi.org/1016/0040-5809(82)90004-1
27. *Toomanian N., Esfandiarpoor I.* Challenges of pedodiversity in soil science // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. № 13. P. 1486–1502. https://doi.org/10.1134/S1064229310130089

Influence of Forest Shelter Belts on Local Pedodiversity (Belgorod Oblast)

M. A. Smirnova[1, *], A. N. Gennadiev[1], Yu. G. Chendev[2], and R. G. Kovach[1]

[1]Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

[2]Belgorod State University, Belgorod, 308015 Russia

**e-mail: summerija@yandex.ru*

Detailed mapping of soils under a multi-row 50 years old shelter belt (4 km long) crossing diverse landforms was performed as well as of soils of adjacent croplands; this key site was chosen in the Belgorod oblast in the south of the Central Russian Upland. Samples were collected in 30 points both in the central part of the forest belt and at a distance of 30 meters on both sides of the belt. Maps of humus horizon depth, organic carbon content, depth of carbonates in soil profiles, and soil map were compiled; indices of richness, diversity (Shannon, Simpson, Rao) and taxonomic distances (as a quantitative indicator of soil cover contrasts) were calculated. It has been shown that soils under shelter belts are less contrasting among each other and more diverse than in adjacent croplands. The forest belt effect on pedodiversity in the key site extends over adjacent areas affected by periodic waterlogging due to the barrier function of the belt.

Keywords: soil cover pattern, Central Russian Upland, pedodiversity, Chernozems, taxonomic distance

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1053–1070

ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.41

ПОЧВЫ И ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ГОРНО-ТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ПОЛЯРНОГО УРАЛА НА КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ: РАЗНООБРАЗИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА И АЗОТА[1]

© 2020 г. Е. В. Шамрикова[a], *, Е. В. Жангуров[a], Е. Е. Кулюгина[a], М. А. Королев[a], О. С. Кубик[a], Е. А. Туманова[a]

[a] *Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, 167982 Россия*

**e-mail: shamrik@ib.komisc.ru*

Поступила в редакцию 30.12.2019 г.
После доработки 11.03.2020 г.
Принята к публикации 01.04.2020 г.

На примере ландшафтов северной части хребта Большой Пайпудынский, относящемуся к Полярному Уралу, выявлено классификационно-номенклатурное разнообразие почв на карбонатных породах, обусловленное как биоклиматическими, так и геогенными факторами (рельефом, мощностью элювиально-делювиальных отложений карбонатных пород). Показано, что под различными типами растительных сообществ формируются почвы постлитогенного ствола из отделов криометаморфических (Calcaric Skeletic Regosol), литоземов (Calcaric Mollic Folic Leptosol), органо-аккумулятивных (Calcaric Mollic Leptic Stagnosol; Calcaric Folic Gleysol), занимающие незначительные ареалы и мелконтурные сочетания. Масса органических форм углерода и азота в наземной фитомассе (НФ) растений составляет 40–49 и 0.9–2.3% соответственно. Запасы сырой НФ колеблются в диапазоне 20–1600 г/м^2. В каждом профиле поверхностные горизонты имеют максимальное содержание органического углерода и азота (до 40 и до 2.5% соответственно). Выявлены закономерности распределения $C_{орг}$ и $N_{орг}$ в почвах в связи с различной продуктивностью растительных сообществ, спецификой состава опада и условий его разложения. Во всех почвенных профилях содержание $C_{неорг}$ возрастает с глубиной, достигая 12%. Доля минерального азота не превышает 1%. Максимальное количество $N\text{-}NH_4^+$ и $N\text{-}NO_3^-$ приходится на поверхностные горизонты, где их концентрации достигают 140 и 30 мг/кг.

Ключевые слова: карбонаты, Урал, классификация почв, диагностические горизонты, надземная фитомасса, органический углерод, неорганический углерод, $N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_3^-$

DOI: 10.31857/S0032180X20090154

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени основные представления по почвам Полярного Урала получены по наиболее легко достижимым в транспортном отношении районам и ограничиваются материалами единичных маршрутных почвенно-географических исследований [1, 7, 38, 40]. В качестве преобладающих типов почв различных горных хребтов Полярного Урала на Государственной почвенной карте масштаба 1 : 1000000 (лист Q-41 “Воркута”) представлены горно-тундровые пропитанно-гумусовые (оподзоленные), горно-тундровые глеевые [14]. На примере кислых и ультраосновных пород показаны генетические особенности почвообразования и классификационно-номенклатурное разнообразие почв [16, 22, 27].

Значительная часть территории северной части (65°40′–68°30′ с. ш.) Уральского горного хребта в силу своей труднодоступности остается малоизученной. Существенные размеры региона, особенности геоморфологии и сложно расчлененный рельеф обуславливают значительное биоразнообразие наземных экосистем, а широкое распространение различных по генезису и происхождению горных почвообразующих пород определяют существенное разнообразие различных типов и подтипов почв [16, 55].

Одними из наименее исследованных на Полярном Урале являются почвы, сформированные на продуктах выветривания плотных карбонатных пород. Актуальность исследований подоб-

[1] Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X20090154 для авторизованных пользователей.

ных объектов определяется не только региональной значимостью, но и необходимостью решения ряда фундаментально-научных задач с учетом современных наработок субстантивно-генетической классификации почв России. Сравнительно-географический анализ данных научной литературы, охватывающей различные природные зоны Восточно-Европейской равнины, Уральской горной страны, Среднесибирского плоскогорья, центральной и южной Якутии, Саян, отражает существенные отличия таежных почв континентальных областей на карбонатных породах от их аналогов в гумидных (субгумидных) областях умеренно-континентального климата [3, 12, 18, 24, 48]. Более того, почвы на известковых породах отличаются и от зональных аналогов, и друг от друга [12, 13, 21]. Широкое разнообразие карбонатных почв определяется природой субстрата (щебнистость, гранулометрический состав), что закладывает в каждую группу пород заданную лимитированность проявления тех или иных почвообразовательных процессов. Кроме того, разнообразие карбонатных почв зависит от потенциала климата и биоты ("закон литогенной матричности") [11, 18].

Наряду со слабой изученностью компонентов почвенного покрова в геохимически сопряженных ландшафтах, актуальной задачей современности является выявление роли органического вещества в процессах почвообразования. В тундровой зоне неоднородность распределения органических форм углерода и азота в почвах тесно взаимосвязана с мозаичностью растительности [28–30, 42, 43]. В этой связи Полярный Урал с широким развитием массивно- и редкоостровных многолетнемерзлых пород является одним из наиболее перспективных и приоритетных объектов для почвенно-географических исследований.

Цель работы – выявление разнообразия, морфогенетической характеристики и закономерностей распределения различных форм углерода и азота в почвах, сформированных на элювиально-делювиальных отложениях карбонатных пород (Полярный Урал).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований располагается в Полярно-Уральской горной почвенной провинции тундровой зоны Европейской полярной почвенно-биоклиматической области [33]. В системе геоботанического районирования он расположен в Южнополярноуральском округе Камско-Печорско-западноуральской подпровинции Уралозападносибирской провинции [9]. В растительности округа выделяется три высотных пояса: подгольцовый (горных редколесий), горно-тундровый и гольцовый. Полевые работы проводили в последней декаде августа 2018 г. в северной части хребта Большой Пайпудынский (рис. 1).

Климат района гумидный континентальный, характерны резкие колебания сезонных и суточных температур. Количество осадков в зависимости от высоты горных массивов сильно варьирует и составляет 600–800 мм/год [45].

Для этой территории, как и для других северных массивов Полярного Урала, характерны отложения сланцевых и эффузивных толщ метаморфического комплекса, содержащих сланцы, фельзиты, кварцито-песчаники. Ключевые участки были заложены в северной части хребта Большой Пайпудынский на правом берегу руч. Развильный, где широко развиты выходы массивных мраморизованных известняков на дневную поверхность имеющих нижнедевонский возраст [41]. Полевые исследования проводили методом заложения почвенно-геоморфологического профиля (катены) с протяженностью около 1.5 км (рис. 2). В качестве непосредственных объектов исследования выбрано семь ключевых участков в горно-тундровом поясе на высотном профиле от коренного берега руч. Развильный (1-ПУ, координаты: 67°13′28.7″ N; 65°28′39.8″ E) до плато в верхней части склона (8-ПУ, координаты: 67°13′33.3″ N; 65°38′04.8″ E).

В каждой из точек наблюдения были заложены опорные разрезы, характеризующие основные типы и подтипы почв, сформированных на элювиально-делювиальных отложениях карбонатных пород. При морфологическом описании индексация горизонтов и классификация почв дана в соответствии с [35] и Международной реферативной базой почв [31]. Окраска горизонтов определена по шкале Манселла [58].

Изучение растительного покрова территории проводили с использованием методов закладки пробных площадей и маршрутных наблюдений (табл. 1). При выборе и описании пробных площадок использовали общепринятые геоботанические методы [4]. Количество надземной фитомассы растительных сообществ определяли методом укосов – изъятия надземных частей растений с учетных площадок размером 50 × 50 см в трехкратной повторности. Растения срезали на уровне границы почвы, затем в полевых условиях взвешивали сырую биомассу.

Химический состав почв и фитомассы приведен в табл. 2. Содержание общего углерода ($C_{общ}$) и азота ($N_{общ}$) измерена на CHNS-O-элементном анализаторе EA 1110 (Carlo Erba, Италия). Объемно-метрическим методом с помощью кальциметра 08.53 Eijkelkamp (SA07, США-Нидерланды) выполнено определение содержания карбонатов с последующим пересчетом на неорганический углерод почв ($C_{неорг}$). Содержание минеральных форм азота ($N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_3^-$) измерено фотометрическим методом на фотометре фотоэлектрическом КФК-3 (Россия).

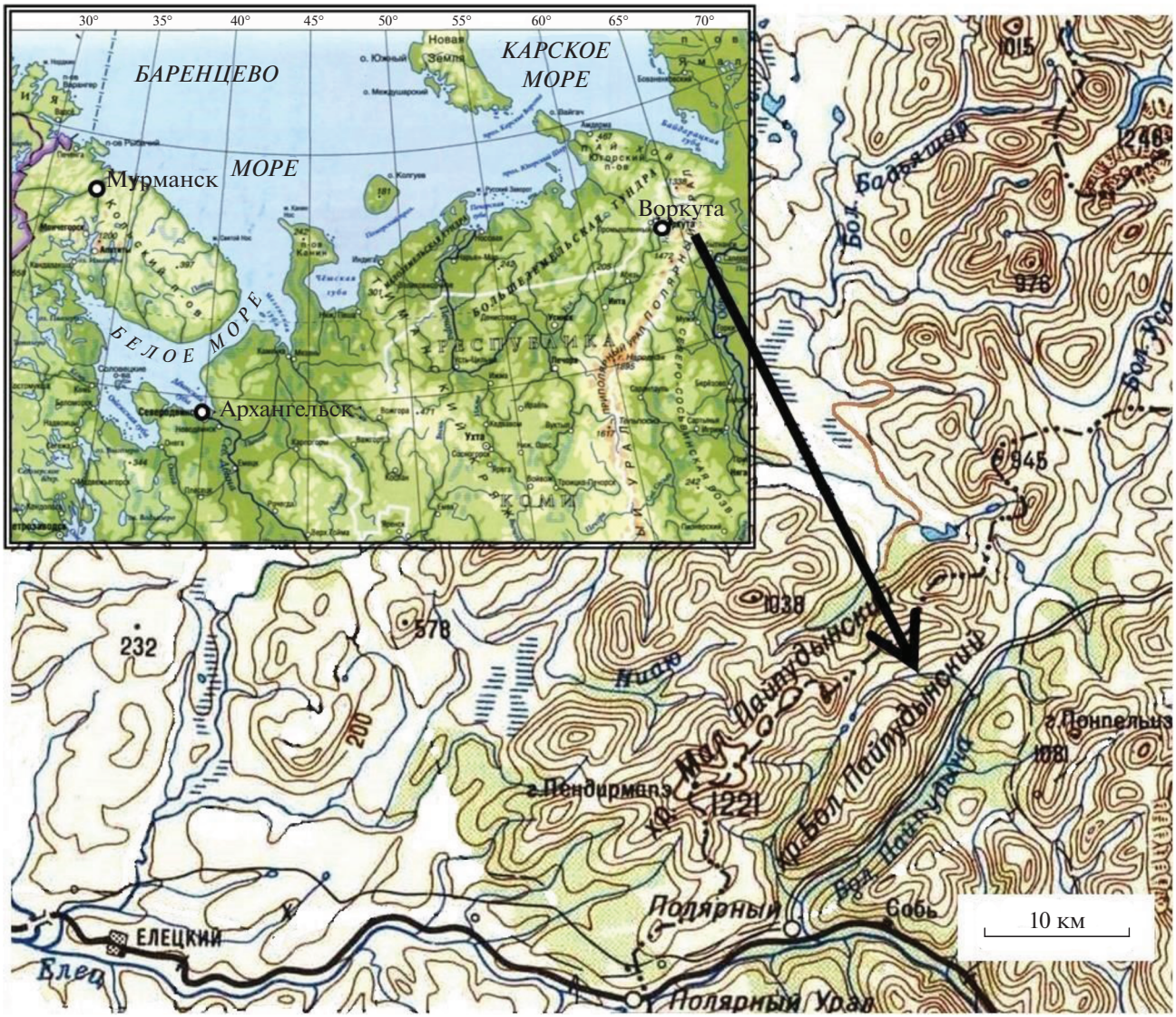

Рис. 1. Район исследований.

Разложение проб почв для нахождения содержания кислоторастворимых форм K, Na, Ca, Mg, Al, Fe в горизонтах BC и C темногумусовой почвы (6-ПУ) проведено методом микроволнового вскрытия с использованием СВЧ-минерализатора “Минотавр-2” (Россия, ООО “Люмэкс”). Данный прием предполагает разложение почв смесью концентрированных растворов азотной кислоты и перекиси водорода в соотношении 10 : 1 при t = 200°C под давлением восемь атмосфер (табл. 3). Содержание элементов в пробах измерено методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой Spectro Ciros SPECTROARCOS.

Углерод и азот органических соединений ($C_{орг}$, $N_{орг}$) почв рассчитаны по разности содержаний общих и неорганических форм элементов. Значения pH почв измерены на иономере универсальном Анион-4100 (Россия).

Аналитические данные получены в лаборатории Экоаналит, а также отделе почвоведения Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Растительный покров. Исследуемые почвы горной тундры приурочены к разным элементам мезорельефа и формируются под различными типами растительных сообществ (табл. 1). В фитоценозах, приуроченных к разрезам, отмечено 20 кальцефильных видов (19 – сосудистые растения, 1 вид лишайников), показывающих специфику подстилающих пород [2, 23, 48]. По снижению разнообразия видов, избирательных к карбонатным субстратам, сообщества можно расположить в

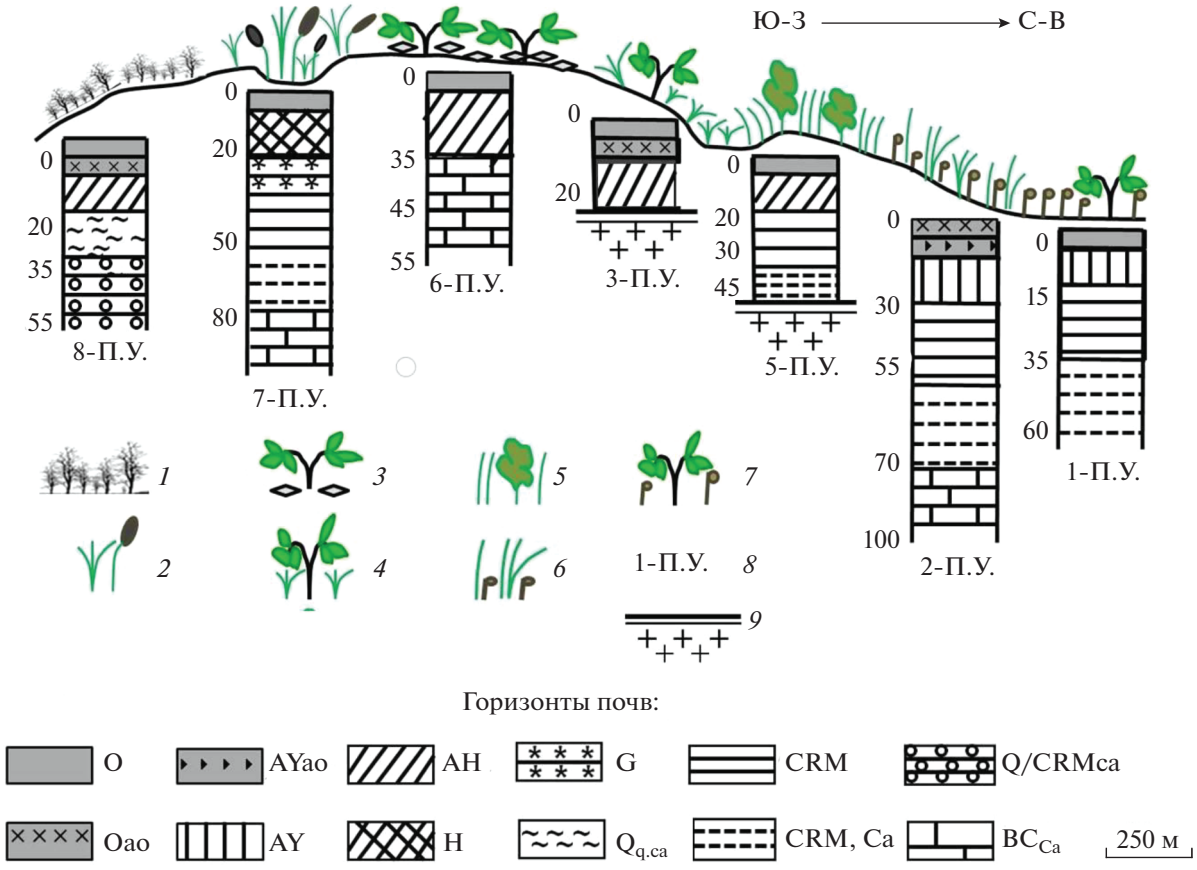

Рис. 2. Распределение объектов исследований на ландшафтно-геоморфологическом профиле. Условные обозначения: *1* – кустарничково-дриадово-моховое сообщество; *2* – высокотравный луг; *3* – дриадовая тундра; *4* – дриадово-травяное сообщество; *5* – травяно-ивковое сообщество; *6* – разнотравно-осоково-моховое сообщество; *7* – дриадово-моховая тундра; *8* – № почвенного разреза; *9* – подстилание плит.

следующий ряд: разнотравно-осоково-моховые (число видов кальцефилов больше 10) → различные варианты кустарничковых тундр (пятнистые кустарничково-дриадово-моховые, дриадово-травяные, травяно-ивковые, кустарничково-дриадово-моховые) (число кальцефилов 6–9) → высокотравные луговые (число кальцефилов менее 5). Кроме того, некоторые виды, произрастающие на этих субстратах относятся к редким, включенным в Красную Книгу Ямало-Ненецкого автономного округа: *Rhodiola quadrifida* и *Pinguicula alpina* – категория 3, *Carex fuscidula* и *Carex glacialis* – список бионадзора.

Сочетание ландшафтно-геоморфологических условий изучаемой территории, наряду со спецификой карбонатных почвообразующих пород создает предпосылки для формирования экосистем, различающихся по своим функциональным характеристикам. Важным фактором, определяющим видовой состав и структуру сообщества, а, следовательно, и влияющим на запасы фитомассы в экосистеме, является его положение в рельефе, что определяет температуру, мощность зимнего снегового покрова и степень увлажненности почвы в вегетационный сезон [17]. Запасы надземной фитомассы растительных сообществ различаются существенно, можно выделить две группы. Первую группу с наиболее высокими значениями показателя составляют высокотравный луг (7-ПУ) и кустарничково-дриадово-моховая тундра (8-ПУ) – 1648 и 1500 г/м^2 соответственно. Высокотравный луг формируется в верхней части склона в небольшом (20 на 20 м) понижении на наиболее оснеженных зимой и увлажненных летом позициях. В травяно-кустарничковых и травяной экосистемах преобладают растения, надземные органы которых, как правило, полностью или большей частью отмирают к концу вегетационного сезона.

Вторая группа объединяет растительные сообщества (1–6-ПУ), у которых запасы наземной фитомассы колеблются в диапазоне 18–180 г/м^2.

Минимальные значения продуктивности характерны для полигональной дриадовой тундры (6-ПУ), формирующейся в элювиальных условиях верхней части предгорного увала (рис. 2). Жиз-

Таблица 1. Характеристика растительных сообществ исследуемой территории и их биологическая продуктивность

№ разреза	Название сообщества; абсолютная высота, м над уровнем моря	ОПП/первый ярус/второй ярус, %	Высота растительного покрова: первый ярус/второй ярус, см	Доминирующий комплекс видов		Виды-кальцефиты	Надземная фитомасса (сырая), г/м^2
				первый ярус	второй ярус		
1-ПУ	Пятнистые дриадово-моховые тундры; 230 м над ур. м.	60/60/30	20/1	*Dryas octopetala* L., *Oxytropis sordida* (Willd.) Pers., *Salix glauca* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup	*Rhytidium rugosum* (Hedw.) Kindb., мхи рода *Dicranum*	*Dryas octopetala* L., *Hedysarum arcticum* B. Fedtsch., *Carex glacialis* Mackenz., *Pedicularis oederi* Vahl, *Saxifraga oppositifolia* L., *Thalictrum alpinum* L.	90.8 ± 0.9*
2-ПУ	Разнотравно-осоково-моховое сообщество; 235 м над ур. м.	100/70/70	25/1	*Carex sabynensis* Less, ex Kunth, *Silene acaulis* (L.) Jacq., *Hedysarum arcticum* B. Fedtsch	Мхи рода *Dicranum*	*Dryas octopetala* L., *Salix reticulata* L., *Carex capillaris* L., *Carex sabynensis* Less, ex Kunth, *Carex redowskiana* (C. A. Mey.) Egor., *Hedysarum arcticum* B. Fedtsch., *Silene acaulis* (L.) Jacq., *Thalictrum alpinum* L., *Oxytropis sordida* (Willd.) Pers., *Pedicularis oederi* Vahl, *Selaginella selaginoides* (L.) Link, *Pinguicula alpina* L., *Potentilla crantzii* (Crantz) G. Beck ex Fritsch, *Tofieldia coccinea* Richards., *Tofieldia pusilla* (Michx.) Pers., лишайник – *Vulpicida juniperinus* (L.) J.-E. Mattsson et M. J. Lai	68.4 ± 3.7
3-ПУ	Дриадово-травяное сообщество; 246 м над ур. м.	50/50/–	5/–	*Dryas octopetala* L., *Silene acaulis* (L.) Jacq	–	*Dryas octopetala* L., *Salix reticulata* L., *Carex capillaris* L., *Carex glacialis* Mackenz., *Hedysarum arcticum* B. Fedtsch., *Silene acaulis* (L.) Jacq., *Thalictrum alpinum* L., *Saxifraga oppositifolia* L., *Tofieldia coccinea* Richards	112.8 ± 4.8

Таблица 1. Продолжение

№ разреза	Название сообщества; абсолютная высота, м над уровнем моря	ОПП/первый ярус/второй ярус, %	Высота растительного покрова: первый ярус/второй ярус, см	Доминирующий комплекс видов		Виды-кальцефиты	Надземная фитомасса (сырая), г/м^2
				первый ярус	второй ярус		
5-ПУ	Травяно-ивковое сообщество; 246 м над ур. м.	100/5/100	40/10	*Betula nana* L.	*Salix reticulata* L., *Dryas octopetala* L., *Hedysarum arcticum* B. Fedtsch., *Festuca ovina* L., *Geranium albiflorum* Ledeb.	*Dryas octopetala* L., *Salix reticulata* L., *Carex capillaris* L., *Hedysarum arcticum* B. Fedtsch., *Silene acaulis* (L.) Jacq., *Thalictrum alpinum* L., *Selaginella selaginoides* (L.) Link.	179.4 ± 37.1
6-ПУ	Полигональные дриадовые тундры; 264 м над ур. м.	25/25/–	10/–	*Dryas octopetala* L.	–	*Dryas octopetala* L., *Salix reticulata* L., *Carex capillaris* L., *Carex glacialis* Mackenz., *Silene acaulis* (L.) Jacq., *Oxytropis sordida* (Willd.) Pers., *Saxifraga oppositifolia* L., *Tofieldia coccinea* Richards.	18.1 ± 1.2
7-ПУ	Высокотравный луг; 261 м над ур. м.	100/100/+	80/–	*Angelica archangelica* L.	–	*Carex redowskiana* (C. A. Mey.) Egor.	1648.8 ± 599.2
8-ПУ	Кустарничково-дриадово-моховое сообщество; 260 м над ур. м.	100/80/90	20/5	*Dryas octopetala* L., *Salix reticulata* L., *Betula nana* L., *Carex arctisibirica* (Jurtz.) Czer., *Salix phylicifolia* L., *Vaccinium uliginosum* L.	*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Rhytidium rugosum* (Hedw.) Kindb., *Dicranum* sp.	*Dryas octopetala* L., *Salix reticulata* L., *Carex redowskiana* (C. A. Mey.) Egor., *Carex glacialis* Mackenz., *Oxytropis sordida* (Willd.) Pers., *Pedicularis oederi* Vahl., *Tephroseris heterophylla* (Fisch.) Konechn., *Tofieldia coccinea* Richards.	1539.1 ± 350.4

Примечание. ОПП – общее проективное покрытие; * – стандартное отклонение среднеарифметического, “–” – отсутствует, “+” – менее 1%.

Таблица 2. Особенности морфологического строения и физико-химическая характеристика почв

Горизонт	Глубина, см	Цвет по шкале Манселла	Гранулометрический состав (полевое определение), структура (размер структурных отдельностей)	pH_{H_2O}	$C_{неорг}$	$C_{орг}$	$N_{общ}$	$N\text{-}NH_4^+$	$N\text{-}NO_3^-$	C/N
					%			мг/кг		
Разрез 1-ПУ. Дерново-криометаморфическая остаточно-карбонатная почва (Calcaric Skeletic Regosol Loamic)										
Фитомасса		–	–	–	<0.06**	44.3	1.18	0.00	0.00	44
O	0–1	–	–	6.67		17.7	0.94	73.93	10.90	18
AY1	1–5	10YR3/3*; 4/3	Легкий суглинок, бесструктурный	6.99		3.3	0.24	7.17	0.00	16
AY2	5–15	10YR 4/3	Легий суглинок, мелкокомковатая структура	7.33	0.06	3.2	0.23	7.00		16
CRM1	15–35	10YR5/4*; 6/6	Средний суглинок, линзовидно-слоистая структура (5–8 мм), мелкокомковатые структурные отдельности 4–7 мм	7.72	0.61	0.6	0.072	3.13		9
CRM2ca	35–60	10YR6/2*; 5/6		7.90	0.52	0.2	0.050	2.61		6
Пятно без растительности (правая часть передней стенки разреза 1-ПУ)										
C	0–1	10YR 5/4	Легкий суглинок, линзовидно-слоистая структура, размер с.о. 2–3 мм	7.84	0.19	1.2	0.105	4.32	0.00	13
AY@	1–5	10YR 4/3		7.87	<0.06	1.1	0.084	3.13		16
AY@	5–20	10YR 5/4	Средний суглинок, линзовидно-слоистая структура, размер с.о. 3–5 мм	7.57		1.0	0.075	3.07		15
CRMca	20–30	10YR 6/2		7.89	0.22	0.5	0.052	2.95		11
BCca	30–60	–	Тяжялый суглинок, бесструктурный	8.05	0.58	0.3	0.046	2.50		8
Разрез 2-ПУ. Дерново-криометаморфическая остаточно-карбонатная почва (Calcaric Skeletic Regosol Loamic)										
Фитомасса		–	–	–	<0.06	42.1	1.75	0.00	0.00	28
Oao	0–2	–	–	7.00		24.6	1.72	126.88	7.20	17
AYao	2–5	10YR 2/1	–	6.71	0.08	13.1	1.09	59.70	9.68	14
AY1	5–15	10YR 3/2	Легкий суглинок, бесструктурный	7.47	0.49	3.8	0.29	5.35	0.00	15
AY2	15–30	10YR 3/2	Легкий суглинок, мелкокомковатая структура	7.62	0.91	3.5	0.31	5.06		11
CRM1	30–55	10YR 4/3	Легкий-средний суглинок, тонкоплитчатая (3–4 мм) структура	7.92	0.65	0.3	0.036	2.56		9
CRM2ca	55–70	10YR 4/6		7.95	0.11	0.2	0.036	2.67		8
BCca	70–100	2.5Y 4/2	Тонкозернистый песок	8.10	0.40	0.0	0.024	2.16		2

Таблица 2. Продолжение

Горизонт	Глубина, см	Цвет по шкале Манселла	Гранулометрический состав (полевое определение), структура (размер структурных отдельностей)	pH_{H_2O}	$C_{неорг}$	$C_{орг}$	$N_{общ}$	$N\text{-}NH_4^+$	$N\text{-}NO_3^-$	C/N
					%			мг/кг		
Разрез 3-ПУ. Карболитозем перегнойно-темногумусовый (Calcaric Mollic Folic Leptosol (Humic))										
Фитомасса		–	–	–	<0.06	48.5	1.98	0.00	0.00	28
O	0–2	–	–	7.22	0.1	24.0	1.29	50.60	3.53	22
Oao	2–4	10YR 2/1	–	7.40	0.3	18.5	1.17	35.23	3.83	18
AH1	4–15	10YR 2/2	Легкий суглинок, комковато-зернистая структура	7.50	0.6	5.7	0.52	18.15	0.00	13
AH2	15–20	10YR 3/2		7.69	0.4	5.3	0.49	17.03		12
Разрез 5-ПУ. Перегнойно-темногумусовая криометаморфическая остаточно-карбонатная почва (Calcaric Mollic Leptic Stagnosol Skeletic)										
Фитомасса		–	–	–	<0.06	44.0	1.89	0.00	0.00	27
O	0–2	–	–	6.90		30.2	1.96	135.98	10.28	18
AH1	2–5	–	–	6.59		11.0	0.98	35.80		13
AH2	5–15(20)	–	–	6.97		7.6	0.69	15.88		13
CRM1	15(20)–30	–	Средний суглинок, линзовидно-слоистая структура, мелкокомковатые. с.о.	7.40		1.8	0.15	4.82		14
CRM2ca	30–45	–		7.73	0.66	0.9	0.13	3.30		8
Разрез 6-ПУ. Перегнойно-темногумусовая остаточно-карбонатная почва (Calcaric Leptic Skeletic Regosol)										
Фитомасса		–	–	–	<0.06	42.0	0.94	0.00	0.0	52
O	0–1	–	–	7.57	7.03	16.6	0.87	49.45	10.90	22
AH1	1–10(15)	10YR 4/3	Супесчаный, бесструктурный	8.04	8.11	3.5	0.32	14.18	0.00	13
AH2	10(15)–25	10YR 3/3*; 3/1	Супесчаный, бесструктурный	8.08	5.02	7.4	0.54	13.60		16
AH3	25–35	10YR 2/1	Легкий суглинок, мелкозернистая структура	7.98	4.40	7.7	0.62	12.45		14
BCca	35–45	10YR 8/1	Тонкозернистый песок	8.32	10.32	1.4	<0.010	1.08		–
Cca	45–...	10YR 7/3	Тонкозернистый песок	8.50	12.24	0.0	<0.010	0.91		–
Пятно без растительности (левая часть передней стенки разреза 6-ПУ)										
O	0–1	–	–	7.76	9.1	1.9	0.22	5.17	10.81	10
AH1	1–10	10YR 4/3	Супесчаный, бесструктурный	7.93	9.3	1.9	0.22	4.21	3.43	10

Таблица 2. Продолжение

Горизонт	Глубина, см	Цвет по шкале Манселла	Гранулометрический состав (полевое определение), структура (размер структурных отдельностей)	pH_{H_2O}	$C_{неорг}$	$C_{орг}$	$N_{общ}$	$N\text{-}NH_4^+$	$N\text{-}NO_3^-$	C/N
					%			мг/кг		
AH2	10–25	10YR 3/3	Супесчаный, бесструктурный	7.89	7.7	3.8	0.44	14.75	0.00	10
AH3	25–35	10YR 2/1	Легкий суглинок, бесструктурный	8.00	6.7	5.9	0.47	13.60		15
Разрез 7-ПУ. Перегнойно-криометаморфическая глееватая остаточно-карбонатная почва (Calcaric Stagnosol (Humic, Skeletic))										
Фитомасса		–	–	–	<0.06	40.5	2.33	0.00	0.00	20
O	0–2	–	–	5.58		33.1	2.54	122.88	9.68	15
H1	2–10	10YR 3/1	Легкий суглинок, бесструктурный	6.30		24.3	1.71	36.93	0.00	17
H2	10–20	10YR 3/2*; 2/1	Легкий суглинок, бесструктурный	6.49		16.7	1.20	21.58		16
G	20–27	10YR 4/2	Легкий суглинок, тонкоплитчатый (2–3 мм) мелкокомковатые с.о.	6.61		2.1	0.16	3.98		15
CRM1	27–50	10YR 5/6		7.61	0.70	0.9	0.05	3.13		19
CRM2ca	50–65	10YR 5/4	Средний суглинок, угловато-крупитчатые с.о.	7.97	2.46	0.0	0.04	3.69		–
BCca	65–80	10YR 5/4	Тяжелый суглинок, опесчанен, бесструктурный	8.04	2.44	0.0	0.04	2.90		–
Разрез 8-ПУ. Перегнойно-темногумусовая квазиглеевая криометаморфическая остаточно-карбонатная (Calcaric Folic Gleysol (Skeletic))										
Фитомасса		–	–	–	<0.06	41.0	0.85	93.28	–	56
Очес	0–5	–	–	6.41		40.2	0.79	101.83	0.00	50.9
O	5–10	–	–	6.77		34.5	1.60	108.65		25
AH1	10–12	10YR 2/1	–	6.91		19.8	1.29	42.63		18
AH2	12–20	10YR 2/2	–	6.95		15.6	1.03	27.25		18
Qg, ca	20–35	2.5Y 4/2	Средний суглинок, бесструктурный	7.72	0.55	2.1	0.16	3.87		16
Q/CRMca	35–55	10YR 5/4	Средний суглинок, тонкоплитчатый (3–4 мм)	7.99	0.76	0.8	0.08	4.04		11

Примечание: “–” – не определено; * – основной фон; с.о. – структурные отдельности ** – предел обнаружения прибора.

Таблица 3. Содержание кислоторастворимых форм элементов в горизонтах BCca и Cca перегнойно-темногумусовой почвы (6-ПУ)

Горизонт, глубина, см	Содержание, %						Отношение масс, CaO/CO_2*
	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	
BCca, 35–45	63.00	0.32	0.03	0.02	0.01	0.00	1.7
Cca, 45–...	63.00	0.60	0.16	0.09	0.03	0.00	1.4

Примечание. * Масса CO_2 в образцах почв рассчитана по содержанию $CaCO_3$.

ненная форма взрослой особи *Dryas octopetala* позволяет этим вечнозеленым кустарничкам в течение нескольких десятков лет занимать значительные по площади участки (до 100 см в поперечнике), накапливая гумус и на поверхности, и в толще субстрата. Часто это растение является пионерным при зарастании щебнистых грунтов за счет глубокого проникновения в почву корней [5, 25, 49, 68]. Исследованиями В.М. Швецовой [46] установлена высокая устойчивость фотосинтеза дриад к низким температурам и незначительной освещенности. Согласно многочисленным литературным данным *D. octopetala* – растение, образующее эктомикоризу с несколькими десятками грибов-симбионтов, приспособленных к обитанию в экстремальных условиях Арктики [25, 50, 57]. Для эктомикориз дриады характерно высокое разнообразие и встречаемость темноокрашенных микобионтов [51, 60–63]. В гифах клеточных стенок этих грибов присутствует пигмент меланин [54, 63–66], который защищает гифы от экстремальных температур, электромагнитной радиации, какие имеют место в высокогорных почвах. Таким образом, *D. octopetala* способна создавать особую микросреду. Благодаря, в том числе темной окраске субстрата, температура в толще под растением может достигать +50°C [46], а наличие корневых клубеньков питает не только растение, но и почву под ним азотом [37, 52, 53].

Участок 6-ПУ имеет криогенно-пятнистый характер микрорельефа и, вероятно, в зимний период может оказываться оголенным с минимальной мощностью снежного покрова. Это приводит к формированию зон, не покрытых растительностью. Пятна-медальоны без растительного покрова имеют характерную 4-5-6-угольную геометрическую форму и составляют 65–70% от общей поверхности. Это обусловливает высокий расход влаги из почвы на транспирацию летом и преобладание здесь наиболее толератнтных (выдерживающих суровые экологические условия) растений. В целом полученные результаты соответствуют данным по изучению продуктивности растительных сообществ тундровых ландшафтов Кольского полуострова [28].

Растительность является важнейшим источником углерода и азота в почвах. Содержание $C_{орг}$ в наземной части фитомассы исследуемых участков колеблется в диапазоне 40–49%. При концентрации $N_{орг}$ около 1% (фитомасса участков 1-ПУ, 6-ПУ и 8-ПУ) отношение C/N составляет 44–56. При двукратном повышении содержания азота в фитомассе участков 2-ПУ, 3-ПУ, 5-ПУ, 7-ПУ, C/N снижается до 20–29 (табл. 2). Близкие результаты получены ранеее при изучении состава наземной биомассы растений сообществ Большеземельской тундры [15, 17]. Химический состав подземной части биомассы остался за рамками данного исследования, хотя авторы отдают себе отчет о существенном влиянии на почвенные свойства и подземных органов многолетних растений тундры. На сосредоточение существенных запасов биомассы в составе подземных органов в связи с развитой системой подземных побегов указывалось ранее [29, 67].

Классификационно-номенклатурное разнообразие почв. В пределах исследуемого склона северовосточной экспозиции коренные карбонатные породы (мраморизованные известняки) образуют маломощный чехол различных по гранулометрическому составу отложений элювиально-делювиального генезиса (1-ПУ, 2-ПУ, 6-ПУ, 7-ПУ, 8-ПУ). Разрезы 3-ПУ и 5-ПУ сформированы на вогнутом (U-образной формы ложбина) участке склона на переотложенных рыхлых отложениях, резко подстилаемых массивными плитами. Во всех исследуемых почвенных разрезах присутствие других пород (кроме известняков) не обнаружено. В результате высокой щебнистости, наличия карбонатных пород по всему профилю (часто с поверхности) и провальной фильтрационной способности почв мерзлота отсутствует. Максимальное содержание известняков характерно для разрезов 6-ПУ, 8-ПУ (70–80% от объема горизонта), в остальных разрезах они преобладают только с глубины 35–40 см. Специфика факторов и условий почвообразования (мозаичность растительного покрова, гидротермический режим, различная мощность мелкоземисто-щебнистой толщи и др.) в пределах всей катены обуславливают разное проявление и сочетание элементарных почвообразовательных процессов, которые приводят к формированию системы генетических горизонтов и образованию определенного почвенного профиля (рис. 2).

В ходе морфологических описаний почвенных разрезов (и серии прикопок) выявлена сложная

система горизонтов и подгоризонтов, что в значительной мере определяет разнообразие типов и подтипов почв (даже на незначительном расстоянии) и пространственную вариабельность верхних и срединных горизонтов. Исследуемые почвы характеризуются отчетливой дифференциацией на генетические горизонты, которые бурно вскипают от воздействия 10%-ной HCl по всему профилю. Краткая характеристика морфологического строения почвенных профилей (горизонтов) приведена в табл. 2 и на рис. 2. В исследуемых разрезах верхние (поверхностные) горизонты представлены подстилочно-торфянистыми (в том числе с признаками грубогумусированного материала Oao), состоящей из механической смеси различных по степени разложения органических остатков с минеральными компонентами (2-ПУ; 3-ПУ; 8-ПУ). Залегающие ниже гумусовые горизонты представлены широким набором: серогумусовые (AY или AYao); перегнойно-темногумусовые (AH); перегнойные (H). Наличие большого спектра отчетливо диагностируемых гумусово-аккумулятивных горизонтов (в условиях однотипного климата и отметок в рельефе) “контролируется” взаимным сочетанием литологического (характер увлажнения и мощность субстрата) и бигеоценотического (фитоценотического) факторов. Среди сопряженных генетических горизонтов почвенных профилей именно верхние горизонты наиболее адекватно отражают основные различия, вызванные современной экологической обстановкой, что отмечают многие исследователи для почв холодных гумидных областей [10, 12, 26, 39]. Для срединных горизонтов почв (CRM), сформированных в аккумулятивных (1-ПУ) и транзитно-аккумулятивных условиях (2-ПУ, 5-ПУ, 7-ПУ, 8-ПУ) на переотложенных элювиально-делювиальных отложениях, характерно наличие ярко выраженной по морфологии специфической структурной организации. Криометаморфические горизонты CRM (CRMca) имеют желтовато-бурую окраску (10YR 5/4; 10YR 4/3); наблюдается горизонтальная делимость почвенной массы: непрочные линзовидные агрегаты толщиной 5-8 мм рассыпаются на мелкокомковатые (местами угловато-крупитчатые) отдельности с размерами 4–7 мм по горизонтали и 3–4 мм по вертикали. Мелкозем горизонта CRM активно вскипает от воздействия 10%-ной HCl. В нижних горизонтах происходит постепенное увеличение доли мелкой дресвы и щебня, что препятствует формированию морфологической выраженности структуры (гор. BCca). Формирование подобной структуры происходит под воздействием многократных циклов промерзания-оттаивания в определенных диапазонах влажности и температуры, что выявлено для многих типов почв как в равнинных [6, 11, 20, 39], так и в горных ландшафтах [3, 19]. Для исследуемого региона Полярного Урала разнообразие типов почв с криогенноструктуренным горизонтом на карбонатных породах описано нами впервые.

Углерод и азот в почвах. *Неорганические формы элементов.* Содержание углерода неорганических соединений по почвам и горизонтам существенно изменяется и достигает 12.2% (табл. 2). Во всех почвенных профилях масса $C_{неорг}$ возрастает с глубиной, единственным его источником является карбонат-содержащая почвообразующая порода.

Для характеристики ее химического состава выбраны горизонты BCca (35–45 см) и Cca (45–... см) перегнойно-темногумусовой почвы (6-ПУ, табл. 3), сформированной на вершине увала на элювии мраморизированных известняков (рис. 2). Среди основных типоморфных элементов доминирует кальций – массовая доля оксида кальция составляет 63%, сумма долей иных металлов и неметаллов (за исключением Si) не превышает 5%. Очевидно, что вторым по значимости элементов в составе почвообразующей породы, является кремний. В горизонте Cca (45–... см) отношение масс оксидов CaO/CO_2 (масса CO_2 рассчитана по содержанию карбонатов) составляет 1.4. Для чистого карбоната кальция данное соотношение равно 1.3, гидрокарбоната – 0.64. Это свидетельствует о том, что кальций входит в состав карбоната. В вышележащем горизонте BCca (35–45 см) отмечено более высокое значение отношения CaO/CO_2, что указывает на течение процессов физического (дезинтеграции) и химического выветривания (растворения карбоната) в связи с миграцией вглубь профиля органических и органо-минеральных соединений. Названные процессы являются причиной накопления органического углерода до 1.4% в горизонте BCca против 0% в почвообразующей породе.

Азот неорганических соединения (сумма $N\text{-}NO_3^-$ и $N\text{-}NH_4^+$) почв составляет менее 1% от общего его содержания. Ранее уже было показано, что в тундровых экосистемах азот неорганических соединений представляет собой второстепенную форму общего почвенного азота [8, 30, 32, 42, 43, 59].

Содержание аммонийного азота почв колеблется от единиц до полутора сотен мг/кг. Максимальные значения свойственны органогенным горизонтам, с глубиной отмечено закономерное его снижение. Нитратный азот обнаружен только в поверхностных и подповерхностных горизонтах почв, где его концентрация может достигать 30 мг/кг. В этих объектах содержание $N\text{-}NO_3^-$ в 5–20 раз меньше по сравнению с $N\text{-}NH_4^+$, что также согласуется с данными указанных выше исследователей экосистем высоких широт о преобладании процессов аммонификации в цикле биологического круговорота азота. Медленные темпы минерализации органических остатков определяются низкой среднегодовой температу-

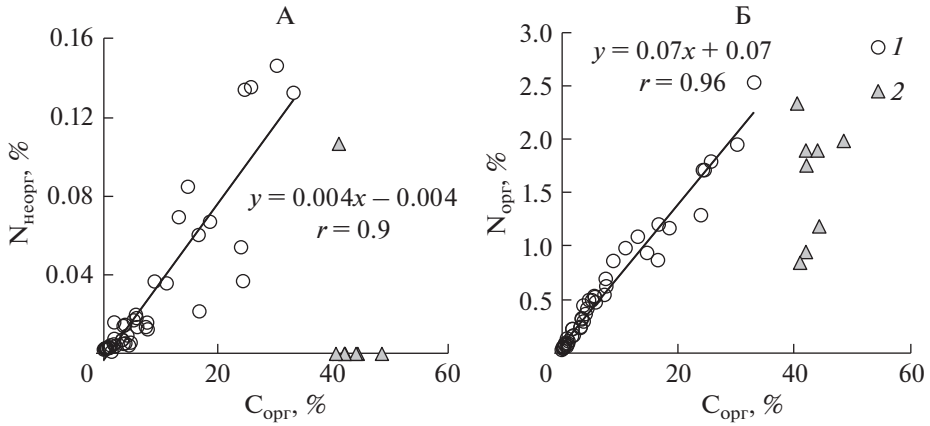

Рис. 3. Взаимосвязь содержания органического углерода $C_{орг}$ с неорганическим $N_{неорг}$ (А), и органическим $N_{орг}$ (Б) азотом в почвах (*1*) и наземной фиомассе растений (*2*).

рой, краткостью вегетационного периода, бедностью бактериальной флоры, анаэробными условиями [8, 47, 56]. На биогенное происхождение неорганического азота почв косвенно указывает тесная связь с содержанием органического углерода (рис. 3).

Органические формы элементов. В каждом профиле поверхностные горизонты имеют максимальное содержание органического углерода и азота. Большими их концентрациями (30–38 и 1.7–2.5% соответственно) характеризуются почвы участков 5-ПУ, 7-ПУ и 8-ПУ. Аккумуляции органического углерода способствуют количество и характер поступающего опада, а также условия его разложения. Растительные сообщества названных участков, особенно последние два, характеризуются максимальной биологической продуктивностью (табл. 1). На участке 5-ПУ преобладают богатые лигнином трудноразлагаемые остатки кустарничков. Опад участка 8-ПУ в основном представлен очесом сфагнового мха, разложению которого препятствуют повышенная влажность, связанный с ней недостаток кислорода. Подобные условия способствуют консервации растительных остатков и накоплению в почве значительного количества органического вещества. Здесь же отмечена и бóльшая мощность подстилочно-торфянистого горизонта (до 10 см). Близость содержания $C_{орг}$ в поверхностных горизонтах этих почв и в фитомассе соответствующих участков также свидетельствуют о медленных процессах разложения органического материала, поступающего на поверхность.

Почвы участков 5-ПУ и 7-ПУ, формирующиеся под травяно-ивковым сообществом и высокотравным лугом, характеризуются и максимальным содержанием органического азота (2–2.5%). Специфичность состава и условий разложения опада участка 8-ПУ способствует обогащению слаборазложившихся растительных остатков азотом. Здесь отмечено двукратное превышение содержания N в подповерхностном горизонте по сравнению с фитомассой. Темпы его потери ниже, чем органического углерода, что связано с более существенной убылью C по сравнению с N из-за неэквивалентного выделения углерод- и азотсодержащих газов, в меньшей степени это может быть вызвано вымыванием растворимых безазотистых органических соединений. Подобные явления были уже ранее отмечены при исследовании торфяных почв [36, 43]. В всех трех случаях содержание $N_{орг}$ в поверхностных горизонтах практически эквивалентно его концентрации в соответствующей участку фитомассе.

Более низкие значения $C_{орг}$ и $N_{орг}$ (15–25 и 0.9–1.3% соответственно) в поверхностных горизонтах почв участков 1–3ПУ, 6-ПУ связаны как с низкой продуктивностью растительных сообществ, так и составом опада. На этих участках, особенно 1-ПУ, 3-ПУ, 6-ПУ отмечено меньшее содержание органических форм углерода (в 2–3 раза) и азота (до 1.5 раз) в поверхностных горизонтах почв по сравнению с биомассой соответствующих участков. Это указывает на более интенсивную минерализацию и гумификацию поступающего растительного опада в почвах, формирующихся под дриадовыми сообществами (пятнистая дриадово-моховая, дриадово-травяная и полигональная дриадовая). В нижних горизонтах этих почв содержание органических форм углерода и азота резко убывает, хотя в отдельных минеральных горизонтах остается существенным – до 8 и 0.6% соответственно (3-ПУ, 6-ПУ).

Накопление элементов в минеральной части профилей может быть связано с большим содержанием корней и, следовательно, поступлением $C_{орг}$ вместе с опадом подземных органов растений, а также за счет гумусово-иллювиального процесса [28, 29]. Для понимания соотносительности вклада этих двух факторов необходимы до-

полнительные исследования. Концентрации органических форм углерода и азота почв тесно взаимосвязано ($r = 0.96$, $P = 0.95$), для наземной фитомассы эта связь отсутствует (рис. 3).

Следует обратить внимание на тот факт, что органические соединения количественно перераспределяются и закрепляются в пределах поверхностных горизонтов почвенных профилей. Вместе с тем не следует полностью исключать механический перенос органического вещества с поверхности плато в геохимически сопряженные элементы ландшафта за счет эоловых процессов; движения со склона снежных масс, способных увлечь за собой органические остатки, а также за счет смыва верхних слоев почвы в период активного снеготаяния и выпадения большого количества осадков, на что указывают русла ручейков, идущие от вершины хребта к его подножью. Наличие процессов переотложения наблюдается в разрезе 3-ПУ на склоне с крутизной 6°–8°, где под слаборазложившимся слоем опада листьев дриады (*Dryas octopetala*) сформирован перегнойно-темногумусовый стратифицированный горизонт (АНг), резко подстилаемый массивной плитой известняков (рис. 2).

В большинстве случаев значения C/N поверхностных горизонтов почв не превышает 25 и близко к этому показателю для фитомассы соответствующих участков. Аналогичные выводы были ранее сделаны при изучении циклов углерода и азота почв побережья Баренцева моря [43]. При этом даже под луговой растительностью в транзитно-аккумулятивной части катены, отношение C/N в профиле не опускается ниже 15. Основным фактором, ограничивающим процессы гумификации, является низкая среднегодовая температура. Наиболее обеднено азотом органическое вещество почвы 8-ПУ (табл. 2), что свидетельствует об увеличении вклада негумифицированного материала в состав органического вещества. В почвенных профилях с глубиной значения C/N, как правило, постепенно уменьшаются, что указывает на большую степень гумификации органического вещества. Исключение составляет перегнойно-криометаморфическая почва (7-ПУ), где C/N в профиле практически не меняется. В минеральных горизонтах, как и в органогенных, также наблюдается тенденция повышения обогащенности органического вещества азотом при движении от элювиальных к аккумулятивным позициям.

В свете названных общих закономерностей рассмотрим особенности распределения разных форм углерода в отдельных профилях. Собственно на известняке, где содержание $C_{неорг}$ составляет 12.2%, формируется перегнойно-темногумусовая почва (6-ПУ). Профиль полностью имеет щелочную реакцию pH_{H_2O} 7.6–8.5. Интересным оказывается факт, что в минеральной части профиля на глубине 1–45 см распределение органического и неорганического углерода симметричны с осью C ~ 6% (рис. 4), сумма обеих форм по всей толще профиля остается практически неизменной $C_{неорг} + C_{орг} = (11.8–12.2)\%$. Феномен симметричного распределения органических и неорганических форм углерода относительно такой оси, а также постоянство суммы обеих форм углерода выражен и в профиле под растительным пятном (6-ПУ). Однако под пятном содержание неорганического углерода в поверхностном слое (0–1 см) в 1.4 раза больше, чем на глубине 25–35 см. Очевидно, что пласт в 35-см на 180° “перевернут” криотурбационными процессами. Следует отметить, что это единственный случай, где столь ярко выражены криотурбационные явления, вызванные максимальным промерзанием почв на вершине увала. Здесь же, как указано выше, четко выражен криогенно-пятнистый характер микрорельефа.

Верхняя толща этой почвы (горизонты АН 1-35 см) отличается темной (от темно-коричневой вплоть до черной) окраской (10YR 3/3 – 3/1; 10YR 2/1) с отчетливым (резким) переходом по цвету в нижележащие горизонты BC-C (10YR 8/1; 10YR 7/3). По всему профилю характерно бурное вскипание от HCl как мелкозема, так и щебня мраморизированных известняков (в том числе на поверхности криогенных “медальонов”). Наличие в почвенном профиле хорошо выветрелой мелкой дресвы и обломков пород (3–10 мм), которые легко разрушаются при надавливании пальцами, свидетельствует о процессах физической (физико-химической) дезинтеграции. В этой связи генезис перегнойно-темногумусового горизонта (АН) с мощностью до 34–35 см определяется спецификой условий почвообразования: высокой щебнистостью нижних горизонтов, супесчано-легкосуглинистым гранулометрическим составом верхней толщи, повышенным годовым количеством осадков (600–800 мм), промывным (провальным) типом водного режима, а также преобладанием в напочвенном покрове кальцефитной растительности в виде *Dryas octopetala*.

Таким образом, процессы гумификации протекают в условиях высокого содержания карбонатов, щелочной реакции среды за счет господства в почвенном растворе $Ca(HCO_3)_2$, миграции органических веществ вглубь профиля за счет промывного водного режима. Эти факторы наряду с доминированием кальцефитной растительности с учетом специфики пигментации, консервации, разложения и биологической активности микрофлоры приводят к темному окрашиванию верхней части почвенного профиля изучаемых почв. Феномен темного окрашивания профиля “подобно коричневому и черноземному почвообразованию” был ранее описан при исследовании

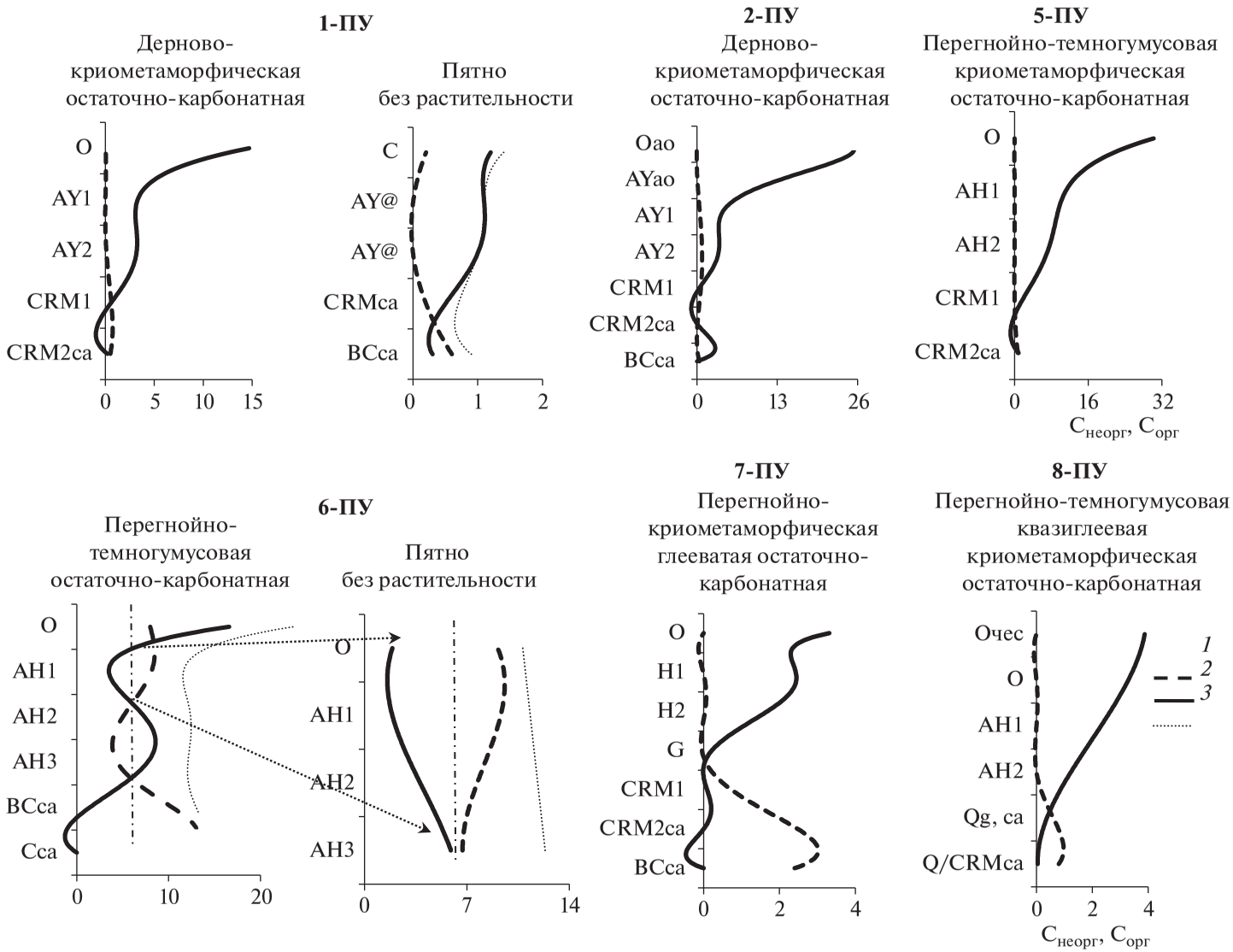

Рис. 4. Содержание углерода неорганических (*1*), органических (*2*) соединений почв и их суммы (*3*) (для 1–6-ПУ значения содержания органического углерода даны в %%, для 7-ПУ и 8-ПУ – в 0.1%).

горных карбонатных почв северо-западного Кавказа с фульватно-гуматным типом гумуса [21].

Руководствуясь целью вписать неисследованные ранее горные карбонатные почвы Полярного Урала в общую базу данных о фракционно-групповом составе гумуса главных типов почв России и зарубежных стран [34], авторами также был выполнен данный анализ (дискуссионный вопрос о природе гумусовых соединений – гетерополимеры или супрамолекулярные ансамбли – остается за пределами данной работы). Оказалось, что в почвах 7-ПУ и 8-ПУ до глубины 20 см, в поверхностных и подповерхностных горизонтах почв 2-ПУ и 3-ПУ, а также в горизонтах АН (10–35 см) разреза 6-ПУ гумус по Д.С. Орлову фульватно-гуматный ($C_{ГК}/C_{ФК}$ = 1.1–1.9). остальные слои характеризуются гуматно-фульватным типом [45]. Это свидетельствует о том, что темную окраску почвам помимо упомянутой выше прокраски меланином придают гуминовые кислоты. Оценить вклад каждого фактора на данном этапе не представляется возможным.

Есть основания согласиться с выводом [21] о том, что при всем широком разнообразии карбонатных почв, содержание углерода и характер его распределения имеет общие черты в различных регионах – и не только от тропического пояса до бореального [21], но и в Субарктическом секторе. Главное направление почвообразования – процессы выщелачивания и гумусонакопления.

В остальных разрезах содержание $C_{неорг}$ составляет 0.4–2.5% при существенном превышение органического углерода над неорганическим, что, прежде всего, связано с особенностями функционирования биоты. В разрезе 7-ПУ (табл. 2), поверхностный горизонт О (0–2 см) имеет слабокислую реакцию среды pH_{H_2O} 5.6, значения pH в почвенном профиле закономерно увеличиваются, достигая ниже отметки в 50 см значений pH около 8. Содержание неорганического углерода в профиле возрастает от 0 до 2.4%. Несколько менее существенные варианты преобразования породы наблюдаются в почвах 1-ПУ и 8-ПУ, где поверхностные горизонты характеризуются нейтральной и щелочной реакцией (pH_{H_2O} 6.4–6.7) горизонтов CRM (35–60 см). Рост неорганического углерода с глубиной составляет от 0 до 0.5–0.8%.

Руководствуясь целью вписать неисследованные ранее горные карбонатные почвы Полярного Урала в общую базу данных о фракционно-групповом составе гумуса главных типов почв России и зарубежных стран [34], авторами также был выполнен данный анализ (дискуссионный вопрос о природе гумусовых соединений – гетерополимеры или супрамолекулярные ансамбли – остается за пределами данной работы). Оказалось, что в почвах 7-ПУ и 8-ПУ до глубины 20 см, в поверхностных и подповерхностных горизонтах почв 2-ПУ и 3-ПУ, а также в горизонтах АН (10–35 см) разреза 6-ПУ гумус по Д.С. Орлову фульватно-гуматный ($C_{ГК}/C_{ФК}$ = 1.1–1.9), остальные слои характеризуются гуматно-фульватным типом [45].

Это свидетельствует о том, что темную окраску почвам помимо упомянутой выше прокраски меланином придают гуминовые кислоты. Оценить вклад каждого фактора на данном этапе не представляется возможным.

Есть основания согласиться с выводом [21] о том, что при всем широком разнообразии карбонатных почв, содержание углерода и характер его распределения имеет общие черты в различных регионах – и не только от тропического пояса до бореального [21], но и в Субарктическом секторе.

Главное направление почвообразования – процессы выщелачивания и гумусонакопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен новый фактический материал по генезису, классификации и особенностям пространственного распределения углерода и азота в почвах на элювиально-делювиальных отложениях карбонатных пород Полярного Урала. На примере полуторакилометровой катены показан широкий спектр почвенных типов (подтипов), резко различающихся по характеру органопрофиля и срединных диагностических горизонтов. Специфика факторов и условий почвообразования (мозаичность растительного покрова, гидротермический режим, различная мощность мелкоземисто-щебнистой толщи и др.) обуславливают в пределах катены разное проявление и сочетание элементарных почвообразовательных процессов: поверхностное накопление грубогумусовой подстилки; интенсивное гумусонакопление; потечность гумуса; оглеение; криогенный метаморфизм минеральной массы (криогенное оструктуривание); дезинтеграция щебня/дресвы до стадии мелкозема; выщелачивание известковой породы.

Во всех почвенных профилях масса неорганического углерода возрастает с глубиной, единственным его источником является карбонат-содержащая почвообразующая порода. Неорганический азот (сумма $N\text{-}NO_3^-$ и $N\text{-}NH_4^+$) составляет менее 1% от общего его содержания в почвах. Органические соединения количественно перераспределяются и закрепляются в пределах поверхностных горизонтов и имеют максимальное содержание органического углерода и азота (до 40 и до 2.5% соответственно). В нижележащих слоях значения этих показателей резко снижаются, хотя в отдельных минеральных горизонтах остается существенным (до 8 и 0.6%).

Полученные результаты расширяют представление о разнообразии, генетических особенно-

стях и географии почв на карбонатных породах Субарктических горных экосистем.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую благодарность Н.Б. Хитрову, С.В. Горячкину, Д.А. Каверину, Т.А. Сизоненко за ценные советы, критические замечания и консультации при подготовке рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках бюджетной темы НИР “Выявление общих закономерностей формирования и функционирования торфяных почв на территории Арктического и Субарктического секторов Европейского Северо-Востока России (номер госрегистрации: АААА-А17-117122290011-5)” и гранта РФФИ № 20-04-00445а “Факторы и механизмы стабилизации органического вещества в почвах экстремальных условий (на примере арктических экосистем)”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. 1. А – морфологическое строение профиля дерново-криометаморфической почвы (разрез 1-ПУ); Б – пятно без растительности (правая часть передней стенки разреза 1-ПУ).

Рис. 2. Морфологическое строение профиля карболитозема перегнойно-темногумусового (разрез 3-ПУ).

Рис. 3. Морфологическое строение профиля перегнойно-темногумусовой криометаморфической почвы (разрез 5-ПУ).

Рис. 4. Морфологическое строение профиля перегнойно-темногумусовой почвы (разрез 6-ПУ).

Рис. 5. Морфологическое строение профиля перегнойно-криометаморфической почвы (разрез 7-ПУ).

Рис. 6. Морфологическое строение профиля перегнойно-темногумусовой квазиглеевой криометаморфической почвы (разрез 8-ПУ).

Рис. 7. Макростроение горизонта Q/CRMca (разрез 8-ПУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев И.И., Абакумов Е.В., Томашунас В.М.* Катенарная дифференциация почв предгорий Полярного Урала на примере участка в районе р. Халяталбей (приток р. Щучья) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2015. Т. 24. № 4. С. 146–149.
2. *Алексеева-Попова Н.В.* Экология и биогеохимическая дифференциация видов / Проблемы экологии растительных сообществ, отв. ред. В.Т. Ярмишко. СПб.: ВВМ, 2005. С. 342–351.
3. *Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е.* Почвы горных территорий в классификации почв России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 122–146. https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146
4. Антропогенная динамика растительного покрова Арктики и Субарктики принципы и методы изучения // Тр. ботанического института им. В.Л. Комарова РАН. 1995. Вып. 15. 185 с.
5. Арктическая флора СССР. Вып. IX. Семейства Drosaceae – Leguminosae. Ч. 1. Семейства Drosaceae – Rosaceae / Сост. И.О. Бузунова, В.Н. Гладкова, Т.И. Заиконникова, В.В. Петровский, О.В. Ребристая, Н.Н. Тараскина, В.Н. Тихомиров, Б.А. Юрцев; под ред. Б.А. Юрцева. Л.: Наука, 1984. 334 с.
6. Атлас почв Республики Коми / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар, 2010. 356 с.
7. *Богатырев К.П., Ногина Н.А.* Почвы горного Урала // О почвах Урала, западной и центральной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 5–48.
8. *Бузин И.С., Макаров М.И., Малышева Т.И., Кадулин М.С., Королева Н.Е., Маслов М.Н.* Трансформация соединений азота в почвах горно-тундровых экосистем Хибин // Почвоведение. 2019. № 5. С. 570–577.
9. Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР Л.: Наука, 1989. 64 с.
10. *Герасимова М.И.* Классификация почв России: путь к следующей версии // Почвоведение. 2019. № 1. С. 32–42.
11. *Горячкин С.В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с.
12. *Горячкин С.В., Водяницкий Ю.Н., Конюшков Д.Е., Лесовая С.Н. и др.* Биоклиматогенные и геогенные проблемы географии почв Северной Евразии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2008. № 62. С. 48–68.
13. *Горячкин С.В., Макеев А.О.* Направления таежного почвообразования: спектр мезоморфных почв Европейского Севера // Почвообразование и выветривание в гумидных и семигумидных ландшафтах. М.: Ин-т географии РАН, 1991. С. 8–72.
14. *Государственная почвенная карта России*. Масштаб 1 : 1000000. Пояснительная записка к листу Q-41 (Воркута). Сыктывкар. 2011. 76 с.
15. *Грунина Л.К., Гецен М.В.* Биогенная аккумуляция азота растениями тундровой зоны. Серия препринтов “Научные доклады”. Коми филиал АН СССР. 1984. Вып. 97. 32 с.
16. *Дымов А.А., Жангуров Е.В.* Морфолого-генетические особенности почв кряжа Енганэпэ (Полярный Урал) // Почвоведение. 2011. № 5. С. 515–524.
17. *Елсаков В.В.* Аккумуляция азота и углерода надземной массой растений в сообществах Большеземельской тундры // Научные доклады: Коми научный центр УрО РАН. Сыктывкар, 2003. Вып. 461. 28 с.
18. *Жангуров Е.В., Дубровский Ю.А., Сандула А.Н.* Почвообразование на карбонатных породах и флористическое своеобразие водоохранных лесов среднего течения р. Илыч (Северный Урал) // Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых территорий Европейского севера и

Урала. Мат. Всерос. науч-практ. конф. Сыктывкар, 2011. С. 62–66.

19. *Жангуров Е.В., Старцев В.В., Дубровский Ю.А., Дегтева С.В., Дымов А.А.* Морфолого-генетические особенности почв горных лиственничных лесов и редколесий Приполярного Урала // Почвоведение. 2019. № 12. С. 1415–1429. https://doi.org/10.1134/S0032180X19120141
20. *Жангуров Е.В., Тонконогов В.Д., Забоева И.В.* Автоморфные почвы Среднего и Южного Тимана // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1413–1422.
21. *Казеев К.Ш., Кутровский М.А., Даденко Е.В., Везденеева Л.С., Колесников С.И., Вальков В.Ф.* Влияние карбонатности пород на биологические свойства горных почв Северо-западного Кавказа // Почвоведение. 2012. № 3. С. 327–335.
22. *Катаева М.Н.* Доступность растениям химических элементов в почвах горной тундры на породах различного состава (Полярный Урал) // Почвоведение. 2013. № 2. С. 177–186.
23. *Катаева М.Н., Холод С.С.* Дифференциация растительности и почв Полярного Урала в контрастных геохимических условиях // Проблемы экологии растительных сообществ. СПб., 2005. С. 352–391.
24. *Конюшков Д.Е., Герасимова М.И., Ананко Т.В.* Корреляция дерново-карбонатных почв на почвенной карте РСФСР масштаба 1 : 2.5 млн и в системе классификации почв России // Почвоведение. 2019. № 3. С. 276–289. https://doi.org/10.1134/S0032180X19030079
25. *Костяев В.Я.* Фиксация молекулярного азота в арктической тундре. Ярославль: Филигрань, 2016. 106 с.
26. *Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Диагностические горизонты в классификации почв России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 923–934.
27. *Лесовая С.Н., Горячкин С.В., Полеховский Ю.С.* Почвообразование и выветривание на ультраосновных породах горных тундр массива Рай-Из (Полярный Урал) // Почвоведение. 2012. № 1. С. 44–56.
28. *Маслов М.Н.* Углерод, азот и фосфор в тундровых экосистемах северной Фенноскандии // Дис. ... канд. биол. н. М., 2015. 234 с.
29. *Маслов М.Н., Копеина Е.И., Зудкин А.Г., Королева Н.Е., Шулаков А.А., Онипченко В.Г., Макаров М.И.* Запасы фитомассы и органического углерода в тундровых экосистемах Северной Фенноскандии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 3. С. 30–36.
30. *Маслов М.Н., Макаров М.И.* Трансформация соединений азота в тундровых почвах Северной Фенноскандии // Почвоведение. 2016. № 7. С. 813–821.
31. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 / Научные редакторы перевода: М.И. Герасимова, П.В. Красильников. ФАО и Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2017.
32. *Мошкина Е.В.* Азотные соединения в почвах Северо-Запада России и динамика их под влиянием антропогенного воздействия (на примере Карелии). Автореф. ... канд. с.-х. н. Санкт-Петербург. 2009. 19 с.
33. Национальный Атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель. 2011. 632 с.
34. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 333 с.
35. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2008. 182 с.
36. *Родин Л.Е., Базилевич Н.И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности Земного шара. М.: Наука, 1965. 264 с.
37. *Романов Г.Г., Овсова Т.А., Грунина Л.К.* Азотфиксация и накопление азота Dryas octopetala (Rosaceae) в субарктике // Ботанический журн. 1991. Т. 76. № 11. С. 1578–1681.
38. *Таргульян В.О.* Почвообразование и выветривание в холодных гумидных областях. М.: Наука, 1971. 268 с.
39. *Тонконогов В.Д.* Пространственно-генетические ряды горизонтов и профилей почв Русской и Западно-Сибирской равнин // Почвоведение. 2008. № 6. С. 645–654.
40. *Фирсова В.П., Дедков В.С.* Почвы высоких широт горного Урала. Свердловск, 1983. 95 с.
41. *Шадрин Л.Ф., Островский Л.Я.* О картировании ордовикских толщ на Полярном Урале. Геология и металлогения ордовикских толщ осевой зоны севера Полярного Урала. 1978. 148 с.
42. *Шамрикова Е.В., Денева С.В., Кубик О.С.* Распределение углерода и азота в почвенном покрове прибрежной территории Баренцева моря (Хайпудырская губа) // Почвоведение. 2019. № 5. С. 558–569.
43. *Шамрикова Е.В., Денева С.В., Кубик О.С., Панюков А.Н.* Соединения азота в почвах континентальных окраин Европейского сектора Российской Арктики // Почвоведение. 2020.
44. *Шамрикова Е.В., Жангуров Е.С., Кубик О.С., Королев М.А.* Специфика состава и свойств органического вещества почв Полярного Урала // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2020.
45. *Шварева Ю.О.* Климат Приполярного и Полярного Урала // Исследование ледников и ледниковых районов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 2. С. 176–199.
46. *Швецова В.М.* Зависимость фотосинтеза некоторых растений Арктики от температуры // Ботанический журн. 1970. Т. 55. № 11. С. 1683–1688.
47. *Федорец Н.Г., Бахмет О.Н.* Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2003. 240 с.
48. *Юрцев Б.А., Алексеева-Попова Н.В., Дроздова И.В., Катаева М.Н.* Характеристика растительности и почв Полярного Урала в контрастных геохимических условиях. Кальцефитные и ацидофитные сообщества // Ботанический журн. 2004. Т. 89. № 1. С. 27–41.
49. *Bjorbækmo M.F.M., Carlsen T., Brysting A. et al.* High diversity of root associated fungi in both alpine and arctic Dryas octopetala // BMC Plant Biol. 2010. V. 10. P. 1–12. https://doi.org/10.1186/1471-2229-10-244
50. *Carlsen T.A.* Molecular diversity of root endophytes in an alpine Bistorta vivipara-Kobresia myosuroides plant community. Cand scient thesis Department of Biology. University of Oslo. 2002. 53 p.

51. *Clemmensen K.E., Michelsen A.* Integrated long-term responses of an arctic-alpine willow and associated ectomycorrhizal fungi to an altered environment // Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique. 2006. V. 84. № 5. P. 831–843.
52. *Gardes M., Dahlberg A.* Mycorrhizal diversity in arctic and alpine tundra: An open question // New Phytologist. 1996. V. 133. № 1. P. 147–157.
53. *Hobbie J.E., Hobbie E.A.* N-15 in symbiotic fungi and plants estimates nitrogen and carbon flux rates in Arctic tundra // Ecology. 2006. V. 87. № 4. P. 816–822.
54. *Kõljalg U., Dahlberg A., Taylor A.F.S., Larsson E., Hallenberg N., Stenlid J., Larsson K.H., Fransson P.M., Karen O., Jonsson L.* Diversity and abundance of resupinate thelephoroid fungi as ectomycorrhizal symbionts in Swedish boreal forests // Molecular Ecology. 2000. V. 9. № 12. P. 1985–1996.
55. *Lessovaia S.N., Polekhovsky Y., Dultz S., Plötze M., Andreeva N., Filimonov A., Momotova O.* Soil development on basic and ultrabasic rocks in cold environments of russia traced by mineralogical composition and pore space characteristics // Catena. 2016. V. 137. P. 596–604.
56. *Moon J., Ma Li, Xia K., Plant W.M.A.* Microbial and mineral contributions to amino acid and protein organic matter accumulation during 4000 years of pedogenesis // Soil Biology and Biochemistry. 2016. V. 100. P. 42–50. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.05.011
57. *Muhlmann O., Bacher M., Peintner U.* Polygonum viviparum mycobionts on an alpine primary successional glacier forefront // Mycorrhiza. 2008. V. 18. № 2. P. 87–95.
58. *Munsell A.* Munsell Soil Color Chart. Colmorgan Instruments. 1988. Baltimor. MD.
59. *Nannipieri P., Eldor P.* The chemical and functional characterization of soil N and its biotic components // Soil Biol. Biochem. 2009. V. 41. P. 2357–2369.
60. *Newsham K.K., Upson R., Read D.J.* Mycorrhiza and dark septate root endophytes in polar regions // Fungal Ecology. 2009. V. 2. P. 10–20.
61. *Robinson C.H.* Cold adaptation in Arctic and Antarctic fungi // New Phytologist. 2001. V. 151. № 2. P. 341–353.
62. *Ruotsalainen A.L., Tuomi J., Vare H.* A model for optimal mycorrhizal colonization along altitudinal gradients // Silva Fennica. 2002. V. 36. № 3. P. 681–694.
63. *Ryberg M., Larsson E., Molau U.* Ectomycorrhizal Diversity on Dryas octopetala and Salix reticulata in an Alpine Cliff Ecosystem // Arctic Antarctic and Alpine Research. 2009. V. 41. № 4. P. 506–514.
64. *Smith S.E., Read D.J.* Mycorrhizal symbiosis. Academic Press, New York, 2008.
65. *Tedersoo L., Nara K.* General latitudinal gradient of biodiversity is reversed in ectomycorrhizal fungi // New Phytologist. 2010. V. 185. № 2. P. 351–354.
66. *Wang P., Ruijven J., Heijmans M. M.P.D., Berendse F., Maksimov Ayal, Maximov T., Mommer L.* Short-term root and leaf decomposition of two dominant plant species in a Siberian tundra // Pedobiologia – J. Soil Ecology. 2017. V. 65. P. 68–76. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2017.08.002
67. *Väre H., Vestberg M., Eurola S.* Mycorrhiza and root-associated fungi in Spitsbergen // Mycorrhiza. 1992. V. 1. № 3. P. 93–104.
68. *Zibzeev E.G., Sambyla Ch.N.* Phytomass Structure of Plant Communities of Humid High-Altitude Habitats of the Eastern Sayan Ranges: A Case Study of the Kryzhin Range // Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal. 2011. V. 18. № 3. P. 395–403.

Soils and Soil Cover of Mountainous Tundra Landscapes of the Polar Urals on Calcareous Rocks: Diversity, Taxonomy, Nitrogen and Carbon Patterns

E. V. Shamrikova[1, *], E. V. Zhangurov[1], E. E. Kulyugina[1], M. A. Korolev[1], O. S. Kubik[1], and E. A. Tumanova[1]

[1]*Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya ul., 28, Syktyvkar, 167982 Russia*

**e-mail: shamrik@ib.komisc.ru*

Investigations of the landscapes of the Bolshoy Paipudynsky ridge (the Polar Urals) served as a key site to reveal the taxonomic diversity of soils on calcareous rocks, which results of both bioclimatic and geogenic factors (relief, thickness of eluvial and colluvial derivates of calcareous rocks). It is shown that under various types of plant communities, soils of the post-lithogenic trunk in the Russian soil classification system are formed. They refer to several orders: cryometamorphic (Mollic Calcaric Stagnosols), lithozems (Folic Mollic Calcaric Leptosols), organo-accumulative (Molic Leptic Calcaric Stagnosols), and gley soils (Folic Calcaric Gleysol). These soils occur either as small individual mapping units, or as ingredients of small soil associations. The mass of carbon and nitrogen organic forms in the ground phytomass (GP) ranges within 40–49 and 0.9–2.3%, respectively. The pool of above-ground phytomass ranges from 20 to 1600 g/m^2. In each profile, the surface horizons have a maximum content of organic carbon and nitrogen (up to 40 and 2.5%, respectively). The C_{org} and N_{org} patterns in soils depend on the plant community production, the composition of litter and conditions for falloff decomposition. In all soil profiles, the C_{inorg} content increases with the depth, reaching 12%. The mineral nitrogen content does not exceed 1%. The content of N-NH_4^+ and N-NO_3^- displays maximums in the surface horizons, where it reaches 140 and 30 mg/kg, respectively.

Keywords: carbonates, Urals, soil classification, diagnostic horizons, above-ground phytomass, organic carbon, nitrogen, inorganic carbon, N-NH_4^+, N-NO_3^-

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1071–1084

ХИМИЯ ПОЧВ

УДК 631.15

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ХВОЙНОЙ ПОДСТИЛКИ С МИНЕРАЛАМИ И ГОРИЗОНТАМИ ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ И ПОДЗОЛОВ

© 2020 г. Е. И. Караванова[a], *, Д. Ф. Золовкина[a], **, А. А. Степанов[a]

[a]МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

**e-mail: karavanovaei@mail.ru*

***e-mail: dasha_zolovkina@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.
После доработки 20.02.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

Под воздействием водорастворимых компонентов хвойной подстилки из твердой фазы элювиальных горизонтов подзолов и подзолистой почвы в раствор десорбируются нативные органические вещества. В подзолах водорастворимые органические вещества (**ВОВ**), экстрагированные из подстилки водой и затем прошедшие через горизонты E, сорбируются горизонтами BF, если их концентрация в растворе превышает 35 мг C/л. Поглощение может составлять от десятков до сотен миллиграммов углерода на килограмм массы горизонта BF. В подзолистой почве сорбция ВОВ горизонтами BT возможна при большей по сравнению с подзолами концентрации органических веществ в жидкой фазе. Модельные эксперименты с минералами показали, что каолинит и иллит взаимодействуют с растворимыми веществами из подстилок, избирательно извлекая из них более гидрофильные, менее ароматические компоненты с относительно низкими молекулярными массами. Гетит взаимодействует с ВОВ, поглощая, напротив, преимущественно гидрофобные компоненты, вещества фенольной природы, компоненты, обогащенные углеродом ароматических структур, вещества с молекулярными массами менее 7 кДа. После сорбционного взаимодействия с минералами изменяются спектральные характеристики ВОВ: уменьшается или исчезает флуоресценция, обусловленная присутствием гумусовых веществ с наиболее длинной цепью сопряжения, но возникают новые флуорофоры, включающие фрагменты фенольных и/или протеиновых структур. Присутствие каолинита и иллита в элювиальных горизонтах почв и взаимодействие с ними ВОВ, может быть одной из причин трансформации их качественного состава и приобретения свойств, максимально благоприятных для поглощения на гидроксидах железа в нижних горизонтах.

Ключевые слова: гидрофильные и гидрофобные соединения, сорбция, органо-минеральные взаимодействия, гетит, каолинит, иллит

DOI: 10.31857/S0032180X20090075

ВВЕДЕНИЕ

Исследования роли почв в глобальном цикле углерода остаются актуальными на протяжении многих лет. Это обусловлено как возможным вкладом минерализации органического вещества почв в атмосферную эмиссию углекислого газа, так и обратной стороной процесса, а именно, уменьшением запасов гумуса и потерей почвенного плодородия. Почвы могут играть роль как аккумулятора углерода, так и источника его поступления в гидро- и атмосферу, причем баланс между этими двумя функциями зависит от климатических условий, свойств почв (гранулометрический состав, pH и пр.), характера землепользования и других факторов. Сохранение органического углерода в минеральных горизонтах является для лесных почв умеренного климата одним из путей решения проблемы стабилизации почвенного гумуса.

Современные концептуальные модели [17] предлагают несколько путей формирования в почвах биохимически устойчивых органических соединений, более или менее специфических для разных типов почв и горизонтов (глубин). Они рассматривают формирование органо-минеральных соединений (**ОМС**) за счет сорбционных реакций как один из основных механизмов стабилизации растворимых органических веществ в глубоких слоях почв. В почвах с низкими значениями pH основными минералами, которые играют роль сорбента, являются аморфные гидроксиды железа, в нейтральных условиях – каолинит. При увеличении отрицательного заряда поверхности твердых фаз сорбция на них одноименно заряженных раство-

Таблица 1. Некоторые свойства изученных почв

Почва, разрез	Горизонт	$C_{орг}$, %	pH		Fe_{ox}	Fe_d
			водный	солевой	мг/100 г	
Подзол, 7	E	0.53	5.01	3.72	Следы	10
	BF	0.29	5.20	4.21	220	292
Дерново-подзол, 3	E	0.42	4.98	3.80	12	87
	BF	0.16	5.20	4.26	57	359
Подзолистая, 9	EL	0.68	5.12	3.87	20	62
	BT	0.23	5.61	4.17	151	234

ренных органических веществ может происходить через катионные мостики. Сорбция, наряду с окклюзией органических веществ внутрь почвенных агрегатов и гидрофобизацией их поверхностей, способствует формированию фракции устойчивого органического вещества со средним временем жизни более ста лет. Исследование запасов углерода в подзолах и камбисолях (типичных лесных почвах Европы, севера Баварии (названия почв и горизонтов даны в авторской [12] редакции)), показало, что главными его резервуарами являются минеральные горизонты [12]. При общих запасах 90–160 Мг С/га, вклад подстилочных горизонтов составляет лишь 36–15%, а основная часть углерода аккумулирована в горизонтах Bs и Bt(w). Доля углерода тяжелой денситометрической фракции (плотность >1.6 г/см^3) в верхних горизонтах AE (A) не превышает 35%, но начиная с Bh (Bt) резко возрастает (до 84%), достигая 90–95% в нижележащих горизонтах. Одновременно с глубиной увеличивается доля органического углерода, прочно связанного с минералами (извлекаемого только в 10% HF). Максимальный возраст углерода нижних слоев подзолов и камбисолей, исследованных авторами [12], согласно радиоуглеродному анализу, датируется 5760 В.-Р., а среднее время существования органического углерода в лесных почвах умеренного климата (подзолы, лювисоли, камбсоли) на глубине более 20 см по расчетам Фонтейн с соавт. [8] может достигать 2–10 тысяч лет. Таким образом, органо-минеральные соединения нижних горизонтов почв устойчивы к разложению, в том числе и в современных условиях.

Для целей прогнозирования важное значение имеет представление о существующем потенциале сорбционной емкости почв по отношению к поступающему из верхних слоев органическому углероду, в частности, растворимым веществам, перемещающимся с потоками влаги. Такие данные получены для многих почв стран западной Европы и Америки [14, 16, 22]. Отметим, что в большинстве сорбционных экспериментов, за редким исключением [24] в качестве модельного сорбтива используются растворимые органические вещества, экстрагированные водой из горизонта лесной подстилки, хотя на пути к нижним почвенным горизонтам эти вещества претерпевают значительную трансформацию. В настоящей работе водорастворимые органические вещества (**ВОВ**), извлеченные из лесной подстилки, предварительно пропускали через элювиальный горизонт подзолов и подзолистой почвы, после чего исследовали сорбцию органических веществ из полученных равновесных растворов нижележащими иллювиальными горизонтами. Целью исследования являлось изучение закономерностей взаимодействия ВОВ с горизонтами E (EL) и BF (BT) подзолов и подзолистой почвы и количественная оценка сорбционной емкости горизонтов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования были подзол и дерново-подзол супесчаного состава (разрез 7, ЦЛГПБЗ, Тверская обл.; разрез 3, Владимирская обл.) и палево-подзолистая легкосуглинистая почва (разрез 9, ЦЛГПБЗ, Тверская обл.). Названия почв даны по классификации почв РФ 2004 г., по номенклатуре WRB-2014 подзол и дерново-подзол относятся к реферативной группе Podzol, подзолистая почва – к реферативной группе Ретисолей (Retisols). Почвы разрезов 7 и 9 сформированы в сложном ельнике, березово-еловой парцелле, лесная подстилка представлена соответствующим опадом (в подзолистой почве, кроме хвои и листьев, также присутствовало небольшое количество очеса зеленых мхов). Разрез 3 заложен в сосняке с примесью березы, подстилка представлена сосновым опадом, в основном, хвоей. В работе использовали горизонты E и BF подзолов и горизонты EL и BT подзолистой почвы. Некоторые их свойства приведены в табл. 1.

Для исследования сорбционной способности иллювиальных горизонтов почв был поставлен модельный эксперимент. В качестве сорбтива использовали водорастворимые органические вещества горизонта сосновой подстилки дерново-подзола (разрез 3), которые извлекали водной вытяжкой. Выбор данного сорбтива был обусловлен

Таблица 2. Диапазоны концентраций органического углерода и значений pH растворов в сорбционных опытах

Сорбирующаяфаза	Концентрация $C_{орг}$ в исходных растворах		pH	
	мг/л	ммоль/л	исходный	равновесный
Горизонты E (EL)	11.4–175.7 (250.5)	1.0–14.6 (20.9)	5.28–4.65	6.59–5.81*
Горизонты BF (BT)	33.3–341.4	2.8–28.5	6.59–5.81	7.09–6.19*
Гетит	18.6–557.8	1.5–46.5	4.53–5.03	7.15–6.50
Каолинит	13.9–279.0	1.2–23.2	4.70–5.28	7.15–6.61
Иллит	9.6–96.3	0.8–8.0	4.84–5.17	7.01–6.84

* Только для 3–4 последних точек изотерм.

следующим обстоятельством. Ранее нами (неопубликованные данные авторов) было установлено, что ВОВ сосновой подстилки сорбируются наиболее интенсивно (по сравнению с подстилками другого состава, в частности, березово-еловой), поскольку содержат большее количество гидрофобных (по Леенхееру [15]) соединений. Вещества этой фракции включают ароматические кислоты с COOH и OH группами в *о*-положении, что максимально благоприятно для их сорбции на гидроксидах железа по механизму лигандного обмена [9]. Таким образом, вещества из сосновой подстилки были использованы в экспериментах как модельные. Соотношение фаз при извлечении ВОВ из подстилки составляло 1 : 15, время настаивания – 36 ч. После экстракции ВОВ раствор отделяли фильтрованием через бумажный, а затем мембранный фильтр (0.45 мкм). Далее из него разбавлением готовили растворы для сорбционного опыта с концентрациями от 1 до 21 ммоль C/л (табл. 2). Эти растворы (опыт с каждым уровнем концентрации выполняли в трех повторностях) добавляли к навескам горизонтов E (EL) почв, соблюдая соотношение фаз 1 : 10, и оставляли на сутки в темноте. Через сутки равновесные растворы отфильтровывали через бумажный, а затем мембранный фильтр (0.45 мкм) и отделяли часть объемов, необходимую для определения концентрации углерода. Оставшиеся объемы растворов сначала объединяли (по 3 повторности) для усреднения, а затем разделяли на 3 части, получая снова по 3 раствора (аналитические повторности) с одинаковой концентрацией углерода. Таким образом была составлена новая серия "нагрузочных" растворов с возрастающей концентрацией органического углерода (каждая в трехкратной повторности) для получения изотермы сорбции ВОВ горизонтами BF (BT). Концентрации углерода в этих растворах составляли от 2.8 до 28.5 ммоль/л; значения pH 6.59–5.81. Эти растворы приводили в равновесие с навесками горизонтов BF (BT) почв; условия проведения сорбции сохраняли аналогичными вышеописанным. Количество углерода во всех исходных и равновесных растворах определяли стандартным бихроматным методом, значения pH – потенциометрически на иономере И-500. Количество поглощенного углерода находили по разности между добавленными и равновесными количествами. Результаты сорбции описывали уравнением изотермы начальных масс Нодвина [19] и уравнением Ленгмюра.

Выбор схемы последовательной сорбции объясняется следующими причинами. В природе органические вещества элюируются из подстилки и поступают с гравитационной и капиллярной влагой в нижележащие слои почвы, поочередно взаимодействуя с разными горизонтами профиля. В результате такого контакта происходит селективное поглощение более прочно сорбирующихся компонентов, десорбция одних соединений и последующий вынос вниз по профилю других. Согласно схеме, предложенной Кайзером и Калбитцем [13], закреплению растворенных органических веществ в нижних горизонтах почв с промывным водным режимом предшествует их временная иммобилизация в более верхних слоях, трансформация ранее сорбированных веществ, обменные процессы и последующий перенос десорбируемого вещества вглубь почвы. Разница в возрасте углерода почв на разной глубине говорит о том, что в горизонтах B и C закрепляется сразу лишь малая доля растворенных органических веществ, новообразованных из опада и подстилки, а основная их часть представлена уже достаточно давно находящимися в почве ("состаренными", aged) соединениями, десорбированными из твердой фазы вышележащих горизонтов или растворенными в ходе взаимодействия со "свежими" ВОВ. Таким образом, в проведенном нами эксперименте в иллювиальные горизонты почв вносились растворенные органические вещества, извлеченные из подстилки и затем прошедшие стадию сорбционно-десорбционного взаимодействия с гор. E (EL). Этот прием, хотя и не полностью, но в большей мере позволяет приблизить условия лабораторного эксперимента к природным.

Для объяснения процессов, протекающих в разных горизонтах при внесении в них органических веществ, также был поставлен ряд сорбционных экспериментов с минералами: каолини-

том, иллитом и гетитом. Данные минералы могут являться наиболее типичными сорбирующими фазами в горизонтах E (EL) и BF (BT) изучаемых почв. В качестве сорбтива использовали также растворимые органические вещества, экстрагированные из сосновой подстилки. Содержание углерода и значения pH исходных растворов приведены в табл. 2. Диапазоны концентраций углерода различались в связи с разной сорбционной емкостью минералов, они были подобраны так, чтобы закономерности поглощения описывались использованными в работе уравнениями изотерм. Соотношение фаз в этих экспериментах составляло 1 : 100, время взаимодействия – 1 сутки. Помимо содержания углерода, в исходном и равновесных растворах определяли ряд дополнительных характеристик: содержание растворенных фенольных соединений (РФС), величины коэффициентов удельной экстинкции (E-254), отношение SR (spectral ratio) углов наклона спектра в диапазонах длин волн 275–295 и 350–400 нм. Значения E-254 и SR используют как относительные показатели доли ароматического углерода и молекулярной массы ВОВ, соответственно [10, 11]. Также оценивали соотношение углерода гидрофильных и гидрофобных соединений (по способности к сорбции на гидрофобной смоле XAD-7H при pH 2 [15], измеряли молекулярно-массовые характеристики ВОВ (методом эксклюзионной хроматографии на сефадексе G-50) и снимали спектры флуоресценции растворов. По последним строили матрицы (EEM) возбуждения-эмиссии флуоресценции для идентификации в составе ВОВ типичных флуорофоров и рассчитывали флуоресцентные индексы: β:α [25], FI [6] и HIX [20]. Индекс β:α (freshness index) первоначально предложен для природных поверхностных вод в качестве показателя происхождения растворенного органического вещества, в частности, оценки относительного вклада автохтонных соединений. По сути он отражает отношение в составе ВОВ неспецифических и специфических (терригенный источник) органических веществ. Поскольку в водах автохтонные вещества – это неспецифические, преимущественно белковые соединения (величины β:α тесно коррелируют с общим содержанием растворенного N), которые быстро минерализуются по сравнению с более стабильными гумусовыми веществами, индекс выявляет соотношение относительно молодых (“свежих”, новообразованных) и более “старых” веществ (гумусовой природы): меньшие значения индекса β:α говорят о большей доле гумифицированных соединений наземного, почвенного происхождения. Для ВОВ почв индекс β:α, таким образом, может применяться как показатель относительной доли лабильных и неспецифических веществ, представленных РФС или протеинами, поскольку они обладают собственной коротковолновой (λex/λem = 310/380 нм) флуоресценцией. Индекс FI, также применяемый для характеристики происхождения органического вещества поверхностных вод, отражает соотношение флуоресценции, обусловленной органическими экссудатами водорослей и микроорганизмов (λex/λem = 370/470 нм), и гумусовых веществ (λex/λem = 370/520 нм). Применительно к почвам, этот индекс также может являться показателем большей или меньшей доли среди ВОВ неспецифических, преимущественно низкомолекулярных соединений. Индекс HIX обратно коррелирует с величиной атомного отношения H : C, отражая степень конденсированности органических соединений.

Типы флуорофоров классифицировали, используя номенклатуру для поверхностных вод, разработанную Коубл [3]. Изотермы сорбции водорастворимых органических веществ на минералах описывали уравнением Ленгмюра и уравнением изотермы начальных масс [19].

Характеристики свойств сорбентов (горизонтов почв и минералов) определяли следующими методами: содержание несиликатного железа по Тамму и Мера-Джексону, гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии на приборе Fritsch Analysette-22 MicroTecPlus (Германия), контактный угол смачивания (КУС) – методом статической посаженой капли (static sessile drop) на гониометре с микровидеокамерой и программным обеспечением для анализа формы капли, Kruss DSA 100 (Германия). Удельную поверхность и удельный объем пор определяли сорбционным методом на Сорбтометре-М.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изотермы сорбции ВОВ почвами представлены (на примере подзола разреза 7) на рис. 1 в координатах уравнения изотермы начальных масс (IM): $RE = mXi - b$, где RE – адсорбция (десорбция) мг С/г почвы, Xi – количество углерода ВОВ в добавляемых к почве растворах (мг С/г почвы), b – количество (мг С/г почвы) растворимого углерода твердой фазы (нативный углерод), которое может быть выделено в раствор, где органическое вещество (сорбтив) отсутствует (Xi = 0), m – угол наклона изотермы, характеризующий интенсивность поглощения.

В результате взаимодействия ВОВ из подстилки с горизонтами E (EL) почв наблюдалась почти во всех случаях только десорбция нативного органического вещества: графики изотерм начальных масс располагались ниже оси абсцисс (рис. 1, А) во всем диапазоне использованных нагрузок. С увеличением количества углерода, добавляемого с исходными растворами, отрицательные значения величины RE возрастают, что говорит об росте десорбции углерода из твердой фазы. При

имеющихся значениях pH равновесных растворов (табл. 2) увеличивается отрицательный заряд поверхности твердых фаз, что препятствует удерживанию и закреплению органических анионов. При этом с увеличением в добавляемых растворах концентрации ВОВ пропорционально увеличивается и количество катионов (железа, алюминия и других), которые связывают десорбируемые органические вещества в комплексы, стабилизируя их таким образом в растворе. Последним обстоятельством, вероятно, и объясняется увеличение десорбции нативного углерода из горизонта по мере увеличения концентрации в растворах ВОВ.

Параметры уравнений изотерм позволили определить количества нативного растворимого углерода *b*, которые могут быть десорбированы из гор. Е (EL) при Xi = 0 (то есть гипотетическим раствором того же состава, что и добавляемый к почве, но не содержащим органического вещества). Они составляют 112–138 мг С/кг почвы для горизонтов Е подзолов, 378 мг С/кг почвы – для гор EL подзолистой почвы. Интенсивность десорбции оказалась примерно одинакова ($m = -0.76$) для обеих почв Тверской области, для дерново-подзола в два раза ниже ($m = -0.34$). Таким образом, в исследованном диапазоне поступления ВОВ (до 250 мг/л (2.5 мг С/г почвы)) в равновесные растворы из твердой фазы всех элювиальных горизонтов дополнительно вытесняются органические вещества, что, естественно, изменяет исходную концентрацию и качественный состав ВОВ, которые далее будут поступать в нижележащие горизонты. Десорбция нативных веществ под влиянием внесения растворов, содержащих высокие (40–100 ммоль/кг) концентрации ВОВ из подстилки типична для элювиальных горизонтов [22].

Горизонты BF (BT) преимущественно сорбировали (рис. 1, Б) внесенные в них органические вещества, представляющие собой смесь компонентов, экстрагированных из подстилки и элювиальных горизонтов. Параметры уравнений сорбции представлены в табл. 3. Помимо коэффициентов уравнений изотерм *m* и *b* в таблице приведены величины поглощения почвенными горизонтами углерода (в мг/кг) при его концентрациях в добавляемых растворах 250 и 100 мг/л (RE-250 и RE-100).

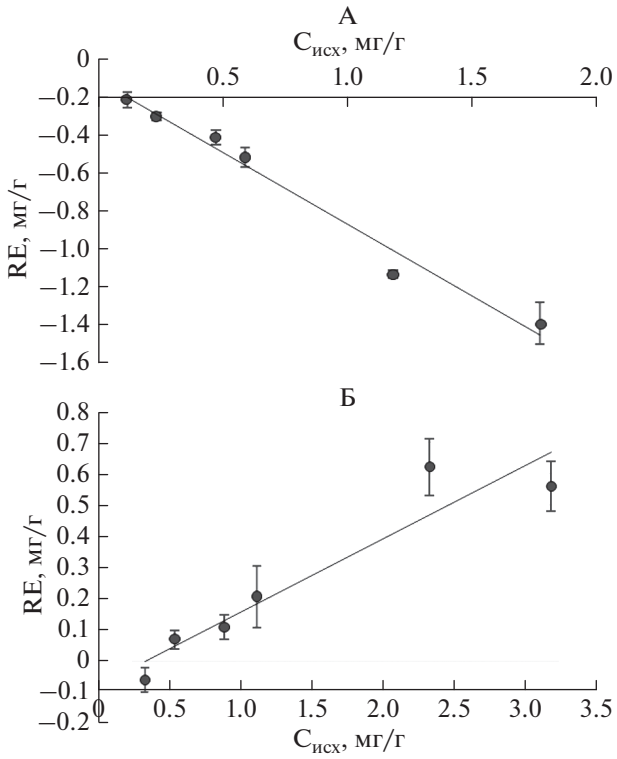

Рис. 1. Изотермы сорбции (десорбции) водорастворимых органических веществ минеральными горизонтами подзола (разрез 7): А – горизонт Е, Б – горизонт BF (планки погрешностей соответствуют величинам стандартного отклонения значений сорбции).

Интенсивность сорбции ВОВ, прошедших взаимодействие с элювиальными горизонтами, оказалась у изученных горизонтов В различной: наиболее интенсивно поглощение протекало в подзолистой почве, менее интенсивно – в подзолах: показатели *m* достоверно различались (по критерию Краскела–Уоллиса H (2, $N = 9$) = 6.49, $p = 0.03$). Главной фазой, сорбирующей растворенное органическое вещество, в иллювиальных горизонтах считаются оксиды и гидроксиды железа [13, 17, 22]. Поэтому были рассмотрены связи показателей сорбции ВОВ, рассчитанные по

Таблица 3. Показатели сорбции ВОВ иллювиальными горизонтами почв

Горизонт, разрез, почва	ВОВ	Показатели сорбции ВОВ			
		m	*b*, мг/кг	RE-250, мг/кг	RE-100, мг/кг
BF, 7, подзол	После взаимодействия с гор. Е	0.24	–79	521	161
BT, 9, подзолистая	После взаимодействия с гор. EL	0.43	–328	747	102
BF, 3, дерново-подзол	После взаимодействия с гор. Е	0.32	–104	696	216
BF, 7, подзол	Непосредственно из подстилки	0.68	–573	1127	107

уравнениям изотерм, с содержанием соединений оксалато- (Fe_{ox}) и дитионитрастворимого железа (Fe_d) для количественной оценки степени их влияния на поглощение органических веществ.

Оказалось, что интенсивность поглощения *m* не коррелирует с содержанием соединений несиликатного железа (отчасти, возможно из-за небольшого объема выборки), и ее наибольшее значение соответствует почве с более тяжелым гранулометрическим составом. Что касается величин сорбции RE, их зависимость от содержания железа не проявлялась при высоких уровнях нагрузки (более 150 мг С/л (1.5 г/кг)), так как в этих условиях, по-видимому, большее значение имеет удельная поверхность. Однако при нагрузке 100 мг С/л и менее поглощение ВОВ почвенными горизонтами четко коррелирует ($r = 0.997$, $n = 3$) с содержанием в них соединений дитионитрастворимого железа: на первое место по показателю RE-100 (216 мг С/кг), выходит горизонт BF дерново-подзола, за ним следует горизонт BF подзола (161 мг С/кг) и последнее место (102 мг С/кг) занимает горизонт BT подзолистой почвы (здесь, начиная с нагрузки около 75 мг С/л и меньше, при добавлении ВОВ сорбция совсем не происходит).

Полученные изотермы позволяют оценить потенциальную возможность дополнительного накопления органического углерода в нижних горизонтах почв за счет ВОВ, мигрирующих с почвенными растворами в природных условиях. Согласно результатам стационарных наблюдений, проведенным нами ранее в ЦЛГПБЗ [2], величины концентрации углерода в почвенных растворах, поступающих в иллювиальные горизонты подзолов и подзолистых почв (при их влажности около 20%), составляют около 10–30 мг/л. Судя по параметрам изотерм, граница концентрации углерода в добавляемых растворах (пересечение изотермы с осью *X*), после которой его десорбция из почв количественно преобладает над сорбцией, составляет для подзолов как раз около 32 мг/л. Это говорит о том, в настоящее время в системе твердая–жидкая фаза горизонтов BF *in situ* соблюдается сорбционное квазиравновесие. Однако при периодическом (и/или локальном) поступлении более концентрированных растворов, что возможно, например, при более быстром просачивании влаги, когда образованные вещества еще не успевают минерализоваться, сорбция возможна. Тогда, при концентрации углерода в растворах 50 мг/л расчетная величина поглощения в гор. BF подзолов, судя по уравнениям изотерм, составит 41–56 мг С/кг почвы, а при 100 мг/л – 161–216 мг/кг. В подзолистой почве, содержащей в горизонте BT заметно большее количество нативного растворимого углерода ($b = -328$ мг/кг, табл. 3), поглощение его из поступающих растворов может происходить при более высокой концентрации и в меньшем количестве, составляя даже при $C_{доб} = 100$ мг/л около 102 мг/кг почвы. В пересчете на общее содержание органического углерода в иллювиальных горизонтах (0.16–0.29%, табл. 1), эта потенциальная сорбция может составить в подзолах от 1.4–2.4 до 5.5–9.5% в зависимости от количества ВОВ в поступающих растворах (при $C_{доб} = 50$ и 100 мг/л, соответственно), а в подзолистой почве около 6% (при $C_{доб} = 100$ мг/л).

Таким образом, иллювиальные горизонты изученных почв, в особенности, подзолов, начиная с определенной концентрации ВОВ в растворах потенциально способны сорбировать органический углерод в количествах, измеряемых десятками и сотнями мг на кг почвы. При этом из табл. 3 видно, что прохождение растворов через горизонт E увеличивает величину поглощения. Так, расчетное (по уравнениям изотерм) поглощение углерода горизонтом BF подзола (разрез 7) при $C_{доб} = 100$ мг/л для растворов ВОВ, непосредственно извлеченных из подстилки (неопубликованные данные авторов), составляет 107 мг/кг, а для предварительно прошедших взаимодействие с горизонтом E – 161 мг/кг. Ранее нами [1] было показано, что после взаимодействия экстрагированных из подстилки ВОВ с горизонтом E подзола среди них возрастают: доля углерода гидрофобной фракции, доля высокомолекулярных соединений и коэффициенты экстинкции E-254. Увеличение количества таких веществ, по-видимому, должно быть связано как с растворением части соединений твердой фазы, так и обменными реакциями, в результате которых сорбирующие фазы горизонта E избирательно поглощают некоторую часть поступающих ВОВ из подстилки и выделяют в раствор нативные вещества. Для проверки этой гипотезы мы проанализировали закономерности сорбции ВОВ подстилки минералами, присутствие которых вероятно в исследуемых горизонтах почв.

Сначала рассмотрим особенности поглощения ВОВ глинистыми минералами – каолинитом и иллитом, присутствующими в элювиальных горизонтах исследуемых почв; далее будет рассмотрена сорбция ВОВ гетитом, присутствие которого вероятно в горизонтах BF(BT).

Закономерности сорбции ВОВ на глинистых минералах хорошо описываются как уравнением изотермы начальных масс (коэффициенты детерминации $R^2 = 0.86–0.98$), так и уравнением Ленгмюра (коэффициенты детерминации $R^2 = 0.89–0.94$). Использование последнего позволило рассчитать (по регрессионным моделям) величину максимального поглощения минералами углерода, Qmax. Вид изотерм (линеаризованная форма, по которой проведен расчет величины Qmax) приведен на рис. 2, параметры сорбции представлены в табл. 4. Максимальная сорбционная ем-

Таблица 4. Свойства минералов и параметры поглощения ВОВ

Минерал	Свойства				Параметры сорбции ВОВ			
	S, м^2/г	% фракции <1 мкм	КУС, °	объем пор, см^3/г	Qmax, мг С/г	Qmax, мг С/м^2	m	b, мг С/г
Каолинит	11.6	40.5	21.4	0.005	6.0	0.51	0.20	–0.68
Иллит	5.2	7.2	20.8	0.002	2.1	0.40	0.23	–0.25
Гетит	78.0	10.2	12.1	0.036	25.0	0.32	0.31	–1.29

кость минералов оказалась равной 6 мг С/г каолинита и 2 мг С/г иллита. Более высокое поглощение каолинита в данном случае связано с его физическими характеристиками: содержанием (40%) илистой фракции <1 мкм и большей величиной удельной поверхности (11.6 м^2/г). У иллита эти показатели меньше: около 7% и 5.2 м^2/г, так как использованный образец был достаточно крупнодисперсным: основную долю (60%) составляли частицы, относящиеся по размеру к среднепылеватой фракции (5–10 мкм). Соответственно, максимальное поглощение на единицу площади составляет 0.51 и 0.39 мг/м^2 для каолинита и иллита. Вообще величина максимального поглощения может варьировать очень существенно в зависимости от текстурных характеристик минералов. Феng [7] приводит диапазон сорбции гуминовых кислот из торфа на разных образцах каолинита 0.08–0.43 мг С/м^2.

Сайди с соавт. [21] отмечают прямую корреляцию величины поглощения ВОВ с удельной поверхностью минералов и отношением емкости катионного обмена к удельной поверхности (как показателя плотности поверхностного заряда). В их экспериментах более высокой сорбционной способностью на единицу массы характеризовался иллит (13 мг С/г), а на единицу площади поверхности – каолинит (0.46 мг С/м^2). В качестве главного механизма сорбции на иллите и каолините в условиях своего эксперимента (pH ~ 6) Сайди с соавт. предлагают образование катионных мостиков, что вполне вероятно и для условий нашего опыта, где значения pH равновесных растворов были выше 6.5 (6.5–7.1). Кроме того, на каолините возможна дополнительная сорбция гидрофобных компонентов ВОВ на базальных поверхностях.

Вместе с тем, несмотря на более высокую максимальную сорбционную емкость каолинита, судя по коэффициентам m уравнений изотерм (табл. 4), интенсивность поглощения ВОВ на иллите больше, чем на каолините, поэтому при одной нагрузке 100 мг С/л расчетная величина поглощения RE-100 составляет 1.3 и 2.0 г С/кг минерала для каолинита и иллита, соответственно. Более интенсивное поглощение ВОВ иллитом, вероятно, обусловлено большей величиной плотностью заряда на его поверхности.

Полученные значения величин поглощения на глинистых минералах на порядок больше по сравнению с количествами ВОВ, поглощенными в иллювиальных горизонтах почв (табл. 3) при одинаковой нагрузке, что в первую очередь связано с текстурными свойствами (большим содержанием частиц илистой фракции (менее 1 мкм)). Таким образом, минералы способны к поглощению значительных количеств ВОВ.

О характеристиках поглощаемых веществ и избирательности сорбции можно получить некоторые представления, анализируя изменения состава растворов ВОВ после контакта с минералами (табл. 5). Для этого были рассмотрены варианты сорбционного опыта, соответствующие условиям, когда из добавляемых растворов сорбировалось наибольшее количество компонентов (последние точки изотерм). Поскольку величины Qmax у разных минералов заметно отличались, концентрации ВОВ в добавляемых (и равновесных) растворах в этих точках также различались. Так, максимальная концентрация углерода ВОВ в растворах, добавленных к каолиниту (и гетиту) была в 3–4 раза больше, чем в растворах, добавленных к иллиту (табл. 2, рис. 2). Этим обстоятельством обусловлена разница в концентрациях РФС в исходных растворах, добавляемым к разным минералам. Что касается величин E-254, то наблюдаемый диапазон значений (0.009–0.017 л/(мг × см)) вероятно, связан с естественным варьированием состава ВОВ, извлекаемых из нескольких разных образцов подстилки. Также нельзя исключить возможность влияния на величины коэффициентов экстинкции слабых межмолекулярных взаимодействий компонентов раствора, поразному протекающих в растворах с разной концентрацией.

ВОВ равновесных растворов по сравнению с исходным характеризуется возрастанием доли гидрофобной фракции (39–43%), более высокими (в 1.6–3.7 раза) коэффициентами экстинкции E-254, меньшими значениями SR (отношением углов наклона коротковолновой (275–295 нм) к длинноволновой (350–400 нм) областям спектра), что можно трактовать как следствие увеличения среди них доли веществ ароматического строения с более высокими молекулярными массами. По-

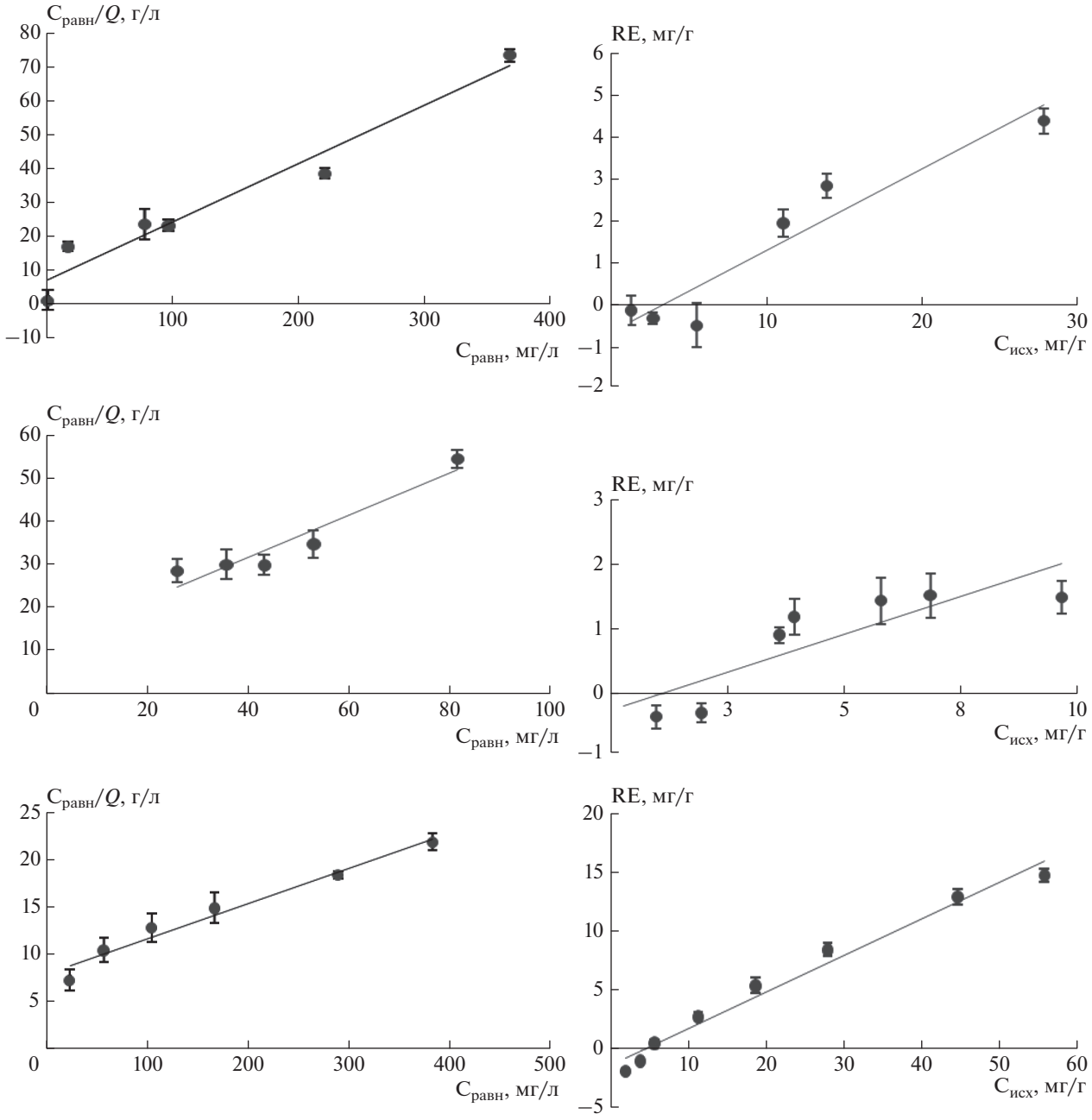

Рис. 2. Изотермы сорбции ВОВ Ленгмюра и начальных масс на каолините, иллите и гетите (сверху вниз); планки погрешностей соответствуют величинам стандартного отклонения.

следнее подтверждается исследованием средневзвешенных молекулярных масс ВОВ (рис. 3). После взаимодействия с обоими глинистыми минералами (ситуация с гетитом будет рассмотрена ниже) доля высокомолекулярной фракции возросла в 2 раза, причем в случае с каолинитом за счет снижения доли веществ со средними молекулярными массами, а в случае со слюдой – за счет сильного уменьшения количества низкомолекулярной фракции. Рост флуоресцентного индекса β:α, отражающего соотношение в составе органических веществ компонентов, включающих ароматические фрагменты, но различной природы (гумусовой и негумусовой), говорит о том, что в растворе возрастает доля неспецифических веществ. Флуоресцирующие соединения могут быть представлены фрагментами ароматических кислот, аминокислот (протеинов). Теоретически, рост их содержания может быть следствием десорбции из минералов (где присутствует некоторое количество углерода в виде примеси) или микробного синтеза за время опыта, но также увеличение β:α возможно

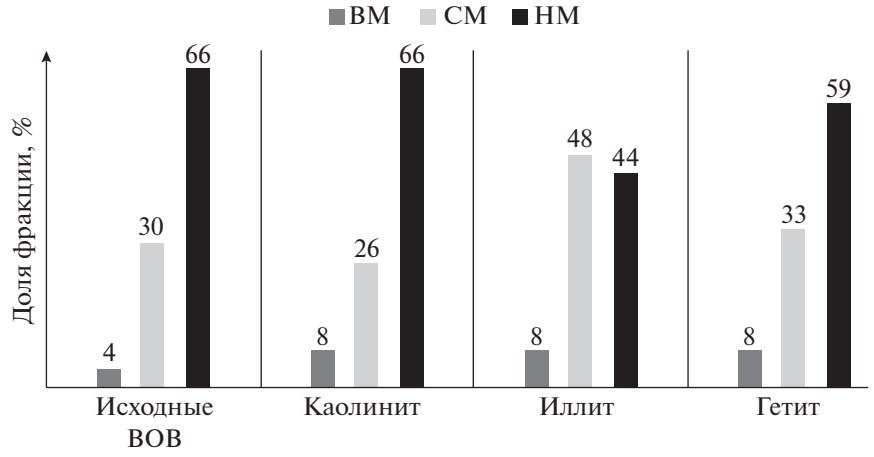

Рис. 3. Молекулярно-массовые свойства ВОВ до и после взаимодействия с минералами (ВМ – высокомолекулярная, СМ – среднемолекулярная, НМ – низкомолекулярная фракции).

за счет поглощения части исходных гумусовых соединений на минералах, в результате чего их флуоресценция (знаменатель индекса) уменьшается. Содержание РФС в растворе при взаимодействии с глинистыми минералами практически не меняется (табл. 5), то есть нет оснований считать, что эти соединения поглощаются избирательно. Однако выявлены другие закономерности, которые говорят о селективности поглощения некоторых ВОВ на каолините и иллите. Судя по увеличению среди оставшихся в растворах веществ доли гидрофобной фракции и изменению УФ-спектров (Е-254), глинистыми минералами – каолинитом и иллитом – поглощаются преимущественно менее ароматические, гидрофильные (более полярные) и более низкомолекулярные соединения. В целом селективность поглощения сильнее выражена у иллита. Наблюдаемая селективность может быть объяснена, если в качестве основного механизма сорбции принять образование связей с органическими молекулами через катионные мостики. При поглощении ВОВ происходило увеличение pH равновесных растворов примерно на единицу и более (до 6.6–7.2). Поверхность минералов при таких значениях pH заряжена преимущественно отрицательно, и связи через катионный мостик образуют относительно более полярные молекулы, включающие кислотные (карбоксильные) группы. Вещества гидрофильной фракции содержат больше карбоксильных групп на единицу углерода, поэтому имеют преимущества в поглощении. Кроме того, среди исходных ВОВ они количественно преобладают (более 2/3, табл. 5). Ароматические структуры преимущественно сосредоточены в гидрофобной фракции, содержат меньше (по сравнению с гидрофильной фракцией) карбоксильных групп, что сокращает возможности поглощения через катионные мостики, хотя на каолините они могут частично закрепляться на силоксановых поверхностях за счет гидрофобных взаимодействий.

Некоторую дополнительную информацию об изменении состава ВОВ, происходящем при сорбции, дает сравнение свойств гидрофобных и гидрофильных фракций до и после взаимодействия ВОВ с минералами. В табл. 6 представлены показатели спектров поглощения и индексы флуоресценции веществ этих фракций. Отметим, что эти показатели несколько отличаются от спектральных характеристик исходного раствора ВОВ (табл. 5). Аддитивность оптических плотностей соблюдается лишь в отсутствие каких-либо реакций между компонентами растворов, поэтому даже слабые межмолекулярные взаимодействия, образование водородных связей, диссоциация веществ, изменения конформационного состояния органиче-

Таблица 5. Изменения характеристик ВОВ после их сорбционного взаимодействия с минералами (среднее и доверительные интервалы, $p = 0.95$)

Минерал	РФС, мг/л		Е-254, л/(мг × см)		SR		β:α		ГФБ, %	
	исх	равн	исх	равн	исх	равн	исх	равн	исх	равн
Каолинит	21.9	22.3 ± 1.1	0.009	0.014 ± 0.001	3.36	3.12 ± 0.01	0.32	0.39 ± 0.04	32	39
Иллит	6.3	6.1 ± 0.6	0.010	0.037 ± 0.001	3.36	3.31 ± 0.15	0.32	0.42 ± 0.01	32	43
Гетит	43.9	38.2 ± 2.6	0.017	0.016 ± 0.002	3.36	3.29 ± 0.22	0.32	0.34 ± 0.01	32	19

Таблица 6. Спектральные характеристики фракций ВОВ до и после взаимодействия с минералами

Минерал	Фракция ВОВ	Спектральные характеристики ВОВ		
		E-254	β:α	HIX
Исходное водорастворимое органическое вещество				
Нет	ГФБ	0.040	0.28	0.95
	ГФЛ	0.026	0.18	0.99
После взаимодействия с минералами				
Каолинит	ГФБ	0.059	0.43	0.85
	ГФЛ	0.017	0.43	0.80
Иллит	ГФБ	0.031	0.61	0.81
	ГФЛ	0.003	0.59	0.78
Гетит	ГФБ	0.020	0.47	0.66
	ГФЛ	0.006	0.38	0.81

ских молекул могут приводить к изменению закономерностей светопоглощения. Интенсивность этих процессов может быть разной в растворах разного ионного состава, что и может быть причиной имеющихся различий.

Снижение величин экстинкции E-254 гидрофильных фракций после органо-минерального взаимодействия с глинистыми минералами говорит о том, что среди оставшихся в растворе (не сорбированных) веществ уменьшается количество ароматических структур, вероятно, за счет их поглощения. Коэффициенты экстинкции ГФБ фракций, напротив, увеличиваются. Таким образом, из состава ГФЛ фракции слюда и каолинит поглощают вещества преимущественно ароматического, а из ГФБ – неароматического строения. Это может быть связано с разными структурными особенностями ароматических компонентов в этих фракциях.

Как уже говорилось, ароматические компоненты гидрофобной фракции содержат меньше карбоксильных групп и потому не имеют преимуществ в поглощении при нейтральных значениях pH. При этом незначительная часть ароматических фрагментов, попадающих в состав ГФЛ фракции, входит в состав протеинов или может быть представлена сильно окисленными карбоновыми кислотами (бензойной, гидроксибензолкарбоновыми и др.) и их производными. Такие структуры могут избирательно поглощаться через мостиковые связи, что и приводит к уменьшению их доли среди ГФЛ веществ, остающихся в растворе.

На изменение качественного состава ВОВ указывают также индекс свежести и индекс гумификации HIX, первый из которых для обеих фракций увеличивается, а второй уменьшается. Такие изменения возможны, во-первых, при избирательном поглощении на минералах гумусовых веществ по сравнению с неспецифическими соединениями, а во-вторых, при появлении в растворе новых компонентов (или увеличении их доли). Последние могут быть как десорбированы из минералов (в некоторых вариантах опыта наблюдалась десорбция РФС в небольшом количестве) или новообразованы в условиях эксперимента. Более точное представление о качественном составе ВОВ дает анализ матриц флуоресценции. Например, после поглощения на каолините из состава ГФЛ фракции ВОВ полностью исчезает флуорофор типа D, который имеет максимум флуоресценции в области возбуждения/эмиссии λex/λem ~ 400/500 нм (по [3] это вещества типа фульвокислот), и появляются ранее отсутствовавшие флуорофоры типа C (λex/λem = 320/425 нм). Это также гумусовые вещества, но, судя по более коротковолновому положению полосы флуоресценции, с менее длинной, чем у типа D, цепью сопряжения. Кроме того, в растворе появляются флуорофоры типа B и T – это соединения белковой природы, или связанные с белками. Их максимумы флуоресценции: λex/λem = 275/305 и 230/310 нм. Дополнительные полосы в спектрах диагностируют присутствие еще ряда веществ, не относящихся к перечню [3] типичных флуорофоров природных вод. Это скорее всего, низкомолекулярные соединения, так как их флуоресценция (λex/λem = = 220/425, 200/320 и 220/600 нм), возбуждается наиболее короткими УФ-волнами; возможно, фенольной природы. Так, две выраженные полосы с максимумами при 220/425 и 300/425 нм (эти две полосы близки к обнаруженным нами) и менее четкие контуры при 220, 280/350 нм обнаружены авторами [4] для структур типа 4-фенокисифенила.Полученные данные по составу ВОВ говорят о том, что в почвенных элювиальных горизонтах, где присутствуют каолинит и иллит, при органоминеральном взаимодействии могут происходить реакции, в результате которых в растворе в целом увеличивается доля ароматического углерода и высокомолекулярных соединений,

компонентов с более высокой гидрофобностью по сравнению с растворами ВОВ из горизонта подстилки. Поэтому ВОВ, мигрирующие ниже горизонтов E (EL) и обогащенные такого рода веществами, будут проявлять склонность к последующему их поглощению в иллювиальных горизонтах, где основным сорбентом являются гидроксиды железа [23]. Выявленные нами [1] закономерности сорбции ВОВ в горизонте E подзола, о которых говорилось выше, полностью соответствуют наблюдаемым в ходе взаимодействия ВОВ с каолинитом и слюдой, что говорит о возможности участия этих (типичных для элювиальных горизонтов изучаемых почв минералов) в соответствующих сорбционно-десорбционных реакциях.

Что касается природы сорбционных взаимодействий в горизонтах BF (BT), то они могут быть сопоставлены с закономерностями, полученными при изучении сорбции ВОВ на гетите, как типичном представителе минералов группы гидроксидов железа, присутствующем в этих горизонтах.

Максимальная сорбционная емкость гетита (табл. 4) составляет 25 мг С/г, а при нагрузке 100 мг С/л, расчетное (по уравнению изотермы начальных масс) поглощение составит 1.8 г/кг, что на порядок больше по сравнению с поглощением твердой фазы природных иллювиальных горизонтов (табл. 3). Величина Qmax исследованного гетита намного больше, чем каолинита и слюды, но при одной и той же нагрузке 100 мг С/л сорбированные количества ВОВ сопоставимы. Последнее связано с тем, что гетит содержит (в виде примеси) большее количество ВОВ, о чем можно судить по величине коэффициента b изотермы начальных масс и содержанию органического углерода в водной вытяжке из минерала, которое составляет 26 мг/100 г (хотя надо отметить, что полученная величина может быть завышена, если в состав минерала входили другие, способные к окислению бихроматной смесью, компоненты). Поэтому его сорбционные преимущества перед двумя другими минералами проявляются в области более высоких концентраций ВОВ в растворах. Гетит имеет значительно большую удельную поверхность (78 $м^2$/г), что обеспечивает высокую емкость его поглощения даже несмотря на то, что он представлен довольно крупными частицами (доля фракции менее 1 мкм составляет всего около 10%, а преобладает (56%) фракция 10–50 мкм). Краевой угол смачивания, КУС равен 12° и заметно меньше, чем у каолинита и слюды (около 21°). Это говорит о том, что поверхность его относительно более гидрофильна. Поэтому гидрофильные вещества, которые количественно преобладают в составе ВОВ (табл. 5), могут сорбироваться на гетите, благодаря физико-химическому сродству, и, в том числе, за счет механизма лигандного обмена.

Закономерности изменения свойств ВОВ после сорбции на гетите отличаются от тех, которые наблюдались для каолинита и слюды. Несмотря на гидрофильные свойства поверхности, на гетите селективно сорбируются гидрофобные соединения, доля которых в растворе резко уменьшается (от 32 до 19%), происходит также сорбция растворимых фенольных соединений. Аналогичные явления наблюдались нами [1] при взаимодействии ВОВ из подстилки с горизонтом BF подзола, и они соответствуют представлению о преимущественном поглощении минералами группы гидроксидов железа органических веществ типа гидроксикарбоновых кислот, содержащих ароматические фрагменты и функциональные OH- и COOH-группы в *o*-положении [9]. Эти соединения входят в основном состав веществ гидрофобной фракции, сорбирующихся на смоле XAD при pH 2. Таким образом, селективное поглощение гетитом части гидрофобных ВОВ связано с их структурными особенностями, а не полярностью. Анализ изменения молекулярных масс (рис. 3) свидетельствует о поглощении гетитом из раствора скорее веществ фракций с молекулярными массами менее 7 и 7–19 кДа, хотя по сравнению со слюдой эта тенденция выражена значительно слабее. В других работах [5] ранее отмечалась способность гетита поглощать более высокомолекулярные вещества, однако, в условиях их опыта средневзвешенная молекулярная масса ВОВ составляла около 5 кДа, а в нашем исследовании практически аналогичные вещества (Mw < 7 кДа) отнесены к низкомолекулярной фракции, которая как раз поглощалась преимущественно. В результате взаимодействия ВОВ с гетитом, как и после поглощения ВОВ на слюде, в растворе возрастает доля средне-и высокомолекулярных фракций, что соответствует наблюдаемому снижению спектрального показателя SR. Многие авторы [5, 18] в опытах на гетите наблюдали селективное поглощение более ароматических соединений. Это в нашем опыте подтверждается достоверным изменением количества растворенных фенольных соединений (табл. 5), несмотря на то, что значимых изменений коэффициентов экстинкции не зафиксировано (только в отдельных повторностях опыта значения E-254 в равновесных растворах были немного меньше, чем в исходных).

Судя по изменению спектральных характеристик ГФЛ и ГФБ фракций ВОВ после взаимодействия с гетитом (табл. 6), последний селективно поглощает компоненты ароматического строения, вне зависимости от их полярности. Об этом говорит резкое уменьшение после сорбции величин E-254 для обеих фракций ВОВ. Закономерности изменений состава флуорофоров, индексов HIX и β:α аналогичны тем, что наблюдались в случае взаимодействия с глинистыми минералами, то есть подтверждают селективность гетита к гуму-

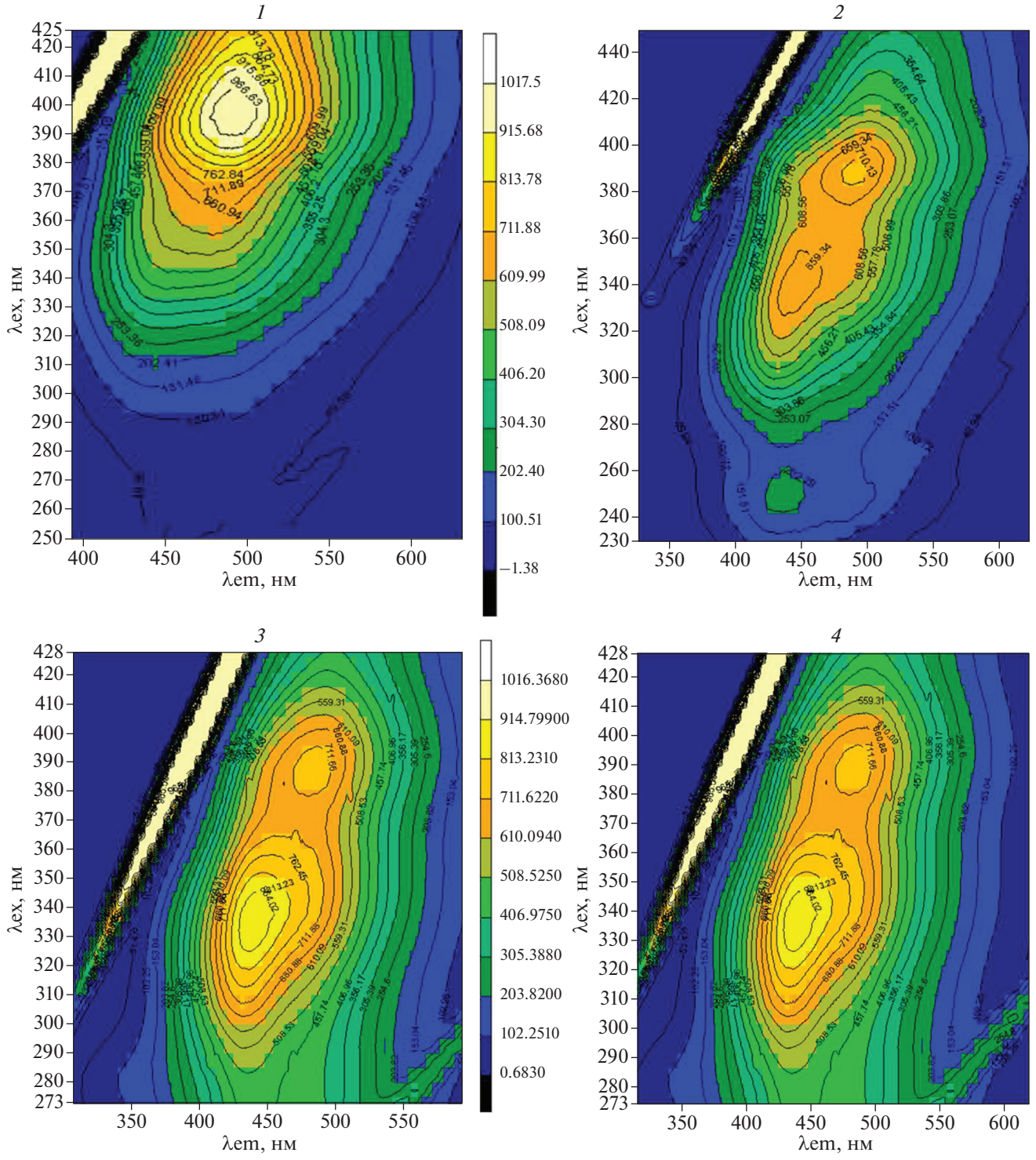

Рис. 4. Состав флуорофоров гидрофильной (ГФЛ) и гидрофобной (ГФБ) фракций до и после взаимодействия ВОВ с гетитом: ГФЛ (*1* – до, *3* – после взаимодействия), ГФБ (*2* – до, *4* – после взаимодействия). По оси *Y* отложены длины волн возбуждения (λex, нм), по оси *X* – длины волн испускания (λem, нм) флуоресценции.

совым (специфическим) веществам и свидетельствуют об обогащении растворов ВОВ после взаимодействия с минералом новыми компонентами. Состав флуорофоров после взаимодействия ВОВ с гетитом сильно изменяется (рис. 4) как в ГФЛ, так и ГФБ фракции, где также проявляется коротковолновая флуоресценция неспецифических соединений протеинового или фенольного типа.

ВЫВОДЫ

1. Под действием водных вытяжек из хвойной подстилки происходит десорбция нативных органических веществ из твердой фазы элювиальных горизонтов изученных почв, что влияет на концентрацию и качественный состав растворов, поступающих в нижележащие горизонты.

2. При поступлении растворов ВОВ, прошедших взаимодействие с горизонтами Е и содержащих 50–100 мг С/л, в обогащенные железом нижние горизонты подзолов происходит поглощение ими углерода в количествах от десятков до сотен мг С на килограмм почвы. В горизонте ВТ подзолистой почвы сорбция возможна при более высокой концентрации углерода в поступающих растворах, по сравнению с подзолами, величина RE-100 = 102 мг С/кг почвы.

3. Каолинит и иллит селективно взаимодействуют с водорастворимыми органическими веществами из подстилок, в целом извлекая из них более гидрофильные и менее ароматические компоненты с относительно низкими молекулярными массами (менее 7 кДа (иллит) и 7–19 кДа (каолинит)). При этом из состава гидрофильной фракции минералы избирательно сорбируют ароматические формы углерода, что может быть связано с их большей окисленностью (обогащением карбоксильными группами).

4. Гетит также селективно взаимодействует с ВОВ, поглощая преимущественно компоненты гидрофобной фракции, соединения фенольной природы, вещества с молекулярными массами менее 7 кДа. Гетит избирательно сорбирует из растворов соединения ароматического углерода вне зависимости от их полярности (как из гидрофобной, так и гидрофильной фракции).

5. После сорбционного взаимодействия с минералами меняется качественный состав флуорофоров ВОВ: уменьшается или исчезает более длинноволновая флуоресценция, обусловленная присутствием гумусовых веществ с длинной цепью сопряжения, появляются новые флуорофоры, содержащие фенольные и/или протеиновые фрагменты.

6. Присутствие каолинита и гидрослюды в элювиальных горизонтах почв, может быть одной из причин изменения качественного состава нисходящего потока ВОВ, за счет чего они приобретают свойства, более благоприятные для поглощения на гидроксидах железа в нижних горизонтах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят д. б. н. Е.Ю. Милановского за неоценимую помощь в определении физико-химических свойств минералов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 19-29-05028.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Золовкина Д.Ф., Караванова Е.И., Степанов А.А.* Сорбция водорастворимых органических веществ минеральными горизонтами подзола // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1215–1225.
2. *Караванова Е.И., Малинина М.С.* Пространственная и временная динамика элементного состава почвенных растворов торфянисто-подзолистых глееватых почв // Почвоведение. 2007. № 8. С. 927–936.
3. Aquatic Organic Matter Fluorescence / Eds.: P. Coble, J. Lead, A. Baker, D. Reynolds, R. Spencer. Cambridge Environmental Chemistry Series. Cambridge: Cambridge University Press. P. 75–122. https://doi.org/10.1017/CBO9781139045452.006;
4. *Barsotti F., Ghigo G., Vione D.* Computational assessment of the fluorescence emission of phenol oligomers: A possible insight into the fluorescence properties of humic-like substances (HULIS) // J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2016. V. 315. P. 87–93. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.09.012
5. *Chorover J., Amistadi M.K.* Reaction of forest floor organic matter at goethite, birnessite and smectite surfaces // Geochimicaet Cosmochimica Acta. 2001. V. 65. № 1. P. 95–109. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00511-1
6. *Cory R.M., McKnight D.M., Chin Y.P., Miller P., Jaros C.L.* Chemical characteristics of fulvic acids from Arctic surface waters: Microbial contributions and photochemical transformations // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2007. V. 112. G04S5. https://doi.org/10.1029/2006JG000343
7. *Feng X.J., Simpson A.J., Simpson M.J.* Chemical and mineralogical controls on humic acid sorption to clay mineral surfaces // Organic Geochemistry. 2005. V. 3. № 6. P. 1553–1566. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.06.008
8. *Fontaine S., Barot S., Barre P., Bdioui N., Mary B., Rumpel C.* Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply // Nature. 2007. V. 450. P. 277–281. https://doi.org/10.1038/nature06275
9. *Gu B., Schmitt J., Chen Z., Liang L., McCarthy J.F.* Adsorption and desorption of different organic matter fractions on iron oxide // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 219–229. https://doi.org/10.1021/es00050a007
10. *Helms J.R., Jason A.S., Ritchie D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K.* Absorption spectral slopes and slope ratio's as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnology and Oceanography. 2008. V. 53. № 3. P. 955–969. https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955
11. *Jaffrain J., Gurard F.* Assessing the quality of dissolved organic matter in forest soils using ultraviolet absorp-

tion spectrophotometry // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 71. № 6. P. 134–139. https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0202

12. *Kaiser K., Eusterhues K., Rumpel C., Guggenberger G., Kögel-Knabner I.* Stabilisation of organic matter by soil minerals–investigations of density and particle size fractions from two acid forest soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2002. V. 165. № 4. P. 451–459. https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4%3C451::AID-JPLN451%3E3.0.CO;2-B
13. *Kaiser K., Kalbitz K.* Cycling downwards–dissolved organic matter in soils// Soil Biology and Biogeochemistry. 2012. V. 52. P. 29–32. https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2012.04.002
14. *Kothawala D.N., Moore T.R., Hendershot W.H.* Adsorption of dissolved organic carbon to mineral soils: A comparison of four isotherm approaches // Geoderma. 2008. V. 148. P. 43–50. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.004
15. *Leenheer J.A.* Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters // Environ. Sci. Technol. 1981. V. 15. № 5. P. 578–587. https://doi.org/10.1021/es00087a010
16. *Lilienfein J., Qualls R. G., Uselman S.M., Bridgham S.D.* Adsorption of Dissolved Organic Carbon and Nitrogen in Soils of a Weathering Chronosequence // Soil Sci. Soc. Am. J. 2004. V. 68. P. 292–305. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.2920
17. *Lützow M. von, Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H.* Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model // J. Plant Nutrition and Soil Science. 2008. V. 171. № 1. P. 111–124. https://doi.org/10.1002/Jpln.200700047
18. *Mikutta R., Mikutta C., Kalbitz K., Scheel T., Kaiser K., Jahn R.* Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. V. 71. P. 2569–2590. https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.002
19. *Nodvin S.C., Driscoll C.T., Likens G.E.* Simple partitioning of anions and dissolved organic carbon in a forest soil // Soil Science. 1986. V. 142. № 1. P. 27–35. https://doi.org/10.1097/00010694-198607000-00005
20. *Ohno T.* Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter // Environ. Sci. Technol. 2002. V. 36. P. 742–746. https://doi.org/10.1021/es0155276
21. *Saidy A.R., Smernik R.J., Baldock J.A., Kaiser K., Sanderman J.* The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide // Geoderma. 2013. V. 209–210. P. 15–21. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.026
22. *Ussiri D.A.N., Johnson C.E.* Sorption of Organic Carbon Fractions by Spodosol Mineral Horizons // Soil Sci. Soc. Am. J. 2004. V. 68. № 1. P. 253–262. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.2530
23. *Vance G.F., David M.B.* Effect of acid treatment on dissolved organic carbon retention by a spodic horizon // Soil Sci. Soc. Am. J. 1989. V. 53. P. 1242–1247. https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300040042x
24. *Vandenbruwane J.* Dynamics of dissolved organic matter in forest ecosystems in Flanders. PhD thesis, 2008. Ghent University. P. 252.
25. *Wilson H.F., Xenopoulos M.A.* Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter // Nature Geoscience. 2009. V. 2. № 1. P. 37–41. https://doi.org/DOI:10.1038/ngeo391

Interaction of Water-Soluble Organic Substances of Coniferous Litter with Minerals and Horizons of Podzolic Soil and Podzols

E. I. Karavanova[1, *], D. F. Zolovkina[1, **], and A. A. Stepanov[1]

[1]Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: karavanovaei@mail.ru*

***e-mail: dasha_zolovkina@mail.ru*

Native organic substances are desorbed from the solid phase of podzolic and eluvial horizons of podzols and podzolic soil, respectively, into the solution under the effect of water-soluble components of coniferous litter. In podzols, water-soluble organic substances (WSOM) extracted from the litter and then passing through the E horizons are sorbed by the BF horizons if their concentration in the solution exceeds 35 mg C/l. Absorption ranged from tens to hundreds milligrams of carbon per kilogram of the mass of the BF horizon. Sorption of WSOM by BT horizons of podzolic soil is realized at the higher concentration of organic substances in the liquid phase than in podzols. Model experiments with minerals have shown that kaolinite and illite interact with soluble substances percolating from the litter, selectively extracting more hydrophilic, less aromatic components with relatively low molecular weights. Goethite interacts with WSOM, absorbing, on the contrary, mainly hydrophobic components, substances of phenolic nature, components enriched in aromatic carbon, substances with molecular weights less than 7 kDa. The spectral characteristics of WSOM changed after sorption interaction with minerals: the humus-like fluorescence that is attributed to the components with longest conjugation chain decreases or disappears, but new phenolic and/or protein like-fluorophores appear. The interaction with kaolinite and illite which are present in the eluvial soil horizons may be one of the reasons for the transformation of the WSOM quality and properties favorable for their absorption on iron hydroxides in the lower horizons.

Keywords: hydrophilic and hydrophobic compounds, sorption, organo-mineral interactions, goethite, kaolinite, illite

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1085–1093

ФИЗИКА ПОЧВ

УДК 631. 4

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХИМИЧЕСКОЙ СУФФОЗИИ ПРИ ПРОМЫВКАХ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ

© 2020 г. Ф. Д. Микаилсой[a], Е. В. Шеин[b, c, *]

[a]*Сельскохозяйственный факультет университета "Ыгдыр", Ыгдыр, 76000 Турция*

[b]*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы, 119991 Россия*

[c]*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия*

**e-mail: evgeny.shein@gmail.com*

Поступила в редакцию 23.01.2020 г.
После доработки 21.02.2020 г.
Принята к публикации 18.03.2020 г.

Проблема количественной оценки и прогноза суффозионных просадок в засоленных почвах и грунтах актуальна в связи с орошением, промывками засоленных почв, увеличивающимся количеством бытовых и промышленных стоков. На основе решения уравнения конвективной диффузии с учетом динамики растворения солей твердой фазы представлена математическая аналитическая модель, которая может быть использована для решения как прямой задачи (прогноз рассоления почвенной толщи, нахождения промывной нормы и времени промывки заданной толщи до определенного уровня), так и обратной задачи – определение гидродинамической дисперсии и параметра "шаг смешения" ("diffusivity") для прогнозирования химической суффозии. В основе аналитической математической модели лежит понятие среднеинтегрального (то есть средней концентрации почвенного раствора в расчетном почвенном профиле, а не по отдельным дискретным слоям) значения и соответствующего метода определения параметра скорости растворения солей твердой фазы почв и грунтов, благодаря которому появилась возможность количественного аналитического расчета и прогноза суффозионного уплотнения почв, явлений просадки почв и дисперсных грунтов. С учетом протекающих процессов в реальном времени разработана аналитическая процедура нахождения параметра скорости растворения солей твердой фазы почв, аналитические уравнения прогноза интенсивности суффозионных просадок. Предложено аналитически полученное решение конвективно-диффузионного переноса солей, с помощью которого возможен прогноз перераспределения солей во времени при промывке водонасыщенных поверхностно засоленных почв с глубоким залеганием грунтовых вод.

Ключевые слова: засоленные дисперсные грунты и почвы, мелиоративные промывки, выщелачивание, просадки, уравнение конвективной диффузии, среднеинтегральная концентрация солей в слое, уплотнение при промывках

DOI: 10.31857/S0032180X20090105

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы просадок засоленных почв при их мелиоративных промывках, прочности и устойчивости грунтов, залегающих в основаниях промышленных, гражданских и гидротехнических сооружений, являются исключительно актуальными. Это вызвано тем, что содержащиеся в таких грунтах соли растворяются и вымываются при фильтрации в них промывных вод, атмосферных осадков и особенно различных хозяйственных, бытовых и промышленных стоков. В этих условиях здания и сооружения получают дополнительные неравномерные осадки, которые в совокупности с деформацией уплотнения грунтов оснований могут вызвать опасность для устойчивости и прочности эксплуатируемых зданий и сооружений. Растворение и вымывание солей из грунта в первую очередь способствует росту пористости и потере кристаллизационной структурной связности. Происходит при этом увеличение водопроницаемости и ослабление прочности грунта. Засоленные грунты в этих условиях получают дополнительную деформацию – суффозионную осадку или суффозионную консолидацию – процесс уплотнения первоначально насыщенной почвы путем отбора (медленного "выжимания") воды при свободном ее оттоке. Поэтому вопросы прогнозирования суффозионных деформаций оснований сооружений, а также прогноз суфузионных просадок, появления суффозионных ложбин и "блюдец", вызываемых выщелачиванием из почв растворимых солей (в ряде случаев при орошении

вымывается до 70% растворимых солей [15, 25, 35]) приобретают большую научно-практическую важность. Различные аспекты проблемы суффозии освещаются в разнообразных научно исследовательских работах отечественных и зарубежных авторов, которые опубликованы в различных научных трудах, освещаются на международных научных конференциях [6, 7, 12, 14, 16, 18, 20–29, 31–36]. Вместе с тем следует отметить, что имеющиеся методы изучения и прогноза растворения и выноса веществ фильтрационным потоком и вызываемой этими процессами дополнительной осадки сооружений, лишь для определенных условий математически описаны и отражены в математических моделях [6, 10, 14, 16, 18, 19, 30]. Развитие такого рода моделей требует углубленной проработки теории вопроса, параметров модели и разного рода уточнений, чему и посвящена данная статья.

Цель статьи: аналитический анализ и разработка математической модели химической суффозии засоленных почв при промывках.

Задачи: 1 – построить математическую модель изменения порового пространства почв при суффозии при решении прямой и обратной задач; 2 – дать математическое обоснование использования средних величин солесодержания в конкретной почвенной почвеной толще; 3 – дать аналитический анализ параметра конвективной диффузии солей в почве “шаг смешения”; 4 – предложить прогностическую математическую модель перераспределения солей при промывке водонасыщенных поверхностно засоленных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе натурных наблюдений и лабораторных опытов установлено [6, 14], что в связных и не связных грунтах в процессе растворения и вымывания солей всегда происходит суффозионная осадка почв и грунтов. Влияния выноса фильтрационным потоком солей приводит к увеличению пористости почв и грунтов, при этом под действием нормальной уплотняющей нагрузки одновременно происходит ее уменьшение.

Таким образом, в водонасыщенных засоленных почвогрунтах в общем случае может происходить три различных процесса – *фильтрационная консолидация*, *суффозионная осадка* и *ползучесть скелета грунта* (вторичная консолидация). Анализ и прогноз этих процессов под различными природными и антропогенными нагрузками представляет большой научный и практический интерес.

Следуя Веригину [6], пористость засоленного почвогрунта в процессе выщелачивания солей можно представить в виде:

$$m(t) = m_0 + P_0 - P(t), \qquad (1)$$

где m_0 – начальные (при $t = 0$) значения пористости почв, P_0 – удельный объем растворимых солей в кристаллах (в твердой фазе почвы), $P(t)$ – изменение удельного объема растворимых солей в кристаллах или твердой фазе в процессе выщелачивания (см^3 солей/см^3 почвы).

Согласно (0.1) имеем:

при $t = 0$: $P(0) = P_0$ и поэтому $m(t) = m(0) = m_0 + P_0 - P_0 = m_0$;

при $t \to \infty$: $P(\infty) = 0$ и поэтому $m(t) = m(\infty) = m_0 + P_0 = m_{\max}$.

Коэффициент пористости (e_0) засоленной почвы в естественном состоянии определяется известным соотношением:

$$e_0 = \frac{m_0}{1 - m_0}. \qquad (2)$$

В процессе выщелачивания солей будем иметь:

$$e(t) = \frac{m(t)}{1 - m(t)} = \frac{m_0 + P_0 - P(t)}{1 - \left[m_0 + P_0 - P(t)\right]}. \qquad (3)$$

Относительная суффозионная осадка почвы $\delta_c(t)$ будет определяется выражением [14]:

$$\delta_c(t) = \frac{e(t) - e_0}{1 + e_0}. \qquad (4)$$

Учитывая (1)–(3) в (4) имеем:

$$\delta_c(t) = \frac{m(t) - m_0}{1 - m(t)} = \frac{P_0 - P(t)}{1 - \left[m_0 + P_0 - P(t)\right]}. \qquad (5)$$

Согласно принятым начальным (при $t = 0$) условиям и полученной зависимости (5), имеем при $t = 0$: $P(0) = P_0$ и $\delta_c(0) = 0$, а в период стабилизации суффозионной осадки, то есть при $t = T$ (так как $P(T) = 0$) согласно (5), получим

$$\delta_c(T) = \delta_c^{\max} = \frac{P_0}{1 - (m_0 + P_0)}.$$

Если обратить внимание на знаменатель выражения (5), то легко можно заметить, что величина $P(t)$ в течение всего периода выщелачивания солей существенно меньше, чем сумма $(m_0 + P_0)$. Поэтому в знаменателе этого выражения можно пренебречь $P(t)$. Такое допущение в инженерных расчетах всегда приводит к запасу устойчивости засоленных почв и грунтов [14].

С учетом отмеченного допущения, для относительной суффозионной осадки $\delta_c(t)$ будем иметь:

$$\delta_c(t) = \frac{P_0 - P(t)}{1 - (m_0 + P_0)}. \qquad (6)$$

Функция $P(t)$ при поверхностном (пленочном) засолении почвогрунта, связана с концентрацией фильтрующейся воды $C(x,t)$ зависимостью [5–7, 15]:

$$\rho\frac{\partial P}{\partial t} = -\gamma[C_{\text{Н}} - C(x,t)] \quad \text{или}$$
$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\gamma[C_{\text{Н}} - C(x,t)], \tag{7}$$

где ρ – плотность солей (г/см^3); $N = \rho P$ – концентрация солей в кристаллах или твердой фазы почвы (г/см^3 или в смоль(экв)/кг почвы); $C_{\text{Н}}$ – концентрация предельного насыщения (г/см^3); $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 v^r$ – коэффициент скорости растворения солей, зависящий от физико-механических свойств почвогрунтов и скорости переноса влаги v (1/сут); γ_1 и γ_2 – постоянные, зависящие от физико-химических свойств почвы, вида солей и типа засоленности; $C(x,t)$ – концентрация солей в растворе (г/см^3) в момент времени t (сут) в точке x (м).

При $C < C_{\text{Н}}$ соли растворяются ($\partial N/\partial t < 0, \gamma > 0$), а при $C > C_{\text{Н}}$ выпадают в осадок (кристаллизация) из перенасыщенного почвенного раствора ($\partial N/\partial t < 0, \gamma < 0$) [6, 7, 10, 15].

Теоретическое рассмотрение вопроса растворения солей в пористой среде в условиях ламинарного потока показало [7], что $r = 0.5$. Этот случай характерен в период промывки почвы. В этом случае для коэффициента γ имеем $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 v^{0.5} = \gamma_1 + \gamma_2\sqrt{v}$.

Интегрируя (7) по времени для каждой глубины, получим:

$$P(x,t) = P_0 - \frac{\gamma}{\rho}\int_0^t [C_{\text{Н}} - C(x,t)]\,dt \quad \text{или} \tag{8}$$

$$N(x,t) = N_0 - \gamma\int_0^t [C_{\text{Н}} - C(x,t)]\,dt. \tag{9}$$

Подставляя (8) в (6), для прогноза изменения суффозионной осадки в точке x поверхностно засоленных почв во времени получим формулу:

$$\delta_c(x,T) = \frac{\gamma}{\rho[1-(m_0+P_0)]}\int_0^T [C_{\text{Н}} - C(x,t)]\,dt. \tag{10}$$

Изменение суффозионной осадки в слое $[0, L]$ поверхностно засоленных почв во времени получим формулу:

$$\Delta_c(T) = \frac{1}{L}\int_0^L \delta_c(x,T)dx = \frac{1}{L}\frac{\gamma}{\rho[1-(m_0+P_0)]}\times$$
$$\times\int_0^L\left\{\int_0^T [C_{\text{Н}} - C(x,t)]\,dt\right\}dx = \frac{\gamma}{\rho[1-(m_0+P_0)]}\times \tag{11}$$
$$\times\int_0^T [C_{\text{Н}} - S(t)]\,dt.$$

В полученной формуле (11) функция $C(x,t)$ определяется из решения соответствующей прямой задачи растворения и вымывания солей при фильтрации воды в поверхностно засоленных почв.

Определение функции $C(x,t)$ путем решения системы дифференциальных уравнений при известных краевых (начальных и граничных) условиях является предметом решения прямой задачи солепереноса. В нашем случае, $C(x,t)$ – концентрация солей в растворе в момент времени t (сут) в точке x (м) в почвенном толще. Попытаемся определить указанную функцию $C(x,t)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Решение прямой задачи. Прямой задачей в решении уравнения переноса (например, описывающая тепло-, соле-, влаго- и т.д.) является получение аналитического выражения, с помощью которого можно вычислить в точке x и в момент времени t искомую переменную состояния (например, значения температуры, концентрации солей, содержания влаги).

Согласно существующей модели физико-химической гидродинамики, процесс растворения и выщелачивания солей при одномерной фильтрации, вызывающей суффозионную деформацию поверхностно засоленных почвогрунтов, описывается уравнением [1, 5–7, 10, 12, 13, 15–17, 30–36]:

$$m\frac{\partial C}{\partial t} + \rho\frac{\partial P}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x},$$
$$\rho\frac{\partial P}{\partial t} = -\gamma(C_{\text{Н}} - C). \tag{12}$$

Здесь, $D = D_M + \lambda|v|$ – коэффициент конвективной диффузии, где D_M – коэффициент молекулярной диффузии (м^2/сут); λ – параметр дисперсии, “шаг смешения” (м); v – скорость фильтрации (м/сут).

Как отмечается в [7, 16], в период промывки или промывном режиме при орошении (то есть в случае высоких скоростей фильтрации в вычислениях можно пренебречь D_M и γ_1) практическая величина D и γ определяются скоростью фильтрации и, следовательно, можно полагать, что $D = \lambda|v|$ и $\gamma = \gamma_2\sqrt{v}$ [7, 35]. Только при очень малых скоростях фильтрации параметры D_M и γ_1 оказывают заметное влияние на миграции солей.

Рассмотрим процесс переноса солей при: $v \neq 0$. Тогда задача прогноза перераспределения солей при промывке водонасыщенных поверхностно засоленных почвогрунтов с глубоким залеганием грунтовых вод сведется к следующей:

$$m\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} + \gamma_2\sqrt{v}(C_{\text{Н}} - C), \tag{13}$$
$$\{0 < t < \infty;\ \ 0 < x < \infty\}$$

$$\text{при } t = 0\text{: } C(x,t) = C_0(x),$$
$$\text{при } x = 0\text{: } D\frac{\partial C}{\partial x} = v\left[C(0,t) - C_{\text{П}}\right], \qquad (14)$$
$$\text{при } x \to \infty\text{: } \frac{\partial C}{\partial x} = 0.$$

Здесь $C_0(x)$ и $C_{\text{П}}$ – соответственно концентрация солей в почвенном профиле в начальной момент времени $t = 0$ и в промывной или поливной воде.

Можно показать, что решение задачи (13)–(14) имеет вид [12, 30]:

$$\theta(x,t) = \left(\frac{\omega_-}{b+1} - \frac{\omega_+}{b-1} + \frac{2\chi}{b^2-1}\right) - \\ - \frac{1}{2}\exp\left[-a^2\left(b^2-1\right)\right]\int_0^\infty \theta_0(y)\left[\frac{\partial}{\partial y}M_1(x,y)\right]dy, \qquad (15)$$

где

$$\omega_\pm = \exp\left[2a^2 z(1 \pm b)\right]\operatorname{erfc}\left[a(z \pm b)\right],$$
$$\chi = \exp\left[4a^2 z - a^2\left(b^2-1\right)\right]\operatorname{erfc}\left[a(z+1)\right],$$
$$\theta(x,t) = \frac{C_{\text{Н}} - C(x,t)}{C_{\text{Н}} - C_{\text{П}}}, \quad \theta_0(x) = \frac{C_{\text{Н}} - C_0(x)}{C_{\text{Н}} - C_{\text{П}}},$$
$$M_{n+1}(x,y) = i^n\operatorname{erfc}\left(a + \frac{y-x}{d}\right) + \\ + \left[i^n\operatorname{erfc}\left(a + \frac{y+x}{d}\right) - 4ai^{n+1}\operatorname{erfc}\left(a + \frac{y+x}{d}\right)\right]e^{\frac{4ax}{d}},$$
$$z = \frac{x}{\tau}, \quad \tau = \frac{vt}{m}, \quad a = \sqrt{\frac{\tau}{4\lambda}}, \quad b = \sqrt{1+\Pi}, \qquad (16)$$
$$\Pi = \frac{4\lambda\gamma_2}{\sqrt{\nu}}, \quad d = \sqrt{4\lambda\tau}, \quad \lambda = D/v,$$
$$i^{n+1}\operatorname{erfc}(x) = \int_0^\infty i^n\operatorname{erfc}(z)dz, \quad (n = 0,1,2,\ldots),$$
$$i^0\operatorname{erfc}(x) = \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty \exp\left(-z^2\right)dz.$$

Для частных случаев зависимости начального засоления $C_0(x)$ от глубины x, следствия этого решения опубликованы в [17]. Рассмотрим следующие часто встречающие эпюры начального засоления, а именно:

а) допустим, что имеет место $C_0(x) \equiv C_{\text{Н}} = \text{const}$, то есть начальное концентрация солей порового раствора на сильнозасоленных почвогрунтах близка к концентрации насыщения, тогда из решения (15) имеем:

$$\theta_{\text{Н}}(x,t) = \frac{\omega_-}{b+1} - \frac{\omega_+}{b-1} + \frac{2\chi}{b^2-1}. \qquad (17)$$

б) допустим, что распределение $C_0(x)$ до глубины L равномерное, то есть $C_0(x) \equiv C_0 = \text{const}$. В этом случае решение (15) имеет упрощенный вид:

$$\theta(x,t) = \theta_{\text{Н}}(x,t) + \frac{1}{2}\theta_0 M_1(x,0)\exp\left[-a^2\left(b^2-1\right)\right], \\ \theta_0 = \frac{C_{\text{Н}} - C_0}{C_{\text{Н}} - C_{\text{П}}} \qquad (18)$$

или

$$C_{\text{Н}} - C(x,t) = (C_{\text{Н}} - C_{\text{П}})\left(\frac{\omega_-}{b+1} - \frac{\omega_+}{b-1} + \frac{2\chi}{b^2-1}\right) + \\ + \frac{1}{2}(C_{\text{Н}} - C_0)M_1(x,0)\exp\left[-a^2\left(b^2-1\right)\right],$$

где

$$M_1(x,0) = \operatorname{erfc}\left(a - \frac{x}{d}\right) + \\ + \left[\operatorname{erfc}\left(a + \frac{x}{d}\right) - 4ai\operatorname{erfc}\left(a + \frac{x}{d}\right)\right]\exp\left(\frac{4ax}{d}\right). \qquad (19)$$

Подставляя (15), (17) и (18) в (10) и (11), можно вычислить изменения суффозионной осадки в точке x поверхностно засоленных почв во времени, а также в слое $[0, L]$ чего и требовала постановка данной задачи.

2. Решение обратной задачи. В случае обратной задачи требуется определение параметров модели переноса по данным специальных полевых и лабораторных экспериментов с использованием аналитического решения краевой задачи модели солепереноса при точном и строгом задании краевых условий [4, 8]. В данном случае задача определения параметров уравнения (12) сводится к нахождению λ, γ_1 и γ_2. Изложим методику определения каждого параметра в отдельности.

Как отмечается в работах [4, 8, 11–13, 30], для решения обратных задач моделирования переноса солей в почвогрунтах необходимо получать аналитические зависимости, которые должны характеризовать средние показатели засоления в расчетном слое. После этого с помощью полученных зависимостей нужно определить осредненные (по всему расчетному профилю, а не по дискретным почвенным слоям) параметры D и γ, поскольку в уравнении (12) предполагается неизменность параметров солепереноса по координате x. В противном случае найденные в разных точках x коэффициенты D и γ могут быть различными, что противоречит предположениям, заложенным в уравнении (12).

Приведенные выше зависимости (15), (17), (18) позволяют вычислить минерализацию поровых растворов в определенной момент времени в любой точке расчетного слоя почвогрунтов. Не менее важным является изучение средней концентрации почвенного раствора расчетного слоя после промывки и орошении. Прежде всего это связано с тем, что, во-первых, для проведения мелиоративных меропри-

тий необходимо знать – водно-солевой режим почв до определенных глубин [9, 30], а, во-вторых, исходные данные по засолению и рассолению, получаемые в натурных условиях при почвеных изысканиях и характеризующие содержание солей не в конкретной точке $x = x_0$, а в некотором слое ($0 < x < L$), что связано с методикой отбора почвенных проб на анализы. Математическое обоснование этих методов [4, 8, 11] в основном заключается в том, что средние значения распределения солей в почвенной толще определяются с большой точностью и являются более информативными, чем содержание солей в какой-либо точке. Для стационарного режима этот вопрос исследован С.Ф. Аверьяновым [1] и развит в работах [2, 3]. Позднее для нестационарного режима эта проблема была исследованы в работах [4, 7, 8, 11–13, 30, 32], для моделей солепереноса в одномерном потоке, не учитывающим существование застойных зон.

Обычно при описании процесса конвективной диффузии используют понятие "выходной кривой" [8, 11–13, 19, 29–36], как зависимости относительной концентрации раствора на нижней границе определенного слоя почвы от времени. Однако, наряду с выражением для выходной кривой, целесообразно иметь расчетные формулы, определяющие среднюю концентрацию в слое $0 < x < L$.

Обозначим через $S(L, t)$ среднюю концентрацию порового раствора в слое $[0, L]$, то есть $S_t = S(L,t) = L^{-1}\int_0^L C(x,t)dx$.

Интегрируя выражения (18) в пределах от 0 до L получим:

$$n(\xi,\eta,b) = \frac{C_\text{Н} - S_t}{C_\text{Н} - C_\text{П}} = \frac{1}{p}\left[e^{-p} f_1(\xi,\eta,1) - f_1(\xi,\eta,b)\right] + \frac{C_\text{Н} - C_0}{C_\text{Н} - C_\text{П}} f_2(\xi,\eta)e^{-p}, \quad (20)$$

где

$$f_1(\xi,\eta,b) = \frac{\xi}{2}\exp[2\eta(1+b)]\operatorname{erfc}\left[(1+b\xi)\sqrt{\frac{\eta}{\xi}}\right] + \exp[2\eta(1-b)]\operatorname{erfc}\left[(1-b\xi)\sqrt{\frac{\eta}{\xi}}\right] - 2\Bigg\},$$

$$f_2(\xi,\eta) = \frac{1}{2}\Bigg\{(\xi+1)\exp(4\eta)\operatorname{erfc}\left[(\xi+1)\sqrt{\frac{\eta}{\xi}}\right] - (\xi-1)\operatorname{erfc}\left[(\xi-1)\sqrt{\frac{\eta}{\xi}}\right]\Bigg\}, \quad \xi = \frac{\tau}{L} = \frac{vt}{mL},$$

$$\eta = \frac{L}{4\lambda}, \quad p = \xi\eta(b^2-1) = \left(\frac{\gamma_2\sqrt{v}}{m}\right)t,$$

$$b = \sqrt{1+\Pi}, \quad \Pi = \frac{4\lambda\gamma_2}{\sqrt{v}}.$$

Если почвенный слой насыщен легкорастворимыми солями, находящимися в основном в растворе (то есть при $\gamma_2 \to 0$ имеем: $b \to 1$ и $p \to 0$), то из формулы (20) имеем:

$$\frac{C_\text{Н} - S_t}{C_\text{Н} - C_\text{П}} = [1 - f_2(\xi,\eta)] + \left(\frac{C_\text{Н} - S_0}{C_\text{Н} - C_\text{П}}\right) f_2(\xi,\eta) \quad \text{или} \quad \bar{n} = \frac{S_t - C_\text{П}}{S_0 - C_\text{П}} = f_2(\xi,\eta). \quad (21)$$

Значения функции $f_2(\xi, \eta)$ приведены на графике в работе [4] и табулированы в работах [8, 11, 12], которые позволяют решать как прямую задачу, – прогноз рассоления толщи, нахождение промывной нормы и времени промывки заданной толщи до определенного уровня, так и обратную задачу, – определение параметра дисперсии λ (или D).

После нахождения λ, по данным промывки легкорастворимых солей по формуле (21), можно найти параметр γ_2 (для средне- и легкорастворимых компонентов вымываемых солей) из зависимости (21). Наиболее универсальным в этом случае будет метод подбора коэффициента γ_2 из условия совпадения соответствующих кривых прогнозных зависимостей с фактической.

Если начальная концентрация порового раствора на сильно засоленных почвах близка к концентрации насыщении ($C_0(x) \cong C_\text{Н}$), то расчетная формула (21) намного упрощается и примет следующий вид:

$$\frac{C_\text{Н} - S_t}{C_\text{Н} - C_\text{П}} = \frac{1}{p}\left[e^{-p} f_1(\xi,\eta,1) - f_2(\xi,\eta,b)\right]. \quad (22)$$

Следовательно, для заранее известных значений параметров ξ^*, η^* и исходных данных $C_\text{П}$, C_0, $C_\text{Н}$, а также допустимого среднеинтегрального солесодержания S_t с помощью ЭВМ находятся значения функции (21) или (22) при различных значениях величин параметра b до тех пор пока не совпала $n_\text{экс}$ с вычисленными значениям $n_\text{выч}$, то есть: $n_\text{выч} = n(\xi = \xi^*, \eta = \eta^*, b = b_*)$.

Из соотношения $b_* = \sqrt{1 + 4\lambda\gamma_2/\sqrt{v}}$ находим величины искомого параметра γ_2, который равен

$$\gamma_2 = \frac{1}{4\lambda}\left[\left(b_*^2 - 1\right)\sqrt{v}\right], \quad (23)$$

где b_* – то значения параметра b, при котором $|n_\text{экс} - n_\text{выч}| \le 10^{-4}$.

Для иллюстрации предложенной методики расчета гидрохимических параметров λ и γ_2 приведем пример: в качестве исходной информации для расчета λ и γ_2 взяты данные из табл. 1. Расчет λ проводили по данным вымывания хлоридов по

Таблица 1. Значения шага смешения (λ, м) и коэффициента скорости растворения (γ_2, 1/сут) по содержаниям ионов Cl^- и SO_4^{2-} до и после промывки ($C_П = 0.5$ г/л, $C_Н = 80.0$ г/л)

Пористость, m, %	Промывные нормы, N_n, м	Время промывки, t, сут	Содержание ионов в слое 0–100 см				Шаг смешения, λ, м	Коэффициент скорости растворения SO_4^{2-}, γ_2, 1/сут
			до промывки, C_0, г/л		после промывки, S_t, г/л			
			Cl^-	SO_4^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}		
0.40	0.60	30	20	45	3.0	22	0.258	0.06122
0.42	0.60	25	24	52	3.5	30	0.227	0.11448
0.45	0.60	20	36	65	5.0	35	0.186	0.17075

формуле (21), и он привел к следующим значениям: для

$$m = 0.40\text{: } \lambda = 0.2584 \text{ м}, \quad m = 0.42\text{: } \lambda = 0.2273 \text{ м},$$
$$m = 0.45\text{: } \lambda = 0.1862 \text{ м}.$$

Используя это значения λ и для сульфатов, путем подбора рассчитываем коэффициент скорости растворения γ_2 по формуле (21).

Здесь C_0 и $C_П$ – соответственно концентрация солей в почвенном профиле в начальной момент времени $t = 0$ и в промывной (поливной) воде.

Например, для $m = 0.40$; $N_n = 0.6$ м; $L = 1.0$ м; $\lambda = 0.2584$м и по исходным данным определяем:

$$\xi = \frac{N_n}{mL} = \frac{0.6}{0.4 \times 1.0} = 1.5;$$
$$\eta = \frac{L}{4\lambda} = \frac{1.0 \text{ м}}{4 \times 0.2584 \text{ м}} = \frac{1}{1.0336} = 0.96749;$$
$$\theta_0 = \frac{C_Н - C_0}{C_Н - C_П} = \frac{80 - 45}{80 - 0.5} = \frac{35}{79.5} = 0.44025,$$
$$n_{экс} = \frac{C_Н - S_t}{C_Н - C_П} = \frac{80 - 22}{80 - 0.5} = \frac{58}{79.5} = 0.72956$$

и находим значение величины $b_* = 1.2031$, при котором $n_{выч} = 0.72964$. Подставляя эти данные в формулу (23) находим значение γ_2:

$$\gamma_2 = \left(b_*^2 - 1\right)\sqrt{v}\Big/4\lambda = (1.44745 - 1.0) \times$$
$$\times\, 0.141421/4 \times 0.2584 = 0.06122 \text{ [1/сут]}.$$

При отсутствии слоя промывной воды на поверхности поля (после прекращения водоподачи, то есть предполагается, что на скорость растворения солей твердой фазы в жидкости конвективно-диффузионные и фильтрационные процессы не влияют), область промачивания делится на две зоны – зону увлажнения: $0 \le x \le L$, где фильтрация отсутствует ($v \approx 0$) и зону фильтрации: $L \le x \le \ell$.

В зоне увлажнения $0 \le x \le L$ процесс перераспределения солей описывается следующим образом ($\gamma = \gamma_1 + \gamma_2\sqrt{v} \approx \gamma_1 + \gamma_2\sqrt{0} \approx \gamma_1$):

$$m\frac{\partial C}{\partial t} = D_м\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \gamma_1(C_Н - C), \tag{24}$$

$$\left.\begin{array}{r} C(x, t = t_s) = \varphi_0(x, t_s) \\ \text{при } x = 0\text{: } \dfrac{\partial C}{\partial x} = 0,\ x = L\text{: } \dfrac{\partial C}{\partial x} = 0 \end{array}\right\}, \tag{25}$$

где $\varphi_0(x, t_s)$ – концентрация почвенного раствора, взятая из соответствующего решения уравнения (12), при $t = t_s$, то есть: $\varphi_0(x, t_s) = C(x, t = t_s)$, t_s – длительность промывки.

Решения задачи (24)–(25) имеет вид:

$$\theta(x,t) = \frac{C_Н - C(x,t)}{C_Н - S(t_s)} = \exp\left[-q(t - t_s)\right] + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{\pi n}{L}x\right)\exp\left[-(t - t_s)p_n\right], \tag{26}$$

где

$$\theta_0(x) = \theta(x, t = t_s),\ q = \frac{\gamma_1}{m},\ r = \sqrt{\frac{D_M}{m}},$$
$$p_n = b + \left(\frac{\pi r n}{L}\right)^2,\ a_n = \frac{2}{L}\int_0^L \theta_0(x)\cos\left(\frac{\pi n}{L}x\right)dx,$$
$$n \in \mathbb{N}^+,$$

$S(t_s) = L^{-1}\int_0^L \varphi_0(x, t_s)dx$ – среднеинтегральное начальное солесодержание в слое $[0, L]$ в момент времени $t = t_s$.

Интегрируя выражение (26) в пределах от 0 до L, получим

$$\Theta_{ср}(t) = \frac{C_Н - S(t)}{C_Н - S(t_s)} = \exp\left[-q(t - t_s)\right], \\ \text{здесь } S(t) = L^{-1}\int_0^L C(x,t)dx. \tag{27}$$

Решая (27) относительно γ_1, получим

$$\gamma_1 = \left(\frac{m}{t - t_s}\right)\ln\left[\frac{C_Н - S(t_s)}{C_Н - S(t)}\right] \tag{28}$$

с помощью которого, для заранее известных значений t, t_s, m, $C_{\text{Н}}$, $S(t)$ и $S(t_s)$ можно легко определить искомый параметр γ_1.

3. Прогноз суффозионной осадки поверхностно засоленных почв и грунтов. Используя приведенные выше решения уравнения (12), можно найти расчетные формулы, позволяющие в зависимости от характеристики почвогрунта, солей и скорости фильтрации прогнозировать суффозионную осадку поверхностно засоленных почв во времени при одномерной неустановившейся фильтрации.

Подставляя (18) в (10) и (11), можно вычислить изменения суффозионной осадки в точке x поверхностно засоленных почв во времени, а также в слое $[0, L]$. Например:

$$\delta_c(x,t) = \frac{\gamma}{\rho[1-(m_0+P_0)]}\int_0^t [C_{\text{Н}} - C(x,t)]\,dt = \frac{\gamma\int_0^t \left[(C_{\text{Н}} - C_{\text{П}})\left(\frac{\omega_-}{b+1} - \frac{\omega_+}{b-1} + \frac{2\chi}{b^2-1}\right) + \frac{1}{2}(C_H - C_0)M_1(x,0)e^{-\left(\frac{\gamma_2}{m}\right)t}\right]dt}{\rho[1-(m_0+P_0)]} = \frac{\gamma\int_0^t \left[(C_{\text{Н}} - C_{\text{П}})\left(\frac{\omega_-}{b+1} - \frac{\omega_+}{b-1} + \frac{2\chi}{b^2-1}\right) + \frac{1}{2}(C_{\text{Н}} - C_0)M_1(x,0)e^{-\left(\frac{\gamma_2}{m}\right)t}\right]dt}{\rho[1-(m_0+P_0)]}, \quad (29)$$

где $M_1(x,0) = \operatorname{erfc}\left(a - \frac{x}{d}\right) + \left[\operatorname{erfc}\left(a + \frac{x}{d}\right) - 4ai\operatorname{erfc}\left(a + \frac{x}{d}\right)\right]e^{\frac{4ax}{d}}$.

Изменение суффозионной осадки в слое $[0, L]$ поверхностно засоленных почв во времени получим формулу:

$$\Delta_c(t) = \frac{1}{L}\int_0^L \delta_c(x,T)dx = \frac{\gamma\int_0^t \left\{\frac{1}{L}\int_0^L [C_{\text{Н}} - C(x,t)]\,dx\right\}dt}{\rho[1-(m_0+P_0)]} = \frac{\gamma\int_0^t [C_{\text{Н}} - S(t)]\,dt}{\rho[1-(m_0+P_0)]}. \quad (30)$$

Если $C_0(x) \cong C_{\text{Н}}$, то используя формулу (22) получаем:

$$\frac{C_{\text{Н}} - S_t}{C_{\text{Н}} - C_{\text{П}}} = \frac{1}{p}\left[e^{-p} f_1(\xi,\eta,1) - f_2(\xi,\eta,b)\right],$$

а для формулы (30) имеем:

$$\Delta_c(t) = \frac{1}{L}\int_0^L \delta_c(x,t)dx = \frac{\gamma(C_{\text{Н}} - C_{\text{П}})}{p\rho[1-(m_0+P_0)]} \times \int_0^t \left[e^{-p} f_1(\xi,\eta,1) - f_2(\xi,\eta,b)\right]dt. \quad (31)$$

Дальнейшее развитие моделей суффозионных процессов в почвах с использование предложенных выше подходов и расчетов будет перспективным, если будут предложена конкретная верификация параметров предложенного математического подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе решения уравнения конвективной диффузии (12) с учетом растворения солей твердой фазы,

– предложен среднеинтегральный метод определения параметра скорости растворения солей твердой фазы почвогрунта, то есть γ ($\gamma = \gamma_1 + \gamma_2\sqrt{v}$);

– получены аналитические формулы (29)–(30), с помощью которых можно прогнозировать интенсивность суффозионных просадок, то есть: $\delta_c(t,x)$ и $\Delta_c(t)$;

– предложена аналитическая математическая модель суффозионных просадок поверхностно засоленной водонасыщенной почвы при промывках и свободном дренаже на нижней границе профиля (автоморфные условия).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа осуществлена при частичной финансовой поддержке фонда TÜBİTAK (TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU BAŞKANLIĞI) (Научно-техническим исследовательским советом Турции (TUBITAK)).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов С.Ф.* Борьба с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1978. 288 с.
2. *Айдаров И.П., Корольков А.И., Хачатурьян В.Х.* Расчет водно-солевого режима почв // Почвоведение. 1988. № 5. С. 62–69.
3. *Богомолов Ю.Г., Жабин В.Ф., Хачатурьян В.Х.* Изменение гидрогеологических условий под влиянием мелиорации. М.: Наука, 1979. 164 с.
4. *Ваксман Э.Г., Мироненко Е.В., Пачепский Я.А.* Метод определения параметра солепереноса при промывках // Гидротехника и мелиорация. 1981. № 11. С. 83–84.
5. *Веригин Н.Н.* Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелиораци и гидротехники // Изв. АН СССР. ОТН. 1953. № 7. С. 1369–1382.
6. *Веригин Н.Н.* О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах // Растворение и выщелачивание горных пород. М.: Стройиздат, 1957. С. 84–113.
7. *Веригин Н.Н., Васильев С.В., Куранов Н.П., Саркисян В.С., Шульгин Д.Ф.* Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод. М.: Колос, 1979. 336 с.
8. *Веригин Н.Н., Азизов К.З., Микайылов Ф.Д.* О влияние граничных условий при моделировании переноса солей в почвогрунтах при промывке // Почвоведение. 1986. № 6. С. 67–73.
9. *Волобуев В.Р.* Расчет промывки засоленных почв. М.: Колос, 1975. 65 с.
10. *Горев Л.Н., Пелешенко В.И.* Мелиоративная гидрохимия. К.: Вища школа. Головное изд-во, 1984. 256 с.
11. *Микайылов Ф.Д.* Вопросы моделирования переноса солей в почвогрунтах при промывке и в условиях режима орошения. Автореф. дис. ... канд. н. Баку, 1989. 24 с.
12. *Микайылов Ф.Д.* Определение параметров модели солепереноса при промывках водонасыщенных поверхностно-засоленных почвогрунтов // Почвоведение. 2007. № 5. С. 599–609. https://doi.org/10.1134/S1064229307050092
13. *Микайылов Ф.Д., Азизов К.З.* Определение гидрохимического параметра дисперсии переноса солей при промывках засоленных водонасыщенных почвогрунтов // Почвоведение. 1985. № 5. С. 84–90.
14. *Мустафаев А.А.* Деформация засоленных грунтов в основаниях сооружений. М.: Стройиздат, 1985. 280 с.
15. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917–1967) / Отв. ред. Полубаринова-Кочина П.Я. М.: Наука, 1969. С. 314–336.
16. *Рекс Л.М.* Перераспределение солей в почвогрунтовом слое // Журн. ПМТФ. 1967. № 6. С. 35–39.
17. *Файбишенко Б.А.* Водно-солевой режим грунтов при орошении. М.: Агропромиздат, 1986. 304 с.
18. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
19. *Шеин Е.В., Рыжова И.М.* Математическое моделирование в почвоведении. Учебник. М.: “ИП Маракушев А. Б.”, 2016. 377 с.
20. *Boneli S., Jommi C., Sterpi D.* Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees // Proceedings of EWG-IE 26th Annual Meeting, 2018, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Cham. 2018. V. 17. P. 168–179 https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9_16
21. *Bykov A.A., Kuzichkin O.R.* Regression prediction algorithm of suffusion processes development during geoelectric monitoring // Advances in Environmental Biology. 2014. V. 8(5). P. 1404–1408.
22. *Chetti A., Benamar A., Hazzab A.* Modeling of particle migration in porous media: application to soil suffusion // Transport in Porous Media. 2016. V. 113(3). P. 591–606. https://doi.org/10.1007/s11242-016-0714-y
23. *Golay F., Bonelli S.* Numerical modeling of suffusion as an interfacial erosion process // European J. Environmental and Civil Engineering. 2011. V. 15(8). P. 1225–1241. https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9714850
24. *Herus V., Martyniuk P., Stepanchenko O., Tsvetkova T.* Numerical modeling of a system of interrelated consolidation and mechanical-chemical suffusion processes in heterogenic porous media // International J. Pure and Applied Mathematics. 2017. V. 116(4). P. 1043–1056. https://doi.org/10.12732/ijpam.v116i4.19
25. *Hosseininia M., Hassanpour F., Naghavi H. et al.* Leaching of Saline Calcareous Soil under Laboratory Conditions // Eurasian Soil Sc. 2019. V. 52. P. 1214–1222. https://doi.org/10.1134/S106422931910003X
26. *Hu Z., Zhang Y.* Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD–DEM study // Acta Geotechnica. 2019. V. 14. P. 795–814. https://doi.org/10.1007/s11440-019-00789-8
27. *Litvintsev V.S., Alekseev V.S., Pulyaevsky A.M.* Suffusion processes in the technology of formation of enriched zones inside gold placer mining waste dumps // J. Mining Science. 2012. V. 48(5). P. 914–919. https://doi.org/10.1134/S1062739148050164
28. *Marot D., Benamar A.* Suffusion, transport and filtration of fine particles in granular soil // Erosion of Geomaterials, Edited by Stéphane Boneli, Publisher: Wiley-ISTE. 2012. P. 39–79. https://doi.org/10.1002/9781118561737.ch2
29. *Milanovic P., Maksimovich N., Meshcheriakova O.* Dams and Reservoirs in Evaporites // Series Title: Advances in Karst Science, Springer Nature Switzerland AG. 2019. 170 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18521-3
30. *Mikayilov F.D.* Dissolution and Leaching of Salts from Waterlogged Soils // Articles Presented as Reports at the 6th International Symposium, Bourgas, Bulgaria. 2004. (Bourgas, 2004). V. 1. P. 20–38.

31. *Mikailsoy F.D., Pachepsky Y.A.* Average concentration of soluble salts in leached soils inferred from the convective-dispersive equation // Irrigation Science. 2010. V. 28(5). P. 431–434. https://doi.org/10.1007/s00271-009-0203-y

32. *Poberezhnyi L.Ya., Poberezhna L.Ya., Maruschak P.O., Panin S.V.* Assessment of potential environmental risks from saline soils subsidence // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 50. 012046. https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012046

33. *Ranjbar A., Ehteshami M.* Development of an uncertainty based model to predict land subsidence caused by groundwater extraction (Case Study: Tehran Basin) // Geotech Geol Eng. 2019. V. 37. P. 3205–3219. https://doi.org/10.1007/s10706-019-00837-w

34. *Reynolds W.D.* An analytic description of field capacity and its application in crop production // Geoderma. 2018. V. 326. P. 56–67. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.007

35. *Shein E.V., Umarova A.B.* Changes in physical properties of soils and soil properties as derived from the data of a long-term experiment (1961–2002) // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. Suppl. 1. P. 100–106.

36. *Ward A.G., Trimble S.W.* Environmental hydrology. 2nd Ed. CRC Pres, New York, NY, 2003.

Analytical Mathematical Model of Chemical Suffosion While Washing Saline Soils

F. D. Mikailsoy[1] and E. V. Shein[2, 3, *]

[1]Iğdır University, Agricultural Faculty, Iğdır, 76000 Turkey
[2]Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia
[3]Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia
**e-mail: evgeny.shein@gmail.com*

The problem of quantitative assessment and prediction of suffosion-induced subsidence in saline soils and sediments is relevant for irrigated soils, washing of saline soils, and increasing domestic and industrial effluents volumes. Based on the solution of the convective diffusion equation, and taking into account the dissolution of salts of the solid phase, a presented mathematical analytical model can be used to solve both the direct problem (predicting desalinization of the soil profile, finding the soil washing rate and time for a given thickness and certain level), and the inverse one: determining the hydrodynamic dispersion parameter and the "diffusivity". The analytical mathematical model is based on the concept of the average integral (i.e., the average concentration of the soil solution in the calculated soil profile, but not on separate discrete layers) value and the corresponding method for determining the dissolution rate parameter of the salts of the soil and sediment solids, which made it possible to quantitatively calculate and predict the suffosion compaction of soils and subsidence of soils and unconsolidated sediments. Taking into account the ongoing processes in real time, an analytical procedure was developed for finding the dissolution rate coefficient of salts. This analytically obtained solution of the convective-diffusive salt transfer can be applied to predict the redistribution of salts over time in water-saturated soil profile with surface salinization and deep ground water table.

Keywords: saline dispersed grounds and soils, reclamation washing, subsidence, convective diffusion equation, the average integral salt concentration in the layer, compaction during washing

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1094–1099

БИОЛОГИЯ ПОЧВ

УДК 631.461

СООТНОШЕНИЕ ГРИБОВ И БАКТЕРИЙ В ТЕМНОГУМУСОВОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ

© 2020 г. Л. М. Полянская[a], *, Д. Д. Юмаков[a], З. Н. Тюгай[a], А. Л. Степанов[a]

[a] *МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: lpolyanskaya@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.
После доработки 17.01.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

Методами люминесцентной микроскопии и каскадной фильтрации проведена сравнительная оценка запасов грибной и бактериальной биомассы в темногумусовой лесной почве (Gleyic Umbrisol). Методом каскадной фильтрации показано, что в верхних горизонтах исследованной почвы биомасса бактерий сопоставима с биомассой грибов (на ее долю приходится 46%, а на долю грибов – 54%). Однако вниз по профилю это соотношение меняется в пользу бактерий (до 69% на глубине 100 см). Таким образом, использование метода каскадной фильтрации позволило переоценить запасы бактериальной биомассы в почве и впервые показать, что в верхних горизонтах данной почвы биомасса бактерий сопоставима с грибной, а в нижних горизонтах бактериальная биомасса превышает грибную. Метод каскадной фильтрации более точно определяет как численность, так и биомассу бактерий, что позволяет пересмотреть сложившиеся в почвенной микробиологии представление о значительном преобладании грибной биомассы в почвах.

Ключевые слова: биомасса грибов, биомасса бактерий, метод каскадной фильтрации, люминесцентная микроскопия, микробная экология

DOI: 10.31857/S0032180X20090129

ВВЕДЕНИЕ

Оценка численности и биомассы микроорганизмов в почве является одной из главных задач почвенной микробиологии поскольку этот показатель позволяет оценить состояние почвенного покрова, дает представление о скорости трансформации органического вещества и интенсивности биологического круговорота в почвах [4]. В последнее время определение численности и биомассы почвенных микроорганизмов осуществляется с помощью люминесцентной микроскопии. Этот метод имеет ряд недостатков. Так, учет грибов проводится в почвенной суспензии очень малого объема (0.04 мл под покровным стеклом), и при перерасчетах численности клеток на 1 мл возникает необходимость умножить подсчитанное число микробных зачатков на 25, что приводит к адекватному росту ошибки определения.

Известный способ прямого учета грибов на фильтрах [3] дает заниженные результаты определения в зависимости от типа почв из-за необходимости использования значительной аликвоты (не менее 10 мл), пропускаемой через фильтр и, как следствие, большого количества почвенных частиц, осаждаемых на фильтре, что экранирует гифы и споры грибов и приводит к их массовому недоучету. Тем не менее, этот метод широко применяется в практике микробиологических исследований. Он прост в исполнении, зафиксированные препараты могут долго храниться, допускается осуществление учета в удобное для исследователя время, позволяет проводить анализ большого количества образцов [9].

Новый метод каскадной фильтрации [14] показал, что сравнительная численность бактерий, определяемая по методам люминесцентной микроскопии и фильтрации, примерно одинакова, а расчеты запасов микробной биомассы – существенно различаются [18]. Эта разница обусловлена тем, что при расчете микробной биомассы используется единый усредненный объем обнаруженных микробных клеток до 0.1 мкм^3 [7]. Метод каскадной фильтрации лишен этого недостатка и позволяет дифференцированно учитывать бактериальные клетки разной величины.

Методом люминесцентной микроскопии было показано, что на долю бактерий в разных почвах приходится всего 1–10% от общей микробной биомассы, представленной преимущественно грибами (на 90–99%) [10]. Принимая во внимание небольшую биомассу бактерий, возникают вопросы по поводу масштабов процессов, имеющих исключи-

тельно бактериальную природу, например, азотфиксации в почвах [21].

Цель работы – оценить соотношение грибной и бактериальной биомассы новым методом каскадной фильтрации на примере темногумусовой лесной почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служила темногумусовая глееватая тяжелосуглинистая почва, лежащая на элювии глинистых отложений триасового возраста [6, 20]. Почва была отобрана на территории Костромской области в Пышугском районе.

Методика определения численности и биомассы микроорганизмов методом люминесцентной микроскопии. В качестве основного приема обработки образцов (просеянных через 0.25 мм) для микробиологического анализа использовали ультразвуковое диспергирование на низкочастотном диспергаторе типа УЗДН-1 (22 кГц, 0.44 Å, 2 мин) [8].

Для оценки запасов микробной биомассы методом люминесцентной микроскопии [7] готовили суспензии образцов почвы (1 : 100) и наносили микропипеткой на тщательно обезжиренные предметные стекла по 0.02 мл для определения численности бактерий и 0.04 мл – для учета мицелия грибов, равномерно распределяли стерильной микробиологической петлей на площади 4 см^2 и фиксировали на пламени горелки по 6 препаратов на каждом стекле – для учета клеток бактерий и для учета длины мицелия грибов. В каждом препарате просматривали по 60 полей зрения.

Для подсчета бактерий препараты окрашивали раствором акридина оранжевого в течение 2–3 мин (1 : 10000), а для учета мицелия грибов – в течение 15 мин калькофлуором белым [11].

Расчет количества клеток на 1 г почвы проводили по формуле:

$$N = S_1 an / vS_2 c,$$

где: N – число клеток (кл/г почвы) или длина мицелия грибов (мкм/г почвы); S_1 – площадь препарата (мкм^2); a – количество клеток или длина мицелия (мкм) в одном поле зрения (усреднение производится по всем препаратам); n – показатель разведения почвенной суспензии (мл); v – объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 – площадь поля зрения микроскопа (мкм^2); c – навеска почвы (г).

Расчеты запасов биомассы производили, исходя из имеющихся данных о том, что биомасса сухого вещества для одной бактериальной клетки объемом 0.1 мкм^3 составляет 2×10^{-14} г [7], а с учетом замеренного диаметра мицелия грибов их биомассу вычисляли по формуле $0.628r^2 \times 10^{-6}$ г [12].

Методика определения численности и биомассы микроорганизмов методом каскадной фильтрации. После ультразвуковой обработки почвенную суспензию пропускали через фильтры с диаметром пор 1.85, 1.43, 0.43, 0.38, 0.23 и 0.2 мкм в колбе Бунзена, соединенной с водоструйным насосом. Собственную люминесценцию фильтров гасили окрашиванием насыщенным спиртовым раствором судана черного.

На поверхность сеточки металлического фильтра колбы Бунзена помещали четыре слоя фильтровальной бумаги, перекрывая их сверху бактериальным (ядерным) фильтром и, после фиксации с помощью металлического кольца, вносили почвенную суспензию. Фильтрование проводили последовательно от фильтра с большим размером пор к меньшему.

Через установку пропускали 1 мл почвенной суспензии, окрашенной раствором акридина оранжевого (1 : 10000) в течение 3 мин. Учет клеток бактерий проводили с использованием микроскопа ЛЮМАМ И-3 (объектив 100×, масляная иммерсия) в 30-ти полях зрения, условно считая размеры клеток, равными диаметру пор фильтра, на котором они осаждались. В расчетах принимали, что клетки имеют шаровидную форму [13].

Определение числа клеток в 1 г почвы проводили по формуле:

$$N_b = \frac{S_1 an}{VS_2 c},$$

где: N_b – число клеток на 1 г почвы; S_1 – площадь фильтра, мкм^2; a – количество клеток в одном поле зрения (усреднение производится по всем полям); n – показатель разведения почвенной суспензии, мл; V – объем профильтрованной суспензии, мл; S_2 – площадь поля зрения микроскопа, мкм^2; c – навеска почвы, г. С учетом площади фильтра и площади поля зрения микроскопа уравнение для расчета численности приобретало вид: $N_b = 1.13 \times 10^7 a$.

Исходя из размеров пор каждого фильтра, находили биомассу одной клетки бактерии на каждом фильтре, а с учетом их численности – биомассу всех клеток по формуле:

$$B_b = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 2 \times 10^{-14}}{0.1 N_b},$$

где r – радиус пор каждого фильтра, мкм; N_b – численность каждой фракции, кл/г почвы; B_b – биомасса каждой фракции, г.

Средний объем одной клетки рассчитывали как

$$V = \frac{B_{\text{общ}}}{N_{\text{общ}} a},$$

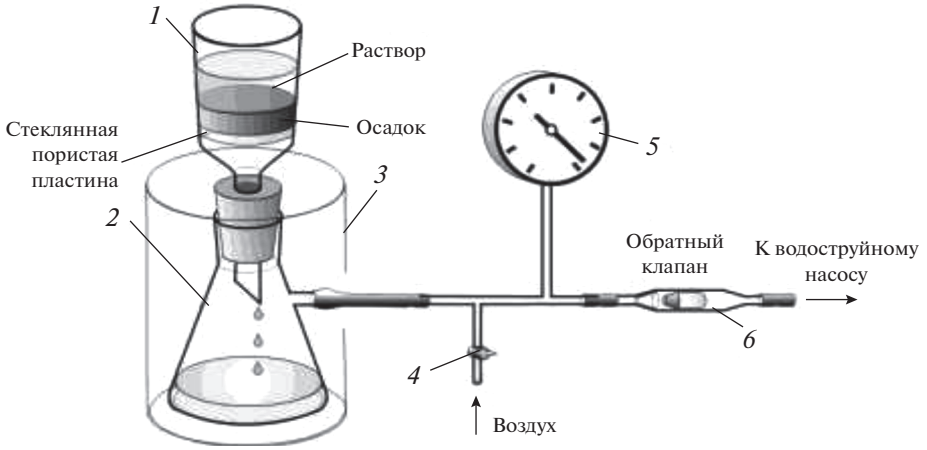

Рис. 1. Фильтрование под уменьшенным давлением. Условные обозначения: *1* – воронка, *2* – колба Бунзена, *3* – защитный кожух, *4* – кран, *5* – манометр, *6* – обратный клапан.

где $B_{общ}$ и $N_{общ}$ – биомасса (г) и численность (кл/г почвы) всех фракций, a – плотность одной клетки, $a = 1 \times 10^{-12}$ г/см^3, V – средний объем одной клетки, мкм^3 [17].

Результаты определения численности (N) и сухой биомассы (мкг), полученные методом каскадной фильтрации, рассчитывали на 1 г воздушно-сухой почвы. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Statistica 10.0 и Microsoft Excel 2010. Среднее квадратичное отклонение (δ_{n-1}) для значений численности бактерий в образце не превышало 5–10%.

В ходе выполнения работы возникла необходимость разработки дополнительной методики, позволяющей учитывать не только бактерии, но и длину мицелия грибов методом “каскадной” фильтрации. Оказалось, что при стандартном способе фильтрации грибной мицелий сильно разрушается. Поэтому помимо имеющихся элементов, в установку для фильтрации был включен манометр, который позволял сохранять постоянную скорость фильтрации и необходимое разрежение в пределах 110–120 мм рт. ст. [19] (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из полученных данных (рис. 2), численность бактерий по методу каскадной фильтрации составляла 0.5×10^9 клеток/г почвы в слое 0–20 см и постепенно уменьшалась вниз по профилю в 2 раза. Численность бактерий, определенная методом люминесцентной микроскопии, оказалась в 4 раза больше (2×10^9 кл/г почвы в горизонте 0–20 см) и это превышение сохранялось во всех точках отбора образцов до глубины 100 см.

При сравнении двух методов по оценке запасов прокариотной биомассы, оказалось (рис. 3), что данные по методу каскадной фильтрации (650 мкг/г в слое 0–20 см) значительно превышали аналогичные результаты определения методом люминесцентной микроскопии, как в верхнем горизонте – (36 мкг/г на глубине 0–20 см), так и по всему профилю почвы. Распределение размерных

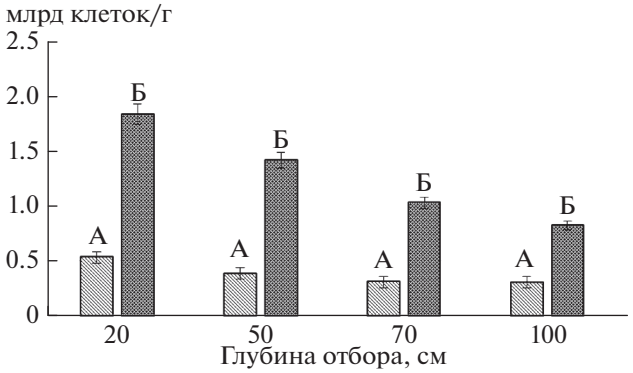

Рис. 2. Численность клеток бактерий по методу каскадной фильтрации (А) и по методу люминесцентной микроскопии (Б).

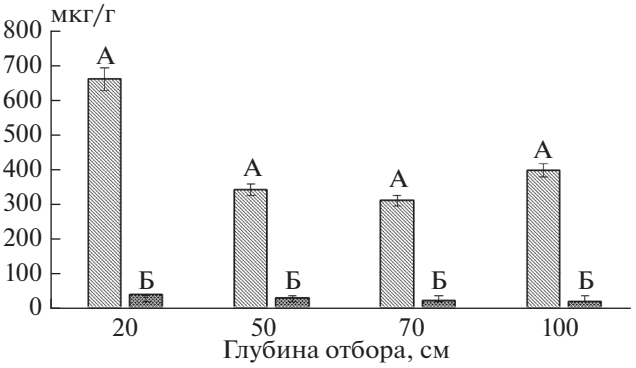

Рис. 3. Биомасса клеток бактерий по методу каскадной фильтрации (А) и по люминесцентному методу (Б).

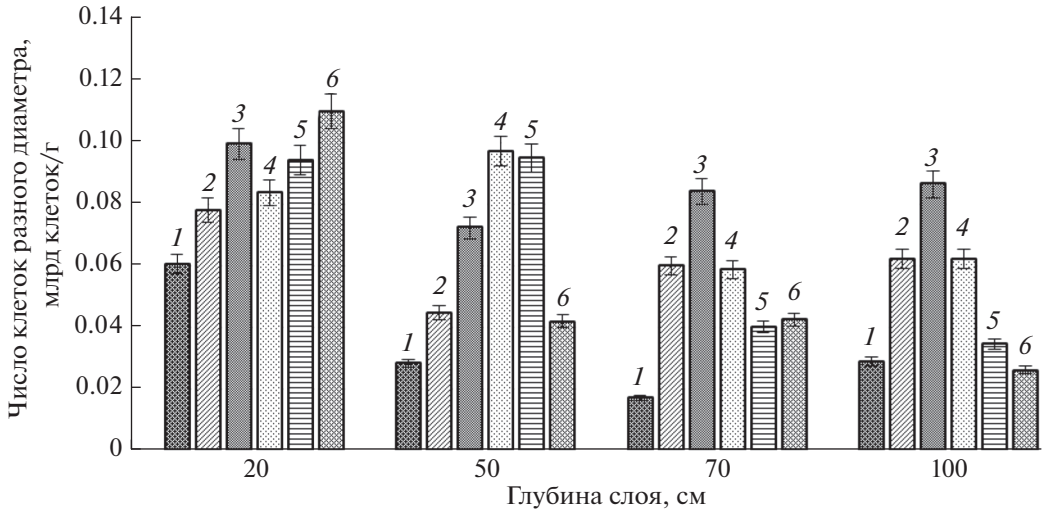

Рис. 4. Численность бактерий различного диаметра (*1* – 1.85; *2* – 1.43; *3* – 0.43; *4* – 0.38; *5* – 0.23; *6* – 0.2 мкм) с разных глубин профиля темногумусовой почвы (20, 50, 70 и 100 см).

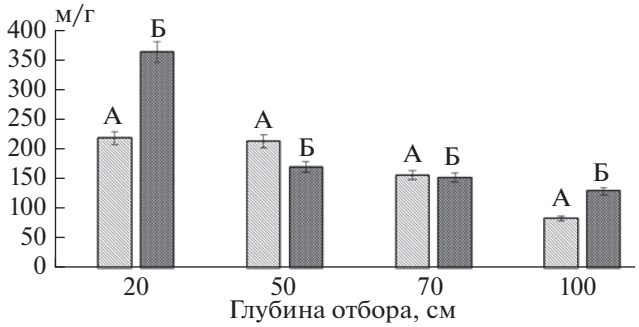

Рис. 5. Длина грибного мицелия по методу каскадной фильтрации (А) и люминесцентной микроскопии (Б).

групп бактерий по почвенному профилю представлено на рис. 4, откуда следует, что в верхних горизонтах почвы обнаруживаются бактерии многих размерных групп (от 0.2 до 1.9 мкм в диаметре). Вниз по профилю наблюдается некоторый рост численности мелких групп бактерий. При этом большая часть бактериальных клеток имеет диаметр более 1.4 мкм.

Длина грибного мицелия в верхнем горизонте почвы составляла по методу каскадной фильтрации 216 м/г почвы и уменьшалась на глубине 100 см до 82 м/г (рис. 5, А). По методу люминесцентной микроскопии длина грибного мицелия на глубине 0–20 см была в полтора раза больше, достигая 360 м/г, а на глубине 100 см уменьшалась до 128 м/г (рис. 5, Б).

Таблица 1. Доля (%) грибов (над чертой) и бактерий (под чертой) в микробной биомассе на разной глубине почвенного профиля

Метод	0–20 см	70–100 см
Люминесцентной микроскопии	99/1	98/2
Каскадной фильтрации	54/46	31/69

Важно отметить, что при сравнении биомассы грибного мицелия по методу каскадной фильтрации и по методу люминесцентной микроскопии, было выявлено, что в верхних горизонтах биомасса грибов была в 6–10 раз больше в первом случае.

В ходе проведенных исследований показано, что определение численности и биомассы микроорганизмов в почвах в значительной степени зависит от выбранного метода исследования. Так, при использовании метода люминесцентной микроскопии грибная биомасса значительно доминирует над бактериальной во всех горизонтах исследуемой почвы: на долю грибной биомассы по этому методу приходилось 99–98% (в зависимости от глубины отбора проб), а биомасса бактерий составляла 1–2% (табл. 1). Этот вывод полностью совпадает с данными многих исследователей [10–12, 17, 21, 22].

Методом каскадной фильтрации установлено, что в верхнем горизонте почвы биомасса бактерий сопоставима с биомассой грибов (на ее долю приходится 46%, а на долю грибов – 54%). Таким образом, использование метода каскадной фильтрации позволило переоценить запасы бактериальной биомассы в почве и впервые показать, что в верхних горизонтах почвы биомасса бактерий сопоставима с грибной. В нижних горизонтах биомасса грибов существенно уменьшается (от 650 до 174 мкг/г), а биомасса бактерий, меняется незначительно (от 560 до 400 мкг/г), что сохраняет тенденцию доминирования бактериальной биомассы над грибной и в нижних горизонтах почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод каскадной фильтрации более точно определяет, как численность, так и биомассу разных групп бактерий, в том числе численность и биомассу грибов, что позволяет пересмотреть сложившиеся в почвенной микробиологии представление о тотальном преобладании грибной биомассы в почвах и подтвердить важную роль прокариот в ключевых процессах трансформации природных полимеров в окружающей среде.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую признательность М.Я. Мельникову (главному научному сотруднику) и В.И. Пергушову (ведущему научному сотруднику) химического факультета МГУ, а также Т.Н. Початковой (старшему научному сотруднику) факультета почвоведения МГУ за консультации и помощь в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по теме госзадания “Биоразнообразие и ценотические связи почвенных микроорганизмов в наземных экосистемах”. ЦИТИС: 115122210099-9.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богатырев Л.Г., Иванов А.В., Матышак Г.В., Степанов А.А.* Особенности формирования органопрофиля темногумусовых лесных почв северо-востока Костромской области // Лесоведение. 2006. № 3. С. 8–14.
2. *Виноградский С.Н.* Микробиология почвы. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 350 с.
3. *Демкина Т.С., Мирчинк Т.Г.* Определение грибной биомассы в почвах методом мембранных фильтров // Микология и фитопатология. 1983. Т. 17. № 6. С. 517–520.
4. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096.
5. *Звягинцев Д.Г.* Подготовка почв с помощью ультразвука к количественному учету микроорганизмов // Вестник Московского ун-та. Серия 16. Биология. 1968. № 3. С. 127–129.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
7. *Кожевин П.А., Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г.* Динамика развития различных микроорганизмов в почве // Микробиология. 1979. Т. 48. № 4. С. 490–494.
8. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 304 с.: ил.
9. *Мирчинк Т.Г.* Почвенная микология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 224 с.
10. *Полянская Л.М.* Микробная сукцессия в почве. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1996. 96 с.
11. *Полянская Л.М.* Прямой микроскопический подсчет спор и мицелия грибов в почве // Изучение грибов в биогеоценозах. Свердловск, 1988. С. 30.
12. *Полянская Л.М., Гейдебрехт В.В., Степанов А.Л., Звягинцев Д.Г.* Распределение численности и биомассы микроорганизмов по профилям зональных типов почв // Почвоведение. 1995. № 3. С. 322–328.
13. *Полянская Л.М., Горбачева М.А., Звягинцев Д.Г.* Размеры бактерий в черноземе в ходе микробной сукцессии при инкубировании почвы в аэробных и анаэробных условиях // Почвоведение. 2012. № 11. С. 1181–1187.
14. *Полянская Л.М., Городничев Р.Б., Звягинцев Д.Г.* Размеры клеток бактерий в почвах, определяемые методом “каскадной” фильтрации // Известия РАН. Сер. биол. 2013. № 1. С. 144–151.
15. *Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г.* Содержание микробной биомассы как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. № 6. С. 706–714.
16. *Полянская Л.М., Пинчук И.П., Звягинцев Д.Г.* Оценка численности, биомассы и размеров клеток бактерий методом “каскадной” фильтрации в различных почвах // Почвоведение. 2015. № 3. С. 330–336.
17. *Полянская Л.М., Приходько В.Е., Ломакин Д.Г., Чернов И.Ю.* Численность и биомасса микроорганизмов в древних погребенных и современных черноземах разного землепользования // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1191–1204.
18. Практикум по неорганическому синтезу повышенной сложности. Кафедра неорганической химии. Химфак МГУ. 2011. URL: http://vle.chem.msu.ru/oroks22X/upload/normal/003v3t8r3tc4qs/p8.pdf
19. *Шваров А.П., Тюгай З., Иванов А.В., Лебедев И.Е.* Поверхностные свойства твердой фазы темно-гумусовых почв Костромской области, сформированных на глинистых отложениях триаса // Сб. научных трудов Междунар. научной конф., посвященной 90-летию со дня рождения А.Д. Воронина: “Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы”. М., 27–30 мая, 2019. С. 232–237.
20. *Шлегель Г.* Общая микробиология. М.: Мир, 1987. С. 50, 53–54, 415.
21. *Bailey V.L., Smith J.L., Bolton H., Jr.* Fungal to bacterial biomass ratios in soils investigated for enhanced carbon sequestration // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34. № 7. P. 997–1007
22. *Hobbie J.E., Daley R.J., Jasper S*. Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // Appl. Environ. Microbiol. 1977. May. V. 33(5). P. 1225–1228.
23. *Lamberger K.T., Chiu C.Y.* Spatial changes of soil fungal and bacterial biomass from a subalpine coniferous forest to grassland in a humid, subtropical region // Biol. Fertil. Soils. 2001. V. 33. № 3. P. 105–110.

Fungi and Bacteria Ratio in the Dark Humus Forest Soil

L. M. Polyanskaya[1, *], D. D. Yumakov[1], Z. N. Tyugay[1], and A. L. Stepanov[1]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: lpolyanskaya@mail.ru*

Using luminescent microscopy and cascade filtration, a comparative assessment of the reserves of fungal and bacterial biomass in dark humus forest soil has been carried out. Cascade filtration has shown that in the upper horizons of the investigated soil, the bacterial biomass is compatible to the fungal biomass (31–54% for bacteria, and 46–69% for fungi). However, down the profile, this ratio changes in favor of bacteria (up to 69% at the depth of 100 cm).Thus, the use of the cascade filtration method made it possible to overestimate the reserves of bacterial biomass in the soil and to show for the first time that in the upper horizons of a given soil, the biomass of bacteria is compatible to that of fungi, and in the lower horizons, the bacterial biomass exceeds it. The method more provides a more precise assessment of both the population and the biomass of bacteria, which allows revising the opinion of many soil microbiologists on the significant prevalence of fungal biomass in soils.

Keywords: soil profile, biomass, cascade filtration method

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1100–1110

МЕЛИОРАЦИЯ ПОЧВ

УДК 631.413:631.445.53

ВОЗМОЖНОСТЬ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВОЗВРАТА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ОБОРОТ РАНЕЕ МЕЛИОРИРОВАННЫХ СОЛОНЦОВЫХ ЗЕМЕЛЬ (ОБЗОР)

© 2020 г. И. Н. Любимова[a], *, И. А. Салпагарова[b]

[a] *Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия*

[b] *МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: in080643@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.01.2019 г.
После доработки 07.02.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

С использованием собственных и литературных данных проведен анализ направленности изменений свойств почв солонцовых комплексов сухостепной и полупустынной зон в результате мелиорации, в процессе сельскохозяйственного использования и при выводе мелиорированных земель из сельскохозяйственного оборота. Дан экспертный прогноз о современном состоянии залежных мелиорированных солонцовых территорий и целесообразности их использования в сельском хозяйстве. Рассмотрены следующие мелиорированные почвы: агроземы солонцовые (Sodic Protosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protosalic)), агроземы текстурно-карбонатные (Eutric Cambisol (Loamic, Aric, Protosalic)), агросолонцы (Endocalcaric Luvisol (Loamic, Aric, Cutanic, Protosodic)), агрокаштановые (Eutric Cambisol (Siltic, Aric)) и лугово-каштановые (Haplic Kastanozems). Показано, что залежные солонцы, в которых при мелиорации сохранился солонцовый горизонт, через короткий промежуток времени восстанавливают свое строение и свойства, и приближаются к целинным почвам. В залежных солонцах сухостепной зоны с разрушенным и дезинтегрированным солонцовым горизонтом не происходит реставрации солонцового профиля. Они в течение длительного времени сохраняют свойства, приобретенные под действием мелиорации.

Ключевые слова: мелиорация солонцов, агросолонцы, агроземы солонцовые, залежные солонцовые земли

DOI: 10.31857/S0032180X20090099

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня сельскохозяйственного производства в первую очередь зависит от состояния почв, их ресурсного потенциала. Солонцы относятся к наиболее сложным для сельскохозяйственного использования почвам. Общая площадь солонцов в России составляет 30.8 млн га. Встречаются они в лесостепной, степной, сухостепной, полупустынной зонах. Наибольшее их количество находится в Поволжском и Западно-Сибирском регионах [30]. Солонцы не образуют сплошного покрова, а залегают пятнами разной площади и конфигурации среди зональных почв, образуя комплексы и сочетания с разным долевым участием. В естественном состоянии солонцы малопродуктивны, а их наиболее злостные виды – корковые солонцы – часто практически бесплодны. Во влажные годы на средних и глубоких солонцах с мощностью надсолонцового горизонта более 10–15 см, урожаи трав, зерновых и кормовых культур приближаются к урожаю на зональных почвах. Активное вовлечение солонцовых земель в сельскохозяйственное производство всегда сдерживалось специфическими водно-физическими свойствами этих почв. Диапазон влаги, при котором солонцы находятся в состоянии физической спелости для обработки, непродолжителен по времени и у солонцов наступает позже, чем у рядом расположенных зональных почв. Более ранняя обработка солонцовых комплексов затруднена, так как техника вязнет на еще влажных пятнах солонцов. При выпадении дождевых осадков на солонцовой пашне образуется корка, препятствующая прорастанию семян. Все это приводит к разновременному развитию сельскохозяйственных культур на солонцовых и зональных почвах и, как следствие, к потере урожая.

Использование солонцов в сельском хозяйстве без их мелиорации в большинстве случаев малоэффективно. Наиболее активно изучение и освоение солонцовых почв велось в СССР, Канаде и Венгрии [9, 36, 37, 40, 42, 43]. В СССР, начи-

ная с шестидесятых и до конца девяностых годов, проводились широкомасштабные исследования по разработке, испытанию и оценке различных технологических приемов и эффективности мелиорации на солонцовых землях России (ЦЧО, Поволжье, Северный Кавказ, Южный Урал, Западная Сибирь и Алтайский Край). Были разработаны всесоюзные и региональные рекомендации по мелиорации солонцов с агромелиоративной группировкой почв по регионам. К началу 90-х гг. прошлого века значительная часть распаханных солонцовых территорий России была мелиорирована. Мелиорация солонцов субсидировалась государством. За рубежом активного освоения солонцовых земель не произошло. В основном, там развивались исследования, направленные на диагностику вторичного осолонцевания орошаемых почв и на борьбу с этим явлением, моделирование этих процессов [38, 39, 41, 44, 45].

Для улучшения солонцов использовали: 1 – химическую мелиорацию (внесение химических веществ в почву на фоне глубоких вспашек); 2 – мелиорацию за счет внутрипочвенных запасов кальцийсодержащих соединений с использованием глубоких мелиоративных обработок (самомелиорация); 3 – биологическую мелиорацию (фитомелиорацию) [30]. Химическая мелиорация применялась в регионах с количеством выпадающих осадков более 300–350 мм в год. В сухостепной и полупустынной зонах, эффективность химической мелиорации солонцов в отсутствии орошения резко снижалась, а затраты на ее проведение часто не окупались в течение многих лет. Поэтому основными мелиоративными приемами улучшения этих почв являлись глубокие мелиоративные обработки с вовлечением в мелиоративный слой почвенного гипса и карбонатов и глубокое безотвальное рыхление.

Подбор мелиоративного приема осуществляли с учетом специфических свойств почв (содержания обменного натрия, степени засоления, глубины залегания карбонатов кальция и гипса, грунтовых вод и др.), климатических условий (количества выпадающих осадков), специфики сельскохозяйственного использования. Мелиорация солонцов включала не только сами мелиоративные приемы, но и целый комплекс послемелиоративных мероприятий, в том числе влагонакопительных [30].

При правильном подборе мелиоративного приема и его проведении с каждого гектара солонцовых земель получали в 2–5 раз и больше кормовых единиц по сравнению с естественными угодьями. Затраты на мелиорацию окупались за 2–3 года с последействием мелиорации до 10 и более лет [14, 30].

После распада СССР произошло уменьшение площади пашни. Посевные площади сократились в районах, где было распахано большое количество малопродуктивных, в том числе и мелиорированных солонцовых земель, использование которых оказалось экономически невыгодным [1]. С 1990-х гг. прекратилось субсидирование мелиоративных работ.

Согласно “Концепции социально-экономического развития России до 2020 года” возвращению в оборот подлежит 10–12 млн га земель. В связи с этим необходимо рассмотреть проблему целесообразности возврата и рационального использования выведенных из сельскохозяйственного оборота мелиорированных солонцовых земель. Целесообразность и характер использования последних будут определяться их современным агроэкологическим состоянием и затратами по возвращению в сельскохозяйственное производство.

Цель настоящих исследований проанализировать, в каком направлении проходило изменение свойств почв солонцовых комплексов сухостепной и полупустынной зон в результате мелиорации, в процессе сельскохозяйственного использования и при выводе мелиорированных земель из сельскохозяйственного оборота.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований явились распаханные и мелиорированные почвы солонцовых комплексов сухостепной зоны, в том числе и на ранее орошаемых территориях европейской части России. В основе исследований лежало сравнительное изучение профилей целинных, пахотных и залежных почв с известной датой их вовлечения и вывода из сельскохозяйственного производства, фиксированной историей использования участка, в том числе с информацией о проведенных мелиоративных мероприятиях. Были обследованы молодые и средневозрастные залежные почвы Поволжского региона, интенсивное использование которых в сельском хозяйстве пришлось на 70–80 гг. Объекты исследований располагались на южном окончании Приволжской возвышенности (п. Самофаловское), на северо-восточном окончании Ергенинской возвышенности (п. “Абганеровский”) Волгоградской области, на раннехвалынской террасе (п. Черный Яр) Астраханской области. Кроме того обследовали ранее орошаемые залежные почвы на Кисловской оросительной системе на Приволжской песчаной гряде и Хвалынской равнине (Николаевский и Быковский районы Волгоградской области). Объекты расположены в подзонах светло-каштановых и каштановых почв. Возраст залежей от 5 до15 лет. Подробная характеристика объектов дана ранее [20–22].

Также были использованы данные опытов, проводившиеся различными исследователями в Вол-

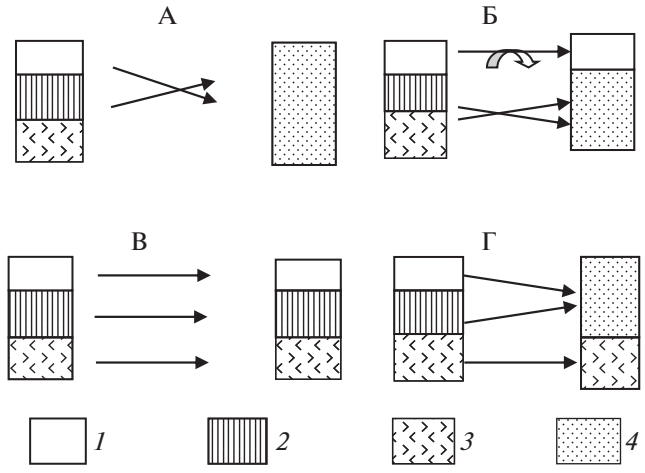

Рис. 1. Схемы технологического процесса работы мелиоративных орудий: А – на основе технологии плантажной вспашки; Б – на основе технологии ярусной вспашки; В – на основе технологии глубокого рыхления; Г – на основе технологии отвальной вспашки. Обозначение горизонтов: *1* – AJ – светло-гумусовый, SEL – солонцово-элювиальный; *2* – BSN – солонцовый; *3* – BCA – аккумулятивно-карбонатный, гипссодержащий; *4* – TUR – турбированный горизонт разного состава.

гоградской, Саратовской, Ростовской областях, Калмыкии, Ставропольском крае [2, 4, 6–8, 12–14, 23, 26, 27, 29].

Описание профиля агрогенноизмененных почв солонцовых комплексов в поле осуществляли по методике, предложенной Корнблюмом с соавторами для изучения мозаичных почв лиманов [19] с использованием "Базовых шкал свойств морфологических элементов почв" [3]. Название почв и индексация горизонтов даны в соответствии с новой классификацией почв России [17, 28]. Почвенный покров обследованных территорий представлен агроземами солонцовыми (Sodic Protosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protosalic)), агроземы текстурно карбонатные (Eutric Cambisol (Loamic, Aric, Protosalic)), агросолонцы (Endocalcaric Luvisol (Loamic, Aric, Cutanic, Protosodic)), агрокаштановые (Eutric Cambisol (Siltic, Aric)) и лугово-каштановые (Haplic Kastanozems).

В лабораторных условиях в образцах определяли содержание легкорастворимых солей, карбонатов, гипса, поглощенных оснований [10], степень выраженности солонцового процесса по методикам Хитрова и Грачева, Корнблюма [11, 35]. Методика Грачева, Корнблюма основана на явлении кратковременной задержки набухания растертых образцов солонцовых и солонцеватых горизонтов и отсутствие ее в засоленных горизонтах. Хитров предложил расчетный показатель балл "В". Его значение получают на основе диаграммы в координатах "обменный натрий в процентах от ЕКО" и удельной электропроводности при 25°С вытяжки из водонасыщенной пасты при влажности, соответствующей нижней границе текучести, дСм/м. Оба способа позволяют оценить наличие солонцового процесса при вторичном осолонцевании почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для улучшения свойств солонцовых почв сухостепной и полупустынной зон были разработаны различные мелиоративные орудия. Несмотря на их многообразие, выполняемую ими механическую обработку можно свести к трем основным технологическим способам:

1. Глубокое безотвальное рыхление с сохранением генетических горизонтов в прежнем положении (технология на основе глубокого рыхления).

2. Крошение и перемешивание солонцового горизонта с гипсоносными и карбонатными подсолонцовыми горизонтами при сохранении на поверхности надсолонцовых гумусовых горизонтов (технология на основе ярусной обработки и глубокой фрезерной обработки).

3. Крошение и перемешивание всех генетических горизонтов на глубину до 50 см (технология на основе плантажной вспашки).

На рис. 1 представлены схемы основных технологических приемов мелиоративной обработки солонцовых почв.

Анализ постмелиоративного морфологического строения профиля солонцов разных видов (глубоких, средних, мелких) показал, что каждое орудие создает достаточно специфическую картину преобразований в нарушенном слое в зависимости от технологии обработки, конструкции рабочих органов и мощности генетических горизонтов (табл. 1).

При трехъярусной и фрезерной обработках, а также после прохода солонцового рыхлителя РС-1.5, поверхностный слой мелиорированных солонцов на 90% и более состоит из фрагментов гумусово-аккумулятивных горизонтов, тогда как в случае отвальной и плантажной обработок – только на 65 и 44% соответственно. Вынос материала карбонат-содержащих горизонтов в поверхностный слой почв происходит при плантажной вспашке (до 32%), практически полностью отсутствует при фрезерной обработке и незначителен (1%) при трехъярусной вспашке [31].

Оценка изменений морфологического облика мелиорированных почв солонцовых комплексов на макро- и мезоуровнях показали, что при агрогенном или мелиоративном воздействии образуются две группы агрогенноизмененных солонцов [17, 28].

Первая группа создается в результате обработки почв солонцовыми рыхлителями и после отвальной вспашки. В почвах этой группы сохраняется профильное строение, свойственное солонцам. Ге-

Таблица 1. Типы профильной организации разных видов солонцов, возникающие после различных мелиоративных вспашек (первичная организация)

Тип обработки	Солонцы			
	глубокие (мощность гор. SEL > 18 см)	средние (мощность гор. SEL 11–18 см)	мелкие (мощность гор. SEL 5–10 см)	корковые (мощность гор. SEL < 5 см)
Отвальная обработка на 20 см	Обработкой затронуты гумусовые и частично солонцовый горизонты			Обработкой затронуты и перемещены гумусовые, солонцовый и частично подсолонцовый горизонты
То же на 25–27 см	Обработкой затронуты гумусовый и солонцовый горизонты		Обработкой затронуты и перемещены гумусовые, солонцовый и частично подсолонцовые горизонты	
Глубокое рыхление плугом Мальцева	Обработкой затронуты, но остались на месте гумусовые и частично солонцовый горизонты			Обработкой затронуты, но остались на месте гумусовые, солонцовый и частично подсолонцовый горизонты
То же солонцовыми рыхлителями	Обработкой затронуты, но остались на месте своего естественного залегания гумусовые, солонцовый и подсолонцовые горизонты			
Плантажная вспашка	Обработкой затронуты и перемешаны гумусовые, солонцовый и подсолонцовые горизонты			
Ярусные вспашки				
Орудия с активными рабочими органами	Обработкой затронуты, но остались на месте своего естественного залегания гумусовые, солонцовый и подсолонцовые горизонты			

нетические горизонты солонцов и зональных почв разрыхляются, но остаются на месте. В зависимости от глубины залегания и мощности солонцовый горизонт может сохраниться полностью или частично. Карбонатный и гипсовый профили этих почв меняются слабо (рис. 2). От целинных аналогов эта группа почв достаточно хорошо отделяется лишь в первые годы после обработки. Почвы данной группы по новой классификации почв России [17, 28] образуют самостоятельный тип почв – “агросолонцы” в одном отделе с природными солонцами. При выводе этих почв из сельскохозяйственного использования отличия между целинными и мелиорированными почвами быстро стираются. Последействие обработок 2–5 лет.

В почвах второй группы при разрушении и дезинтеграции солонцового профиля мелиоративными орудиями происходят значительные изменения их строения. На месте бывших солонцов со временем формируются новые антропогенноизмененные почвы, не похожие по своему морфологическому облику и набору протекающих в них почвообразовательных процессов на целинные солонцы или зональные почвы. Характерной особенностью строения этих почв является наличие турбированного горизонта, состоящего из морфонов с разным долевым участием исходных генетических горизонтов под пахотным горизонтом. Подпахотный турбированный горизонт сохраняет свою организацию, созданную обработками и через 25–50 лет после проведения мелиоративных вспашек [20, 25]. По новой классификации почв России [17, 28] эти почвы относятся к агроземам солонцовым.

В процессе сельскохозяйственного использования в верхней части профиля агросолонцов уменьшается содержание солей и обменного натрия.

В своем постмелиоративном развитии агроземы солонцовые проходят несколько этапов. *Первый этап* – это педотурбация верхней (40–50 см) части профиля. На этом этапе имеет место механическое изменение профильного строения исходных почв, потеря солонцами типообразующего солонцового горизонта.

Второй этап характеризуется активным рассолением и рассолонцеванием мелиорированных почв. В условиях сухой степи при мелиорации солонцов без дополнительного орошения для опреснения верхнего слоя мелиорированных почв необходимо 3–5 лет [23]. В этот период велика межагрегатная пористость. Передвижение растворов преимущественно происходит между морфонами и через хорошо водопроницаемые части морфонов. В результате мелиорации изменяется глубина промачивания почв. Так, наблюде-

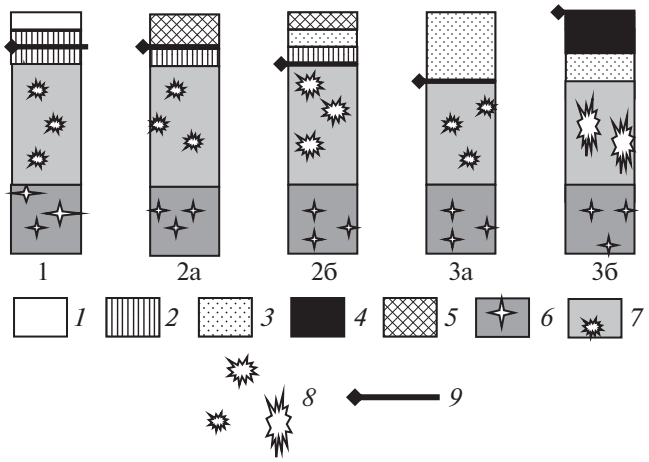

Рис. 2. Схема постмелиоративного изменения профильного строения солонцов: 1 – целинный солонец; 2а – сразу после отвальной вспашки, 2б – через 24 года после вспашки; 3а – сразу после трехъярусной вспашки, 3б – через 24 года после вспашки. Обозначение горизонтов: *1* – SEL элювиально-гумусовый; *2* – BSN – солонцовый; *3* – TUR – турбированный; *4* – P – пахотный псевдогомогенный; *5* – Ptr пахотный турбированный; *6* – cs – гипс-содержащий; *7* – BCA – аккумулятивно-карбонатный; *8* – выделения карбонатов разной формы; *9* – глубина сплошного вскипания от HCl.

ния Базыкиной [4] показали, при мелиорации солонцов Джаныбекского стационара (плантажная вспашка, посадка полезащитных лесополос) в благоприятные по увлажнению годы наблюдалось сквозное весеннее промачивание мелиорированных почв. В сухие годы глубина весеннего промачивания колебалась от 30 до 100 см. В результате в мелиорируемых солонцах увеличиваются запасы влаги. При соблюдении всех мероприятий по сохранению и накоплению влаги в мелиорируемых степных и лугово-степных солонцах вторичного засоления, как правило, не наблюдается [2, 4, 6, 7, 23, 27, 29, 32].

В процессе сельскохозяйственного использования мелиорированных почв постепенно происходит уменьшение их водопроницаемости. Но даже на 14-й год после проведения трехъярусной и плантажной вспашек водопроницаемость на мелиорированных вариантах опытов почти в 2 раза больше, чем на варианте с отвальной вспашкой (на 25–27 см) и на целинных почвах [2, 7, 15, 32].

При рассолении мелиорированных солонцов из верхней части профиля в первую очередь удаляются хлорид-ионы и ионы натрия. По мере вымывания хлоридов и сульфатов наблюдается увеличение содержания ионов HCO_3^- в пахотных, подпахотных и в карбонат-содержащих горизонтах. Параллельно с уменьшением содержания натрия в почвенном растворе, уменьшается содержание Na^+ в ППК и увеличивается содержание кальция и магния [2, 12, 29].

В агроземах солонцовых имеет место некоторое увеличение содержания фракции прочносвязанного и уменьшение фракции водноагрегированного ила, уменьшение степени пептизируемости в пахотном горизонте мелиорированных почв, что говорит об ослаблении солонцового процесса (табл. 2).

Третий этап. Через 10–15 лет после проведения мелиорации наблюдается ухудшение водно-физических свойств почв. Уменьшается скорость фильтрации, глубина промачивания. Но и теперь мелиорированные почвы по своим водно-физическим свойствам по-прежнему значительно отличаются от целинных. Плотность пахотного горизонта через 15 и более лет после проведения мелиорации остается меньше, чем в целинных солонцах [2, 7]. Турбированный горизонт сохраняет свое первоначальное мозаичное строение. За счет появления в этом горизонте пропиточных форм карбонатов он приобретает большую твердость в сухом состоянии. Но, как показывают наблюдения, в мелиорированных солонцах с разрушенным солонцовым горизонтом и через 20 лет после мелиорации в верхней толще почв (до 40–60 см), протекают процессы рассоления и рассолонцевания [25]. В годы с количеством выпадающих осадков значительно меньше среднемноголетних, может наблюдаться увеличение содержания легкорастворимых солей в пахотном слое (рис. 3).

Активно развиваются процессы кальциевой миграции. Происходит постепенная десегрегация карбонатных и гипсовых новообразований. Имеет место подтягивание карбонатов и их накопление в пахотных горизонтах. Особенно интенсивно этот процесс идет в каштановых и светло-каштановых почвах с высоким залеганием карбонатов. Благодаря появлению пропиточных форм карбонатов горизонты приобретают большую твердость в сухом состоянии. Наблюдается растворение и перекристаллизация гипсовых новообразований [20].

При глубоких мелиоративных обработках солонцов в неорошаемых условиях с вовлечением карбонатов в мелиорируемый слой при отсутствии гипса рядом исследователей отмечалось увеличение pH водной суспензии и общей щелочности мелиорированных почв до критических величин (pH > 8.7).

Установлено, что общая щелочность равная 0.07% при pH 8.7 угнетающе действует на развитие культурных растений, а при общей щелочности 0.1% и pH 9.5 они погибают [27, 29]. Ощелачивание богарных почв степей, в том числе мелиорированных солонцов, объясняется снижением верхней границы гипсово-солевого горизонта, увеличением мощности карбонатных безгипсовых горизонтов, повышением щелочного резерва

Таблица 2. Относительное содержание подфракций дробной пептизации ила в образцах целинных и агрогенно-измененных почв опытного участка через 24 года после проведения мелиорации (Волгоградская область, Городищенский район)

Горизонт	Глубина, см	Содержание фракций ила, %			
		воднопептизируемый	агрегированный разной прочности связи		прочносвязанный
			АИ-1	АИ-2	
Солонец каштановый степной солончаковатый высококарбонатный глубокогипсовый средний средненатриевый, целина					
SEL	0–10	4.4	54.6	19.9	19.9
BSN	10–22	4.6	39.9	22.6	31.7
BSN"	22–25	6.3	30.5	20.1	41.3
BCA	28–50	9.6	52.2	24.8	7.6
BCAcs	80–99	5.0	26.3	24.7	35.4
BCcs, s	99–130	7.5	38.0	33.7	15.5
Светло-каштановая, карбонатная слабосолонцеватая почва, целина					
SEL	2–13	4.7	46.4	19.7	27.9
BMKsn	13–31	4.9	31.3	15.7	47.3
BCA	45–66	6.6	31.7	25.9	33.6
BCA'	78–дно	5.7	21.1	43.8	26.8
Агросолонец с сохранившимся солонцовым горизонтом (после отвальной вспашки с почвоуглублением до 40 см)					
P	0–5	5.4	26.7	26.1	40.8
BSNagr	5–12	6.1	22.4	31.4	39.1
BSN	8–38	5.7	38.4	11.0	43.6
BCA	38–50	5.9	41.4	18.1	31.2
Агрокаштановая почва с разрушенным солонцеватым горизонтом (после отвальной вспашки с почвоуглублением до 40 см)					
Pca	0–15	3.6	20.1	20.1	55.4
TURca	15–27	3.4	28.4	13.4	53.4
BCAtur	27–50	11.2	42.3	5.4	36.5
Агрозем солонцовый (после трехъярусной вспашки на 40 см)					
Ptur,ca	0–10	3.7	18.0	22.7	54.2
P'tur,ca	10–25	4.1	16.5	30.7	46.9
TUR,ca	25–32	5.8	27.9	8.3	56.4
BCA	36–60	5.9	38.6	26.1	26.5
Агрогенноизмененная светло-каштановая солонцеватая почва с разрушенным солонцеватым горизонтом (после трехъярусной вспашки на 40 см)					
Ptur,ca	0–1(6)	3.4	14.9	28.0	52.8
TUR,ca	1(6)–4	2.7	16.9	18.7	60.8
TUR',sn	4–30	2.7	22.7	20.2	53.9
BMKsn	35–44	4.9	35.2	15.8	43.0
BCA	44–70	6.1	28.5	26.4	36.6

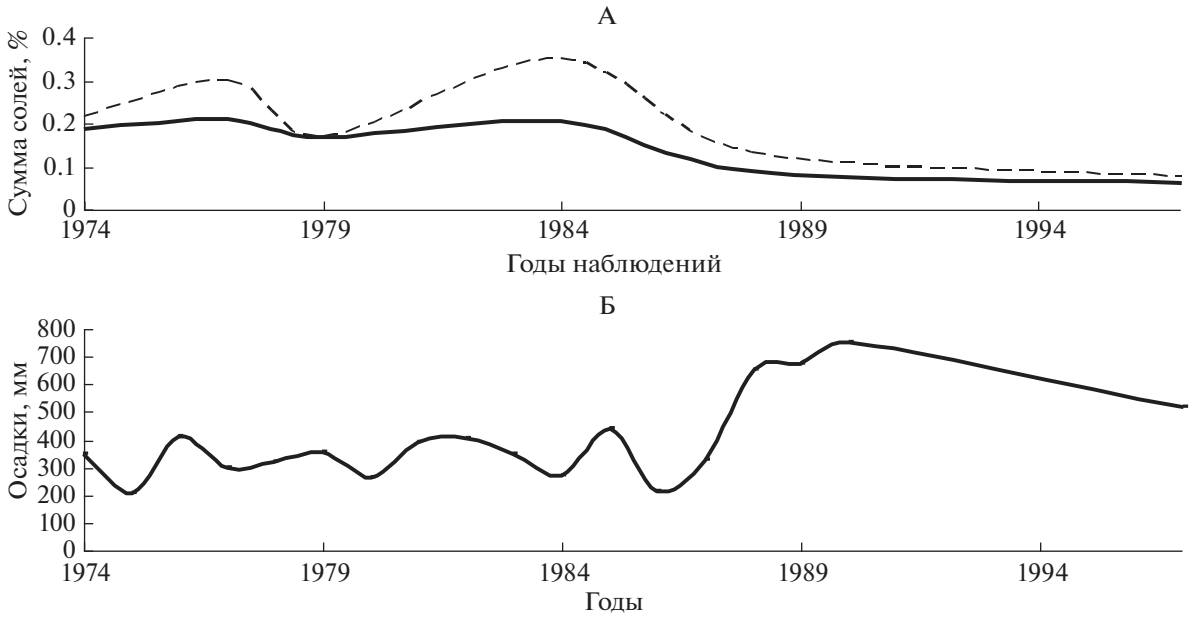

Рис. 3. Динамика содержания солей в пахотном слое мелиорированных солонцов на варианте с трехъярусной вспашкой (А) и количества осадков (Б) за 20-летний период (Волгоградская обл., Городищенский р-н). Обозначения: прямая линия – слой 0–10 см; пунктир – слой 10–20 см.

в них за счет улучшения промывания распаханных земель.

Величина щелочности в целинных и мелиорированных почвах подвержена значительным колебаниям. Она зависит от сезона и погодных условий года. Пространственное варьирование этого показателя также велико. Максимальное значение щелочности в целинных и мелиорированных почвах, достигающее в солонцах токсичных значений, наблюдается в весенний и осенний периоды, либо после летних ливней. Летом, при иссушении почв, щелочность снижается [12, 18].

Содержание гумуса в солонцах сухостепной зоны низкое. В гумусово-эллювиальном горизонте целинных солонцов оно колеблется от 1.5 до 3%, в иллювиальном – от 1 до 2%. Распашка и большая часть мелиоративных обработок солонцов приводят к уменьшению содержания гумуса в корнеобитаемом слое, особенно это заметно на вариантах с плантажной вспашкой (табл. 3). Одновременно на вариантах с глубокими обработками наблюдается увеличение содержания гумуса в нижележащих слоях. При возделывании многолетних трав в почвах накапливается большее количество гумуса, чем при возделывании однолетних культур. Содержание гумуса в пахотном горизонте мелиорированных солонцов не достигает его исходного содержания в целинных солонцах [2, 5, 13, 25]. По мнению Кононовой (цит. по “Мелиорация солонцов СССР”, 1953, стр. 420 [23]), это объясняется тем, что гумусовые вещества в этих почвах образуются около гумифицирующихся корней и пожнивных остатков, а их не так много, чтобы обеспечивать значительную прибавку гумуса.

Внесение органических удобрений в дозах 40 т/га не способствует увеличению содержания гумуса в год внесения, но создает условия для развития микрофлоры, способствует улучшению физических свойств, приводит в дальнейшем к улучшению условий для развития корневой системы и в конечном итоге к увеличению содержания органического вещества в мелиорируемых почвах [2, 13].

До настоящего времени основным критерием диагностики вторичного осолонцевания почв или реставрации солонцового процесса у нас в стране служит повышение содержания в почвах обменного натрия. За рубежом для этих целей используют величину $SAR = C_{Na}/\sqrt{(C_{Ca} + C_{Mg})/2}$, где C_{Na}, C_{Ca}, C_{Mg} – концентрации Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} в ммоль(экв)/л в фильтрате из насыщенных водой паст. Увеличение содержания в почвах обменного натрия может быть связано и с развитием вторичного засоления почв.

Для развития солонцового процесса должны существовать условия, позволяющие коллоидным частицам находиться в пептизированном состоянии и перемещаться вниз по профилю. О склонности илистой фракции к пептизации можно судить на основе прямого определения этого показателя, но существующие методы определения трудоемки и имеют плохую воспроизводимость. Косвенно оценить способность илистой фракции к пептизируемости можно по кинетике набухания [11]. Наличие задержки на кривых набухания – гово-

Таблица 3. Изменение содержания гумуса при распашке и мелиорации солонцов

Район исследований, почвы	Тип обработки, возделываемые культуры	Глубина, см	Содержание гумуса, %		Количество лет, прошедшее после распашки	Содержание гумуса в распаханых и мелиорированных солонцах, %	Литературный источник
			в целинной почве	сразу после мелиоративной вспашки			
Волгоградская обл. Светло-каштановая	Отвальная вспашка на 25–27 см с почвоуглублением на 40 см, однолетние культуры	0–20	1.90	1.48	14	1.37	[13]
		20–30	1.75	1.94	14	1.61	
		30–50	1.34	1.93	14	1.67	
	Трехъярусная вспашка на 40–45 см, однолетние культуры	0–10	2.43	1.65	14	1.58	
		10–20	2.43	1.36	14	1.58	
		20–30	1.58	1.52	14	1.48	
		30–40	0.93	1.23	14	1.21	
		40–50	0.93	0.93	14	0.71	
	Плантажная вспашка на 50–55 см, однолетние культуры	0–10	2.43	1.48	14	1.65	
		10–20	2.43	1.24	14	1.65	
		20–30	1.58	1.56	14	1.33	
		30–40	0.93	1.61	14	1.25	
		40–50	0.93	1.50	14	0.59	
Ростовская обл., темно-каштановая	Отвальная вспашка, многолетние травы	0–10	3.12	3.08	10	2.78	[2]
		10–20	2.34	2.46	10	2.78	
		20–30	1.55	1.68	10	1.61	
		40–50	0.83	1.03	10	1.11	
	Трехъярусная на 40–50 см, многолетние травы	0–10	3.12	2.90	10	3.31	
		10–20	2.34	2.48	10	2.78	
		20–30	1.55	1.41	10	1.84	
		40–50	0.83	0.89	10	1.14	
	Плантажная на 40–45 см	0–10	3.12	1.90	10	2.71	
		10–20	2.34	1.59	10	2.18	
		20–30	1.55	1.70	10	1.64	
		40–50	0.83	0.84	10	1.19	
Саратовская обл., Малоузенский стационар, каштановая	Плантажная на 35 см с почвоуглублением на 20 см + орошение (1000 $м^3$ в год), однолетние культуры	0–10	3.00	2,31	7	2.4	[12, 27]
		10–20	1.85	2.29	7	2.4	
		20–30	1.39	2.01	7	2.03	
Саратовская обл. Джаныбекский стационар, светло-каштановая	Плантажная вспашка, лесополоса	0–10	1.91	Нет данных	38	1.66	[5]
		10–20	1.50	»		1.66	
		20–30	0.99	»		1.23	
		30–40	0.74	»		0.99	
		40–50	0.56	»		0.80	

рит о способности почвенной массы к пептизации. На основе расчета балла В можно оценить наличие физико-химических условий для протекания солонцового процесса [35].

Оценка степени выраженности солонцового процесса по методикам Хитрова, Грачева, Корнблюма показала, что в обследованных мелиорированных почвах нет условий для протекания солонцового процесса. Об этом свидетельствует отсутствие задержки набухания ($\Delta\tau$), характерное для солонцового горизонта и значение показателя физико-химических условий балла В = 1 [20–22, 34].

При переводе солонцовых территорий в залежь без предварительного подсева многолетних трав, зарастание пашни может быть достаточно длительным с последовательной сменой растительных сообществ. Если размер поля невелик (несколько десятков гектаров), то зарастание может происходить быстрее, чем на полях площадью 200–300 га. Отмечалось, что после распашки остепненных солонцов при переходе в залежное состояние на них полностью не восстанавливается тот растительный покров, который свойственен целинным почвам. Это приводит к неравномерности (пятнистости) при зарастании полей. Незакрытая растительностью поверхность почв легко подвергается ветровой и водной эрозии. Выпас скота на молодых залежах с неустоявшимся растительным покровом приводит к быстрой порче поверхности почв, не закрепленной корнями растений, и, как правило, к деградации почвенного покрова [24, 33].

Постепенно увеличивается видовое разнообразие растительного покрова, возрастает количество надземной фитомассы [26]. По данным исследований Варламова с соавт. [9], на залежном светлом постагрогенном солонце Саратовской области, находящемся 50 лет в залежном состоянии, сформировался растительный покров аналогичный целинным почвам.

В том случае, если с использованием глубоких обработок осваивались почвы с залеганием карбонатов выше 40 см, в залежных почвах можно обнаружить окарбоначивание верхнего слоя почв. С одной стороны данный процесс может тормозить развитие вторичного осолонцевания почв, в то же время окарбоначивание может приводить к формированию глыбистой структуры пахотного горизонта. Наличие карбонатов в пахотном горизонте необходимо учитывать при возделывание сельскохозяйственных культур.

В залежных солонцах не стоит ожидать значительного увеличения содержания органического вещества. Это связано с тем, что количество корневых остатков в залежных почвах сухостепной зоны меньше по сравнению с количеством корней в целинных и пахотных почвах. В целинных почвах основная масса корней дикорастущих растений сосредоточена в гумусово-аккумулятивном горизонте светло-каштановых почв и гумусово-элювиальном в солонцах. С глубиной количество корней уменьшается, особенно резко в солонцах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вовлечение значительных площадей солонцовых земель в сельскохозяйственное производство в 70–80 гг. прошлого века у нас стране происходило по следующим причинам: 1) по продуктивности пашни мы отставали от развитых стран мира в 2–3 раза. Для производства необходимого количества сельхозпродукции приходилось вовлекать в пашню все новые и новые земли, в том числе малопродуктивные и трудноосваиваемые; 2) в некоторых районах нашей страны, в почвенном покрове эта группа почв преобладала; 3) государство финансировало проведение мелиоративных мероприятий.

Мелиорация солонцов позволила в ряде регионов решить проблему с кормами для животноводства, увеличить урожай зерновых культур. В то же время, использование мелиоративных приемов не всегда приводило к запланированному увеличению продуктивности почв, что чаще всего было связано с нарушениями технологии мелиорации и неправильным использованием мелиорированных земель.

Выведенные из сельскохозяйственного оборота мелиорированные солонцы сухостепной зоны в течение 10 и более лет после проведения глубоких мелиоративных вспашек во многих случаях сохраняют свойства, приобретенные ими под действием мелиорации. Солонцовый процесс в них не возобновляется, но может развиваться процесс окарбоначивания. В силу производственной необходимости, заброшенные мелиорированные солонцы могут вовлекаться в сельскохозяйственное производство. Это может быть особенно актуально в районах, где солонцовый покров является основным и единственным объектом для земледельческого использования.

Вовлечение этой группы земель в сельскохозяйственное производство не должно носить массового характера, как это было в 1970–80-х годах. Необходимо учесть все новое, что появилось в земледелии. В последнее время много внимания уделялось развитию адаптивно-ландшафтных систем земледелия применительно к различным агроэкологическим группам земель: плакорным, эрозионным, переувлажненным, засоленным и солонцовым в пределах провинций природно-сельскохозяйственных зон [16]. Именно эти подходы необходимо использовать при вовлечении ранее мелиорированных солонцовых земель в сельскохозяйственное производство.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота / Под. ред. А.Л. Иванова. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 405 с.
2. *Бабушкин В.М., Баранов А.И.* Мелиорация темно-каштановых солонцовых почв южного региона России. Новочеркасск, 2007. 211 с.
3. Базовые шкалы свойств морфологических элементов почв. Методическое руководство по описанию почв в поле. М., 1982. 55 с.
4. *Базыкина Г.С.* Водный режим и водный баланс мелиорируемых почв в культурных биогеоценозах // Биогеоценотические основы освоения полупустыни Северного Прикаспия. М.: Наука, 1974. С. 63–146.
5. *Базыкина Г.С., Титова Н.А.* Изменение органического вещества почв солонцового комплекса Северного Прикаспия под влиянием лесомелиорации // Почвоведение. 1993. № 1. С. 19–26.
6. *Большаков А.Ф.* Изменение **по**чвообразовательного процесса в солончаковых солонцах при искусственном нарушении их профиля // Почвоведение. 1975. № 10. С. 86–96.
7. *Вадюнина А.Ф.* Агрофизическая и мелиоративная характеристика каштановых почв юго-востока европейской части СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 326 с.
8. *Варламов Е.Б., Чижикова Н.П., Лебедева М.П., Чурилин Н.А.* Эволюция верхнего горизонта солонца постагрогенного светлого Прикаспийской низменности по количественному распределению минералов различных гранулометрических фракций // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 2017. № 88. С. 96–120.
9. *Виленский Д.Г.* Основные способы мелиорации засоленных почв по американским и венгерским данным // Солонцы Заволжья. Мат-лы изысканий, исслед. и проект. ирригации Заволжья. М.-Л.: Изд-во ВАСХНИЛ, 1937. Вып. VII. С. 212–227.
10. *Воробьева Л.А.* Теория и методы химического анализа почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 136 с.
11. *Грачев В.А., Корнблюм Э.А.* Кинетика набухания и набухаемость почв солонцовых комплексов и солодей Заволжья // Почвоведение. 1982. № 1. С. 55–66.
12. *Данилова Е.А.* Мелиорация солонцов засушливого Поволжья Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1981. 104 с.
13. *Дегтярева Е.Т., Дягилева Н.М., Панкова А.Д.* Влияние химических мелиорантов на гумусовое состояние и физико-химические свойства солонцовых почв Нижнего Поволжья // Науч. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Теоретические основы мелиорации и опыт использования солонцовых почв. М., 1991. С. 179–183.
14. *Калиниченко В.П., Шаршак В.К., Миронченко С.Ф., Черненко В.В., Ладан Е.П., Генев Е.Д., Илларионов В.В., Удалов А.В., Удалов В.В., Киппель Е.В.* Изменение свойств почв солонцового комплекса через 30 лет после мелиоративных обработок // Почвоведение. 2014. № 4. С. 490–507.
15. *Кирюшин В.И.* Солонцы и их мелиорация. Алма-Ата: Кайнар, 1976. 174 с.
16. *Кирюшин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов. М.: Колос, 2011. 443 с.
17. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
18. *Климанов А.В., Воробьева Л.А., Новикова А.Ф., Конюшкова М.В.* Природа щелочности целинных и антропогенно-преобразованных солонцов Северной Калмыкии // Почвоведение. 2014. № 4. С. 433.
19. *Корнблюм Э.А., Сулейманов Г.Г., Валиева К.Э.* Особенности строения и первичная классификация почв солонцовых комплексов, измененных мелиоративной вспашкой // Научн. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Почвенные и агрохимические исследования с применением ЭВМ. М., 1981. С. 106–124.
20. *Любимова И.Н.* Агрогенно-преобразованные почвы солонцовых комплексов сухостепной и полупустынной зон. Автореф. дис. ... докт. с.-х. н. М., 2003. 48 с.
21. *Любимова И.Н., Горобец А.В., Аксенов А.В., Хан В.В.* К оценке рисков вторичного осолонцевания и реставрации солонцового процесса в распаханных и мелиорированных почвах солонцовых комплексов // Почвоведение. 2012. № 5. С. 594–600.
22. *Любимова И.Н., Мотузов В.Я., Бондарев А.Г.* Современные тенденции изменения свойств целинных и постирригационных почв солонцовых комплексов Приволжской гряды // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1260–1269.
23. Мелиорация солонцов в СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 563 с.
24. Нижнее Поволжье. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 134 с.
25. *Новикова А.Ф., Конюшкова М.В.* Антропогенная трансформация почв Северных Ергеней (исследования на первом опытном участке Аршань-Зельменского стационара) // Почвоведение. 2013. № 3. С. 268.
26. *Новикова Н.М., Конюшкова М.В., Уланова С.С.* Восстановление растительности на мелиорированных солонцовых почвах Приергининской равнины (Республика Калмыкия) // Аридные экосистемы. 2018. № 3. С. 67–80.
27. *Пак К.П.* Солонцы СССР и пути повышения их плодородия. М.: Колос, 1975. 380 с.
28. Полевой определитель почв России. М., 2008. 182 с.
29. Почвенно-экологические проблемы в степном земледелии (Предложения по рациональному использованию почвенных ресурсов Волгоградской области). Пущино, 1992. 153 с.
30. Рекомендации по мелиорации солонцовых земель. М.: Колос, 1983. 46 с.
31. *Салпагарова И.А.* Морфонометрический метод изучения мелиорированных солонцовых почв и его ис-

пользование для оценки эффективности работы мелиоративных орудий. Автореф. дис. ... канд. с.-х. н. М., 1990. 24 с.

32. *Скачков И.В.* Агрофизические свойства мелиорированных солонцов Нижнего Поволжья // Научн. тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. Изменение агрофизических свойств почв под воздействием антропогенных факторов. М., 1990. С. 75–83.
33. *Строков А.С., Конюшкова М.В., Уланова С.С., Чемидов М.М., Маштыков К.В., Келеметов Э.М.* Оценка последствий перевыпаса на пастбищах Республики Калмыкия // АПК: экономика, управление. 2017. № 4. С. 75–82.
34. *Хан В.В.* Диагностика солонцового процесса в целинных и агрогенно-измененных почвах солонцовых комплексов разных регионов. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 2013. 24 с.
35. *Хитров Н.Б.* Выбор диагностических критериев существования и степени выраженности солонцового процесса в почвах // Почвоведение. 2004. № 1. С. 18–30.
36. *Bennett D. Rodney, Hecker Frank J., Entz Toby, Greenlee Graeme M.* Salinity and sodicity of irrigated Solonetzic and Chernozemic soils in east-central Alberta // Can. J. Soil. Sci. 2000. V. 80. № 1. P. 117–125.
37. *Belic M., Neic L., Dimitrijevic M., Petrovic S., Ciric V., Pekec S., Vasin J.* Impact reclamation practices on the content and qualitative composition of exchangeable bazecations of the solonetz soil // Australian J. Crop Science. Southerm Cross Publisher. 2012. V. 6. № 10. P. 1471–1480.
38. *Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L.* Saline and Sodic Soils. Principles-Dynamics-Modeling. Spinger-Verlag, Berlin, 1982. 236 p.
39. *Curtin D.* Possible role of aluminum in stabilizing organic matter in particle size fractions of Chernozemic and Solonetizic soils // Can. J. Soil. Sci. 2002. V. 82. № 2. P. 265–268.
40. *Mathison M.N., Chanasyk D.S., Naeth M.A.* Longevity of deep ripping effects on Solonetzic and associated soils // Can. J. Soil. Sci. 2002. V. 82. № 2. P. 259–264.
41. *Meng Q.F., Li D.W., Zhang J.I., Zhou L.R., Ma X.F., Wang H.Y., Wang G.C.* Soil properties and corn (*Zea mays* 1.) production under manure application combined with deep tillage management in solonetzic soils of songnen plain, northeast China // J. Integrative Agriculture. 2016. V. 15. № 4. P. 879–890.
42. *Szabolcs I.* Prospects of soil salinity for the 21st century // Agrokemiaes Talajtan. 1994. V. 43(1–2). P. 5–23.
43. *Sigmond A.A.* The alkali soil in Hungarian and their reclamation // Soil Sci. 1924. V. 18. № 5.
44. *Toth T., Jozefaciuk G.* Physicochemical properties of a solonetzic toposequence // Geoderma. 2002. V. 106. № 1. P. 137–159.
45. *Zhang T., Zhan X., He J., Feng H., Kang Y.* Salt characteristics and soluble cations redistribution in an impermeable calcareous saline-sodic soil reclaimed with an improved drip irrigation // Agricultural Water Management. 2018. V. 197. P. 91–99.

Possibility and Feasibility of Returning the Formely Reclaimed Solonetz Lands to Agricultural Use (Review)

I. N. Lyubimova[1, *] and I. A. Salpagarova[2]

[1]Dokuchaev Soil Science Institute, per. Pyzhevskii, 7, p. 2, Moscow, Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia
**e-mail: in080643@yandex.ru*

Trends of changes were analyzed in the properties of solonetz complexes of dry-steppe and semi-desert zones caused by land reclamation, agricultural use, and the withdrawal of reclaimed land from agricultural circulation; author's data and publications served as sources of information. An expert forecast is given on the current state of reclaimed solonetzes of laylands and the feasibility of their involvement in agriculture. The following reclaimed soils are discussed: solonetzic agrozem (Sodic Protosalic Cambisol (Loamic, Aric, Protocalcic), agrozem carbonate-textural (Eutric Cambisol (Loamic, Aric, Protosalic)), (Endocalcaric Luvisol (Loamic, Aric, Cutanic, Protosodic)), agrosolonetz (Eutric Cambisol (Siltic, Aric) and meadow-chestnut (Haplic Kastanozems). Solonetzes under layland with non-disturbed nitric horizon restore their structure and properties after a short period of time, and become close to virgin soil. In solonetzes of the dry-steppe zone, if natric horizon was destroyed and disintegrated, the solonetz profile is not restored. They retain for a long time their properties acquired under the effect of land reclamation.

Keywords: melioration of solonetzes, agrosolonetz, solonetzic agrozem, layland

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1111–1120

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.41/43:631.58

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЧВ В ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ПОСЕВА

© 2020 г. В. К. Дридигер[a, *], А. Л. Иванов[b], В. П. Белобров[b], О. В. Кутовая[b]

[a]*Северо-Кавказский ФНАЦ, ул. Никонова, 49, Ставропольский край, Шпаковский р-н, Михайловск, 356241 Россия*

[b]*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия*

*****e-mail: dridiger.victor@gmail.com*

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.
После доработки 20.02.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

На европейской территории России применение на типичных и обыкновенных черноземах технологии прямого посева за 4 года приводит к значимому росту содержания органического вещества в регионах с достаточным увлажнением и тенденцией к росту в регионах с недостаточным увлажнением (Ставропольский край и др.). Наблюдается также тенденция к увеличению содержания подвижного фосфора и обменного калия за 4 года проведения опыта без обработки почв. Урожайность сельскохозяйственных культур и рентабельность производства при длительном (более 7 лет) применении прямого посева приблизительно на 30%выше, чем при использовании традиционных технологий. Применяемые в борьбе с сорняками нормы расхода глифосат-содержащих гербицидов можно существенно уменьшить при использовании в посеве почвопокровных культур, современных биохимических методов и при строгом соблюдении технологии применения гербицидов. В совокупности это приводит к увеличению количества и видового разнообразия микроорганизмов, способных подавлять патогенную микрофлору, существенно сокращая поражение растений болезнями и вредителями.

Ключевые слова: деградация почв, эрозия, биоразнообразие, глифосат, урожайность, микроорганизмы, мезофауна

DOI: 10.31857/S0032180X20090038

ВВЕДЕНИЕ

Плодородие пахотных земель в стране вызывает большую тревогу, особенно наиболее продуктивных почв России – черноземов. Это вызвано деградацией таких свойств почв, определяющих их продуктивность, как содержание гумуса [18], доступных для растений азота, фосфора и калия [9, 15, 30], структура и водоустойчивость микро- и макроагрегатов [28, 29], равновесная плотность [32] и др. По данным государственного агрохимического центра “Ставропольский” с начала наблюдений за плодородием почвы в 1964–1968 гг. и по настоящее время отмечается постоянное уменьшение содержания органического вещества (**ОВ**) в пахотном слое почв, преимущественно черноземного типа. Так, при первом туре обследования низкое содержание ОВ наблюдалось на 24.2% площади пашни, среднее – 74.9%, а в настоящее время, наоборот, 88.6% пашни характеризуется низким и только 10.3% – средним уровнем содержания (табл. 1).

При этом резкое уменьшение содержания ОВ в почвах наблюдается с 1976 г., когда в крае на больших площадях начали внедрять чистые пары. Одновременно происходило уменьшение содержания в почве доступных для растений фосфора, калия и других элементов питания.

Называются разные причины снижения плодородия: недостаточное внесение минеральных удобрений, на приобретение которых нет средств, отсутствие органических удобрений из-за резкого сокращения поголовья животных, сокращение площади посева кормовых культур, особенно многолетних трав, что происходило на фоне увеличения площади чистых паров. В Ставропольском крае, при рекомендованных научными учреждениями 600–650 тыс. га чистого пара, его площадь достигала 842 тыс. га или 21% пашни (табл. 2).

При этом площадь кормовых культур с 1990 г., когда в крае было развито животноводство, сократилась более чем в 10 раз, а многолетние травы в настоящее время занимают всего 0.8% пашни. Одновременно площадь посева зерновых культур увеличилась в 1.4 раза, составив в структуре пашни 62%, из которых 74% занимает озимая пшеница.

Таблица 1. Динамика содержания органического вещества в почвах пашни Ставропольского края, %

Содержание органического вещества	Цикл обследования							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
	1964–1968	1968–1976	1976–1983	1983–1988	1988–1993	1993–1998	1998–2003	2010–2015
Низкое: <4%	24.2	30.3	63.7	80.5	81.6	84.7	91.1	88.6
Среднее: 4.1–6.0%	74.9	67.8	35.9	18.2	17.4	15.3	8.1	10.3
Высокое: >6%	0.9	1.9	0.4	1.3	1.0	0.0	0.8	1.1
Среднее	3.17	3.10	2.97	2.87	2.83	2.71	2.64	2.77

Таблица 2. Динамика площади посева сельскохозяйственных культур и чистого пара в Ставропольском крае, тыс. га (по данным Управления Росреестра по Ставропольскому краю)

Культура	Год							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017	2018
Чистый пар	648.7	650.0	758.7	841.6	811.1	692.9	650.6	595.2
Зерновые	1792.2	1711.3	1748.0	1965.3	2138.9	2351.1	2403.5	2469.8
Пшеница	1282.5	1123.3	1178.5	1522.5	1730.7	1782.9	1730.3	1821.8
Кормовые	1290.2	1065.1	610.2	315.9	216.5	161.8	137.5	124.6
Многолетние травы	360.8	316.5	235.9	112.9	76.9	41.8	36.0	33.2

Таблица 3. Доля чистых паров в пашне хозяйств Ипатовского района Ставропольского края, применяющих разные технологии возделывания, %

Сельхозпредприятие	Год							Среднее
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
ООО “Барханчакское”	55.5	8.3	27.5	37.7	37.5	32.4	30.6	34.1
СПК “Кировский”	24.4	18.0	18.4	14.9	18.4	18.6	14.5	19.1
ЗАО “Октябрьское”	22.8	13.5	18.7	18.4	16.8	15.6	10.6	17.2
СППК “Софиевский”	18.8	18.1	16.6	17.3	14.7	12.5	8.3	15.9
ООО “Добровольное”	0	0	0	0	0	0	0	0
СХП “Урожайное”	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. ООО “Добровольное” и СХП “Урожайное” работают по технологии прямого посева, остальные хозяйства – по традиционной технологии.

Вместе с тем основной причиной ухудшения почвенного плодородия является эрозия [1], которая особенно сильно проявляется в паровых полях. По этой причине около 50% площади земель Ставропольского края в разной степени подвержены водной эрозии и дефляции [8].

Следует отметить, что чистые пары в 70–80-ые годы прошлого столетия были рекомендованы научными учреждениями в степных районах, где осадки ограничены и возделываемые растения страдают от недостатка влаги. В течение года чистые пары накапливают влагу в почве, что позволяет в засушливых условиях получать стабильные по годам урожаи возделываемых культур [23]. В засушливой зоне Ставропольского края были рекомендованы и освоены короткоротационные полевые севообороты с чистым паром: пар – озимая пшеница, или пар – озимая пшеница – озимая пшеница, в которых под чистые пары отводилось до 50% пашни [22].

В то же время возделывание сельскохозяйственных культур по технологии прямого посева (**ПП**) позволяет обходиться без чистых паров. Так, в Ипатовском районе, расположенном в засушливой зоне, сельскохозяйственные предприятия, возделывающие полевые культуры по традиционной технологии, ежегодно имеют в структуре пашни в среднем от 15.9 до 34.1% чистых паров. В ООО “Добровольное” и ООО СХП “Урожайное”, работающих по технологии ПП в течение 13-ти лет, чистые пары отсутствуют (табл. 3).

Отказ от чистых паров при возделывании сельскохозяйственных культур по технологии ПП в засушливых районах обусловлен большим накоплением и лучшим сохранением влаги в почве. В наших исследованиях в Ставропольском крае во время вегетации растений, возделываемых по этой технологии, в метровом слое почвы содержится на 19.6–32.9% больше продуктивной влаги, чем по технологиям с обработкой почвы [12], или дополнительно на 1 га накапливается и сохраняется от 140 до 230 м^3 воды, которая расходуется растениями на формирование урожая. Большему накоплению влаги в почве способствуют растительные остатки предшествующих культур на ее поверхности, которые зимой накапливают больше снега, а летом существенно уменьшают испарение влаги с поверхности почвы.

Количество растительных остатков зависит от вида растений и накопления ими надземной биомассы. В Западной Сибири в среднем за год на поверхность почвы поступает 1.8–2.1 т/га растительных остатков [17], на Северном Кавказе накапливается в 2–3 раза больше – от 5.6 до 6.3 т/га [14].

Такое количество растительных остатков на поверхности, а также улучшение структуры почвы [6] надежно защищают ее от ветровой [11] и водной эрозии, тогда как обработанная по рекомендованным технологиям почва с заделкой пожнивных остатков в большей степени подвержена процессам дефляции и водной эрозии.

Цель работы – изучить влияние технологии прямого посева на плодородие почвы, как важного фактора его восстановления и сохранения на основе обобщения результатов многолетних опытов научных аграрных центров и производственных объединений, проведенных на типичных и обыкновенных черноземах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования расположены на территории европейской части России и характеризуют зонально-провинциальные особенности типичных (Haplic Chernozems) и обыкновенных черноземов (Haplic Chernozems) [45] с разными условиями увлажнения в течение года и вегетационного периода. На территории ФГБНУ “Курский ФАНЦ” в Курской области (51°37.8′ с. ш.; 36°15.7′ в. д.) и ФГБНУ НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева в Воронежской области (“Каменная степь” 51°03.4′ с. ш.; 40°44.8′ в. д.) изучали типичные черноземы, в ФГБНУ “Северо-Кавказский ФНАЦ” в Ставропольском крае (45°07.6′ с. ш.; 42°03.3′ в. д.) – обыкновенные. С 2013 г. на опытных полях этих научных центров проводятся многолетние исследования по оценке влияния технологии возделывания сельскохозяйственных культур с обработкой почвы (варианты минимизации обработок) и технологии без обработки (прямой посев) на свойства и продуктивность черноземов.

В опытах в полевых четырехпольных севооборотах выращивали озимую пшеницу, кукурузу и горох, а подсолнечник – только на обыкновенных черноземах. Все пожнивные остатки при прямом посеве оставляли на поверхности почв. Использование удобрений и пестицидов осуществляли в соответствии с рекомендациями для каждой культуры, фоном по вариантам опыта.

Исследования вели также в ООО СХП “Урожайное” Ипатовского (45°49.0′ с. ш.; 42°03.5′ в. д.) и СПК “Архангельский” Буденновского районов Ставропольского края (44°10.3′ с. ш.; 44°32.4′ в. д.), где сельскохозяйственные культуры возделывают только по технологии ПП. Поэтому параллельно изучали почвы полей рядом расположенных хозяйств, на которых применяется рекомендованная научными учреждениями технология с обработкой почвы.

Подвижный фосфор и обменный калий в типичных черноземах определяли по методу Чирикова, в обыкновенных – по Мачигину, содержание ОВ (гумуса) – по Тюрину, равновесную плотность – методом цилиндров. Оценку видового состава и численности мезофауны (дождевых червей) проводили на площадках 50 × 50 см^2 с отбором проб почвы в эклекторы. Статистическая обработка данных выполнена в программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При возделывании сельскохозяйственных культур по технологии ПП на стационаре ФГБНУ “Северо-Кавказский ФНАЦ” за первую ротацию севооборота содержание гумуса в слоях 0–10 и 10–20 см обыкновенного чернозема увеличилось на 0.02 и 0.05 абсолютных процентов, тогда как по традиционной технологии произошло уменьшение этого показателя на 0.04 и 0.02% [12]. Оба показателя находятся в пределах ошибки опыта, но прослеживается тенденция сохранения и улучшения показателей плодородия в технологии ПП.

В типичных черноземах Курской и Воронежской областей эта тенденция выражена в большей степени [9]. В опыте “Курского ФАНЦ” перед закладкой опыта в 2013 г. после уравнительного посева содержание гумуса в среднем на обеих глубинах составляло около 5% и существенно не отличалось по вариантам опыта (табл. 4). Через 4 года наблюдалось увеличение этого показателя по всем способам обработки почвы. Но за четырехлетний период достоверно большая прибавка содержания гумуса в типичных черноземах наблюдалась при прямом посеве и составила 0.65% на глубине 0–10 см и 0.86%, на глубине 10–20 см.

Таблица 4. Влияние способа обработки почвы на содержание гумуса (%) в типичном черноземе в опыте ФГБНУ "Курский ФАНЦ"

Обработка почвы	Слой почвы 0–10 см			Слой почвы 10–20 см		
	2013 г.	2017 г.	+/–	2013 г.	2017 г.	+/–
Отвальная	4.85	5.38	+0.53	4.92	5.42	+0.50
Комбинированная	5.25	5.57	+0.32	5.18	5.62	+0.44
Минимальная	4.96	5.28	+0.32	5.02	5.01	–0.01
Прямой посев	4.96	5.61	+0.65	4.78	5.61	+0.83
$НСР_{0.5\ обработка\ почвы}$	0.31	0.27	–	0.29	0.26	–
$НСР_{0.5\ годы\ исследований}$	–	–	0.24	–	–	0.27

Таблица 5. Влияние способов обработки почвы на запасы гумуса и подвижного фосфора в слое типичного чернозема 0–30 см (ФГБНУ "НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева")

Обработка почвы	Запас гумуса, т/га			Подвижный фосфор, кг/га		
	2013 г.	2017 г.	+/–	2013 г.	2017 г.	+/–
Отвальная	159.6	195.2	+35.6	302.7	402.2	+99.5
Безотвальная	189.1	190.8	+1.7	324.6	423.2	+98.6
Поверхностная	190.8	207.7	+16.9	271.0	384.7	+113.7
Прямой посев	202.0	261.9	+59.9	250.9	447.7	+196.8
$НСР_{0.5\ обработка\ почвы}$	15.7	17.8	–	23.7	28.8	–
$НСР_{0.5\ годы\ исследований}$	–	–	21.6	–	–	31.1

В типичных черноземах "Каменной степи" достоверно большие запасы гумуса через 4 года после закладки опыта также отмечаются при использовании ПП (табл. 5). Аналогичная ситуация наблюдается и по запасам подвижного фосфора, которого в слое почвы 0–30 см увеличилось существенно больше, чем по другим способам обработки почвы, что обусловлено наличием на поверхности растительных остатков, которые после их разложения микроорганизмами способствовали увеличению содержания этого элемента в верхних слоях почвы.

Увеличение содержания органического вещества в черноземах наблюдается и в других почвенно-климатических условиях [7]. В СПК "Архангельский" в течение четырех лет работы по технологии ПП была остановлена эрозия и стабилизировалось содержание гумуса при одновременном увеличении концентрации доступного фосфора с 13 до 21 мг/кг, калия – с 340 до 400 мг/кг [30]. Существенное увеличение содержания доступных элементов питания в почве по этой технологии отмечено и в других сельскохозяйственных предприятиях края [15].

В типичных черноземах "Каменной степи" содержание подвижного фосфора на всех вариантах опыта за 4 года существенно возросло. Но наибольшее увеличение содержания P_2O_5 в слое почвы 0–30 см наблюдалось при ПП (в 1.8 раза), тогда как при разных обработках почв повышение запасов подвижного фосфора было примерно одинаковым – в 1.3–1.4 раза. Самое низкое содержание этого элемента питания было при отвальной и поверхностной обработках, соответственно на 45.5 и 63.0 кг/га меньше, чем при ПП [9].

Содержание обменного калия за этот же период изменилось не столь существенно. Максимальные его запасы характерны для отвальной, минимальные – для поверхностной обработки.

Содержание подвижного фосфора в слое 0–10 см курских типичных черноземов за четыре года существенно уменьшилось по всем вариантам обработок (табл. 6), кроме прямого посева, где снижение было математически недоказуемым. В большей степени уменьшение содержания этого элемента наблюдалось в слое почвы 10–20 см, оставаясь, тем не менее, на уровне, соответствующем высокой степени обеспеченности для зерновых и зернобобовых культур в двадцатисантиметровом слое почв. По содержанию обменного калия ситуация аналогична фосфатам – наблюдалось некоторое уменьшение показателя за 4 года в слое 0–10 см и заметное – в 1.1–1.7 раза – в слое 10–20 см (табл. 7). Обеспеченность обменным калием за 4 года уменьшилась с высокой до средней, причем в большей степени это характерно для слоя 10–20 см.

Таким образом, технология прямого посева способствует росту плодородия почвы путем уве-

Таблица 6. Влияние обработки почвы на содержание подвижного фосфора (по Чирикову, мг/100 г почвы) в типичных черноземах в опыте ФГБНУ “Курский ФАНЦ”

Обработка почвы	Слой почвы 0–10 см			Слой почвы 10–20 см		
	2013 г.	2017 г.	+/–	2013 г.	2017 г.	+/–
Отвальная	17.81	13.40	–4.41	18.42	14.32	–4.10
Комбинированная	17.75	16.18	–1.57	18.47	16.25	–2.22
Минимальная	18.97	16.22	–2.75	18.58	14.30	–4.28
Прямой посев	19.81	19.24	–0.57	20.08	16.80	–3.28
$НСР_{0.5\ обработка\ почвы}$	0.9	0.8	–	1.0	0.8	–
$НСР_{0.5\ годы\ исследований}$	–	–	0.8	–	–	1.1

Таблица 7. Влияние обработки почвы на содержание обменного калия (по Чирикову, мг/100 г почвы) в типичных черноземах в опыте ФГБНУ “Курский ФАНЦ”

Обработка почвы	Слой почвы 0–10 см			Слой почвы 10–20 см		
	2013 г.	2017 г.	+/–	2013 г.	2017 г.	+/–
Отвальная	10.80	7.81	–2.99	10.82	9.83	–0.99
Комбинированная	12.04	11.96	–0.08	14.86	8.70	–6.16
Минимальная	10.62	9.23	–1.39	11.70	7.25	–4.45
Прямой посев	12.17	11.48	–0.69	11.56	6.02	–5.54
$НСР_{0.5\ обработка\ почвы}$	0.6	0.6	–	0.7	0.5	–
$НСР_{0.5\ годы\ исследований}$	–	–	0.8	–	–	1.0

личения содержания в ней не только органического вещества, но и доступных для растений элементов питания, включая минеральные формы азота.

По этой причине в технологии ПП стало возможным даже в засушливых условиях без использования чистого пара получать вполне приемлемые, экономически оправданные урожаи, обеспечивающие рентабельное ведение сельскохозяйственного производства. В СХП “Урожайное” и ООО “Добровольное” урожайность подсолнечника в среднем за 2012–2018 гг. составила 2.63 и 2.07 т/га, зерна кукурузы получено 4.89 и 4.94 т/га, гороха – 2.21 и 2.39 т/га, тогда как в соседних хозяйствах района, работающих по традиционной технологии, урожайность подсолнечника находилась в пределах 1.52–1.63 т/га, гороха – 2.08–2.13 т/га, а возделывание кукурузы по традиционной технологии без орошения не представляется возможным.

Урожайность озимой пшеницы в этих хозяйствах (“Урожайное” и “Добровольное”) по непаровым предшественникам, в среднем за эти же годы составила 4.79 и 3.92 т/га, тогда как в сельскохозяйственных предприятиях района, которые сеют ее в основном по чистым парам, урожайность вполне сопоставима и находится в пределах от 4.06 до 4.80 т/га. С учетом положительного влияния технологии ПП на свойства почв за 7 лет в ООО “Добровольное” и СХП “Урожайное” с 1 га пашни получено в среднем 3.75 и 4.37 тыс. зерновых единиц, тогда как у граничащих с ними сельскохозяйственных предприятиях района – лишь 2.84–3.26 тыс. зерновых единиц.

Одним из важных показателей, характеризующих восстановление свойств почв, является способность агроэкосистемы противостоять сорнякам и патогенным организмам без применения химических средств защиты растений. В этом отношении технологию без обработки почв считают неприемлемой из-за применения в борьбе с сорняками гербицидов сплошного действия из группы глифосатов, а также большого количества растительных остатков на поверхности почв, являющихся источником патогенных микроорганизмов, поражающих растения.

Действительно, на начальном этапе освоения технологии невозможно обойтись без глифосатов. Однако при строгом выполнении технологии применения гербицида расход глифосатов можно существенно сократить. В первую очередь необходимо устранить жесткость воды, уменьшить расход рабочей жидкости до 25 л/га и за счет более высокой концентрации препарата в 2 раза увеличить его гербицидную активность. Применение при опрыскивании активных аминокислот позволяет уменьшить норму расхода еще в 1.5–2.0 раза [20]. Об этом свидетельствует опыт работы хозяйств Ставропольского края, которые в течение 8–10 лет следуют этой технологии.

Таблица 8. Количество и живая масса дождевых червей в почве после восьми лет применения технологии прямого посева в СХП “Урожайное” (Ипатовский район Ставропольского края)

Технология	Культура	Количество, экз./м^2	Живая масса, г/м^2
Прямой посев	Озимая пшеница	20	19.3
	Озимый рапс	37	47.7
	Кукуруза	69	62.4
	Подсолнечник	83	39.2
Традиционная	Озимая пшеница	0	0
	Подсолнечник	4	1.6
$НСР_{05}$		5	3.8

Проведенными исследованиями установлено [16, 39], что применение глифосатов не приводит к существенному изменению или уменьшению микробного сообщества в почве. Больше того, глифосат вызывает некоторое увеличение эмиссии CO_2 в почвах [31, 38], что по мнению авторов может свидетельствовать об использовании гербицида или его производных в качестве составляющих компонентов питательного субстрата для почвенных микроорганизмов, а также устойчивости микробного сообщества к глифосату.

Именно этим объясняется отсутствие остаточного количества глифосат-кислоты в почве и получаемой продукции [26], что подтверждается существенным увеличением количества представителей почвенной фауны, например, дождевых червей на полях с использованием ПП по сравнению с традиционными технологиями (табл. 8). В необрабатываемой почве обитало 4 вида дождевых червей – *Aporrectodea caliginosa*, *A. rosea*, *Lumbricus terrestris*, *L. rubellus*, тогда как на соседних полях с традиционной технологией встречался только один вид – *A. Caliginosa*, что свидетельствует об экологической чистоте и безопасности среды обитания почвенной биоты, стабильности и устойчивости агроэкосистемы и, в итоге, сохранении и улучшении плодородия почвы при использовании технологии ПП.

Кроме химических, в технологии ПП имеются эффективные агротехнические приемы борьбы с сорняками, из которых важнейшим является севооборот. При чередовании двух теплолюбивых и двух холодостойких культур численность сорняков уменьшается в 13 раз, при чередовании в севообороте двух теплолюбивых с одной культурой холодного времени произрастания засоренность посевов снижается в 2.0–2.5 раза [41, 42]. В то же время посев одной и той же культуры 2 года подряд приводит к резкому увеличению засоренности посевов.

Эффективным способом борьбы с сорняками в технологии ПП являются растительные остатки на поверхности почвы. Одна тонна пожнивных остатков озимой пшеницы, равномерно распределенных на 1 га, уменьшает количество сорняков на 14%. Бороться с сорняками можно также сроками посева, нормами высева семян, а также посевом промежуточных почвопокровных растений после уборки и до посева следующей культуры севооборота [33, 43].

Уменьшение расхода гербицидов и уменьшение засоренности посевов становится возможным благодаря очищению почвы от семян сорняков по мере освоения технологии ПП. Исследованиями Сибирского НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства установлено, что за 3 года применения технологии ПП количество семян сорняков в слое почвы 0–10 см уменьшилось с 95.0 до 39.6 млн шт./га, тогда как при традиционной обработке почвы их количество увеличилось с 98.3 до 127.8 млн шт./га [19]. По этой причине количество сорняков в посевах озимой пшеницы перед применением гербицида в технологии с обработкой почвы составило 1233–1596 шт./м^2, тогда как в технологии ПП их было 85–327 шт./м^2 [4].

Уменьшение “банка” семян сорняков в почве и засоренности посевов в технологии без обработки почв объясняется созданием благоприятных условий (в первую очередь по влажности) для прорастания семян сорняков, находящихся в верхнем слое почвы. В первые годы освоения технологии семена интенсивно прорастают, что и является причиной существенного увеличения их количества в это время. При эффективной борьбе сорняки уничтожаются до их обсеменения, что приводит соответственно, к сокращению засоренности посевов, так как находящиеся в более глубоких слоях почвы семена сорняков прорасти и дать всходы не могут и погибают. Кроме того, растительные остатки на поверхности почвы нарушают контакт семян с почвой и сдерживают прорастание и рост сорняков через физическое подавление, аллелопатические воздействия, уменьшение проникновения солнечного света через раститель-

ные остатки и физическое блокирование появления всходов.

Важную роль растительные остатки играют в сокращении поражения растений болезнями и вредителями. По данным зарубежных авторов растительные остатки, остающиеся на поверхности почвы в технологии ПП, благоприятствуют росту популяции микроорганизмов в верхнем (0–10 см) слое почвы [35], которые подавляют патогенную микрофлору, тем самым снижая заболеваемость растений и даже поражение вредителями [40].

Аналогичные данные получены и отечественными исследователями на примере посевов яровой пшеницы, которые меньше заселялись хлебной полосатой блошкой, пьявицей красногрудой и повреждались внутристеблевыми вредителями. При этом поражение обыкновенной корневой гнилью, септориозом, мучнистой росой и заселенностью колосьев пшеницы личинками пшеничного трипса, не имело существенных различий от технологии, основанной на глубоком рыхлении почвы [5]. Обусловлено это тем, что в технологии ПП, благодаря сохраняющимся растительным остаткам, не только увеличивается количество почвенных микроорганизмов, но и наблюдается рост его разнообразия. Существенно возрастает численность бактерий – антагонистов фитопатогенов увеличивается плотность нематод, которые подавляют развитие патогенной микрофлоры [46], чем сокращают поражение растений вредными организмами.

Севооборот играет также важную роль в регуляции количества и качества почвенных микроорганизмов. В условиях монокультуры наблюдается развитие наиболее агрессивных популяций почвенных фитопатогенов, что приводит к поражению растений болезнями и вредителями и соответственно существенному снижению урожайности. И наоборот, чем больше разнообразие растений в севообороте, тем больше биоразнообразие почвенной микрофлоры, антагонистов и хищников вредных организмов в почве агроценоза [27].

В технологии ПП, благодаря большему накоплению влаги в почве, имеется возможность возделывания более широкого ассортимента сельскохозяйственных культур, чем в традиционных технологиях с обработкой почвы, особенно в засушливых регионах [13]. Увеличение разнообразия культур при технологии ПП можно достичь посевом пожнивных почвопокровных культур, которые произрастают в промежутке между основными культурами севооборота. Промежуточные почвопокровные культуры корневой системой разрыхляют почву, отмершие части растений и корневые экссудаты обогащают ее органическим веществом, надземная биомасса подавляет сорные растения. Бобовые культуры, применяемые в качестве почвопокровных, увеличивают содержание в почве биологического азота, капустные (рапс, редька, горчица) уменьшают поражение растений пшеницы корневыми гнилями. Донник, благодаря наличию в нем кумарина, вызывает гибель конидий корневой гнили пшеницы, зерновой и картофельной нематоды, проволочника, ложнопроволочника и других возбудителей болезней и вредителей растений.

Для обеспечения благоприятной фитосанитарной обстановки в различных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур применяется целый комплекс биологических средств защиты растений. Их использование позволяет защитить посевы от комплекса болезней и вредителей, бороться с заразихой подсолнечника, улучшать азотное, фосфорное и калийное питание растений, повышать устойчивость растений к засухе и другим неблагоприятным явлениям [20, 21]. В некоторых странах зарегистрированы и применяются биологические гербициды, “действующим веществом” которых являются микроорганизмы, поражающие определенные виды сорных растений [37, 44]. Поиск таких микроорганизмов, способных поражать сорняки, в том числе такие злостные, как осот розовый (*Cirsium arvense* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.) и другие, ведется и в нашей стране [2, 10].

Для повышения эффективности защиты растений от вредных организмов биологические препараты следует применять комплексно на всей возделываемой площади, начиная с обеззараживания растительных остатков после уборки урожая. Но, в отличие от традиционной технологии, где ставится задача скорейшего разложения растительных остатков различными микроорганизмами [3], в технологии ПП наоборот, растительные остатки необходимо сохранять на поверхности почвы как можно дольше, так как они играют очень важную роль в защите почв от эрозии и восстановлении их плодородия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Площади почв в мире, на которых возделываются сельскохозяйственные культуры по технологии ПП, постоянно увеличиваются примерно на 10 млн га в год, занимая в настоящее время около 157 млн га. Прямой посев используется на различных по генезису почвах, как во влажных, так и более засушливых условиях и в силу своей специфики, приближенной к природным условиям, способствует повышению устойчивости агроэкосистемы в целом, улучшению и восстановлению плодородия ее главного компонента – почв. Применение в технологии прямого посева плодосменных севооборотов, сохранение растительных остатков на поверхности почвы и посев промежуточных почвопокровных культур позволяет сохранить и повысить плодородие почвы,

увеличить разнообразие почвенной биоты, создать благоприятные условия для подавления патогенных микроорганизмов, повысить экологическую устойчивость агроценоза, используя биологические методы. Увеличение содержания ОВ в типичных и обыкновенных черноземах, улучшение агрохимических и микробиологических показателей, а также повышение урожайности сельскохозяйственных культур и рентабельности производства в условиях недостатка влаги, свидетельствуют о возможности и необходимости более широкого применения технологии прямого посева. Именно возможность восстановления деградированных почв и повышения плодородия пахотных земель должна стать катализатором широкого внедрения прямого посева в земледелие России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-16-00053 с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антонов С.А., Есаулко А.Н., Сигида М.С., Голосной Е.В.* Оценка развития процессов водной эрозии на территории агроландшафтов Ставропольского края и их влияние на продуктивность // Вестник АПК Ставрополья. 2018. № 1(29). С. 67–72.
2. *Берестецкий А.О.* Перспективы разработки биологических и биорациональных гербицидов // Вестник защиты растений. 2017. № 1(91). С. 5–12.
3. *Богатырева Е.В.* Влияние биопрепаратов на темпы разложения соломистых остатков озимой пшеницы и продуктивность чернозема обыкновенного в зоне неустойчивого увлажнения // Земледелие. 2015. № 8. С. 34–36.
4. *Власенко Н.Г., Коротких Н.А., Бокина И.Г.* К вопросу о формировании фитосанитарной ситуации в посевах в системе No-till. Новосибирск: Сиб. НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства, 2013. 124 с.
5. *Власенко Н.Г., Коротких Н.А., Кулагин О.В., Слободчиков А.А.* Фитосанитарное состояние посевов яровой пшеницы при технологии No-till // Защита и карантин растений. 2014. № 1. С. 18–22.
6. *Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Хабиров И.К. и др.* Оценка агрочерноземов Зауральской степи в условиях использования системы обработки почвы No-till // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 6. С. 32–36.
7. *Галеева Л.П., Широких П.С.* Свойства черноземов выщелоченных Новосибирского Приобья при различных обработках // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 11. С. 9–13.
8. *Глушко А.Я.* Деградация земельного фонда Ставропольского края в условиях интенсивного земледелия // Земледелие. 2011. № 8. С. 5–7.
9. *Гребенников А.М., Исаев В.А., Юдин С.А., Чевердин Ю.И., Гармашов В.М., Нужная Н.А., Корнилов И.М.* Влияние способов обработки миграционно-мицелярных черноземов на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 38–41.
10. *Дидович С.В., Алексеенко О.П.* Эффективность ингибирования сорных растений при бактеризации фототрофными и гетеротрофными микроорганизмами // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки. Мат-лы IV межд. науч. конф. в Ялте 9–13 сентября 2019 г. Симферополь: ИТ “АРЕАЛ”, 2019. С. 257–259.
11. *Дридигер В.К.* Влияние растительных остатков на противоэрозионную устойчивость почвы // Эрозия почв: проблемы и пути повышения эффективности растениеводства в адаптивно-ландшафтной системе земледелия. Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф., посв. 50-летию противоэрозионного комплекса ФГУП “Новоникулинское” в п. Тимирязевский 13–14 июля 2018 г. Ульяновск: УлГТУ, 2018. С. 59–64.
12. *Дридигер В.К., Кулинцев В.В., Стукалов Р.С., Гаджиумаров Р.Г.* Влияние технологии возделывания полевых культур на водно-физические свойства чернозема обыкновенного в первой ротации полевого севооборота зоны неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2017. № 4(66). С. 39–43.
13. *Дридигер В.К., Невечеря А.Ф., Токарев И.Д., Вайцеховская С.С.* Экономическая эффективность технологии No-till в засушливой зоне Ставропольского края // Земледелие. 2017. № 3. С. 16–19.
14. *Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Гаджиумаров Р.Г.* Роль растительных остатков в технологии возделывания сельскохозяйственных культур без обработки почвы // Актуальные проблемы земледелия и защиты почв от эрозии: сб. докл. Межд. науч.-практ. конф., посвящ. году экологии и 50-летию постановления о борьбе с эрозией почвы во ВНИИ землед. и защиты почв от эрозии 13–15 сент. 2017 г. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2017. С. 39–49.
15. *Есаулко А.Н., Коростылев С.А., Сигида М.С., Голосной Е.В.* Динамика показателей почвенного плодородия при возделывании сельскохозяйственных культур по технологии No-till в условиях Ставропольского края // Агрохимический вестник. 2018. № 4. С. 58–62.
16. *Железова А.Д., Манучарова Н.А., Горленко М.В.* Структурные и функциональные характеристики прокариотного комплекса дерново-подзолистой почвы под воздействием гербицида глифосата //

Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 2. С. 48–54.

17. К вопросу о формировании фитосанитарной ситуации в посевах в системе No-till / Под ред.: Н.Г. Власенко, Н.А. Власенко, И.Г. Бокина. Новосибирск: Сиб. НИИ земледелия и химизации, 2013. 124 с.
18. *Когут Б.М., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И.* Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов 2–1 мм типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170.
19. *Коротких Н.А., Власенко Н.Г.* Динамика почвенного банка семян сорняков в зависимости от технологии возделывания сельскохозяйственных культур // Докл. Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 2. С. 23–26.
20. *Котляров В.В., Федулов Ю.П., Котляров Д.В.* Физиологически активные вещества в агротехнологиях. Краснодар: КубГАУ, 2016. 169 с.
21. *Котляров Д.В., Котляров В.В., Донченко Д.Ю., Багрянцев Е.С.* Гербицидная композиция и способ повышения эффективности действия гербицида на основе глифосата. Патент РФ № 2584434. 20.12.2014. Бюл. № 35.
22. *Кулинцев В.В., Годунова Е.И., Желнакова Л.И. и др.* Система земледелия нового поколения Ставропольского края: монография. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2013. 520 с.
23. *Морозов Н.А., Хрипунов А.И.* Влагообеспеченность посевов озимой пшеницы по чистому пару и полупару в засушливых условиях // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 7–10.
24. Системы земледелия Ставропольского края: монография / Под. общ. ред.: А.А. Жученко, В.И. Трухачева. Ставрополь: АГРУС, 2011. 844 с.
25. *Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д.* Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитии концепции ФАО) // Агрохимия. 2019. № 5. С. 3–20.
26. *Стукалов Р.С., Дридигер В.К.* Влияние технологии No-till на засоренность и накопление глифосат кислоты в почве и зерне озимой пшеницы // Новости науки в АПК. 2018. № 1(10). С. 74–78. https://doi.org/10.25930/2218-855x-1-10-121128
27. *Торопова Е.Ю., Посаженников С.Н., Мармулева Е.Ю.* Системная фитосанитарная роль предшественников в южной лесостепи Новосибирской области // Сибир. вестн. сел.-хоз. науки. 2014. № 4. С. 4–11.
28. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1093–1100.
29. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С.* Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193.
30. *Шеховцов Г.А., Чайкина Н.Н.* Мониторинг плодородия почв, динамика применения минеральных и органических удобрений, баланс элементов питания в почвах восточной части Ставропольского края // Земледелие. 2018. № 6. С. 21–26.
31. *Araujo A.S.F., Monteiro R.T.R., Abarkeli R.B.* Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils // Chemosphere. 2003. September. V. 52(5). P. 799–804.
32. *Belobrov V.P., Yudin S.A., Ermolaev N.R., Dridiger V.K., Stukalov R.S., Kholodov N.V., Yaroslavtseva V.A., Aidiev A.Yu.* Influence of direct seeding technology on typical chernozem structure // 2019-th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects 28 March 2019, Moscow, Russian Federation.
33. *Dao T.H.* Crop residues and management of annual grass weed sin continuous no-till wheat (Triticum aestivum) // Weed Science. 1987. V. 35. P. 395–400.
34. *Dridiger V.K., Godunova E.I., Eroshenko F.V., Stukalov R.S., Gadzhiumarov R.G.* Effekt of No-till Technologyon erosion resistance, the population of earthworm sand humus content in soil // Research J. Pharmaceutical, Biologicaland Chemical Sciences. 2018. № 9(2). P. 766–770.
35. *Follett R.F., Schimel D.S.* Effect of Tillage Practiceson Microbial Biomass Dynamics // SoilSci. Soc. Am. J. 1989. V. 53. P. 1091–1096.
36. *Govaerts B., Mezzalama M., Sayre K.D., Crossa J., Nicol J.M., Decktrs J.* Long-term conseguences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/wheat root and nematode populations in subtropical highlands // Appl. Soil Ecol. 2006. V. 32. P. 305–315.
37. *Hershenhorn J., Casella F., Vurro M.* Weed biocontrol with fungi: past, present and future // Biocontrol Sci.Technol. 2016. V. 26. № 10. P. 1313–1328.
38. *Lane M., Lorenz N., Saxena J., Ramsier C., Dick R.P.* Microbial activity, community structure and potassium dynamics in the rhizosphere soil of soybean plants treated with glyphosate // Pedobiologia. 2012. V. 55. P. 153–159.
39. *Nguyen D.B., Rose M.T., Rose T.J., Morris S.G., van Zwieten L.* Impact of glyphosate on soil microbial biomass and respiration: a meta-analysis // Soil Biol. Biochem. 2016. V. 92. P. 50–57. https://doi.org/10.1016/jsoilbio2015.09.014
40. *Pankhurst C.E., Magarey R.C., Stirling G.R., Blair B.L., Bell M.J., Garside A.L.* Management practice so improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia // Soil Till. Res. 2003. V. 72. P. 125–137.
41. *Sherstha A., Knezevic S.Z., Roy R.C., Ball-Coelho B.R., Swanton C.J.* Effect of tillage, cover crop and croprotation on the composition of weed flora in a sandy soil // Weed Research. 2002. V. 42. P. 76–87.
42. *Swanton C.J., Booth B.D., Chandler K., Clements D.R., Shrestha A.* Management in a modified no-tillage corn-

soybean-wheat rotation influences weed population and community dynamics // Weed Science. 2006. V. 54. P. 47–58.

43. *Teasdale J.R., Beste C.E., Potts W.E.* Response of weeds tillage and cover crop residue // Weed Science. 1991. V. 39. P. 195–199.
44. *Weaver M.A., Boyette C.D., Hoagland R.E.* Management of kudzu by the bioherbicide, Myrothecium verrucaria, herbicides and integrated control programmes // Biocontrol Sci. Technol. 2016. V. 26. № 1. P. 136–140.
45. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming and creating legends for soil maps. Update 2015. Word Soil Resources Reports 106. Food and agriculture organization of the United nations. IUSS Working Group WRB. Rome. 2015.
46. *Yeates G.W., Huges K.* Effect of three tillage regimes on plant and soil nematodes inanoats / Maize Rotation. Pedobiosoils, southern Ontario // Canad J. Soil Sci. 1990. V. 79. P. 149–160.

Restoration of Soil Properties by Using Direct Sowing Technology

V. K. Dridiger[1, *], A. L. Ivanov[2], V. P. Belobrov[2], and O. V. Kutovaya[2]

[1]North-Caucasian FARC, Nikonova str., 49, Mikhailovsk, Shpakovsky district, Stavropol territory, 356241 Russia

[2]Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevskiy per., 7 Bld. 2, Moscow, 2119017 Russia

**e-mail: dridiger.victor@gmail.com*

In the European Russia, the application of direct seeding technology on typical and ordinary chernozems for 4 years leads to a significant increase in the content of organic matter in regions with sufficient moisture and a tendency to an increase in regions with insufficient moisture (Stavropol kray, and oth.). There is also a trend to the increase of mobile phosphorus and exchangeable potassium content for 4 years of the experiment without soil treatment. The yield of agricultural crops and profitability of production with long-term (more than 7 years) application of direct seeding is approximately by 30% higher than those obtained when applying traditional technologies. The consumption rates of glyphosate-containing herbicides used in weed control can be significantly reduced by using ground cover crops, modern biochemical methods, and strict compliance with the herbicide application technology. All these measures provide an increase in the number and species diversity of microorganisms that can suppress pathogenic microflora, significantly reducing the damage to plants by diseases and pests.

Keywords: soil degradation, erosion, biodiversity, glyphosate, yield, microorganisms, mesofauna

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1121–1131

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.8631.4

АЛЛЕЛОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ И РАЗРАБОТКА СОРБЦИОННО-СТИМУЛИРУЮЩЕГО ПРЕПАРАТА ДЛЯ УСКОРЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ ИЗ СЕМЯН ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

© 2020 г. Г. Н. Федотов[a], *, И. В. Горепекин[a], Л. В. Лысак[a], Д. И. Потапов[a]

[a]МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119992 Россия

***e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

Поступила в редакцию 05.02.2020 г.
После доработки 13.02.2020 г.
Принята к публикации 26.02.2020 г.

Разработан сорбционно-стимулирующий препарат для предпосевной обработки семян, включающий в свой состав бентонит кальция, гумат калия, автолизат пивных дрожжей, гиббереллин и полиэтиленгликоль, который на различных почвах эффективно стимулирует развитие растений на ранних стадиях из семян яровой пшеницы. Показано, что высокая жесткость воды не оказывает негативного влияния на действие стимулятора, а раствор стимулятора надо готовить за 4–6 ч до применения. Он может храниться более недели, не теряя своих стимулирующих свойств. Установлено, что обработанные раствором стимулятора семена могут храниться более двух месяцев без потери эффективности действия стимулятора, а предпосевная обработка семян раствором стимулятора совместно с биологическими и химическими фунгицидами не снижает эффект действия стимулятора. Выяснено, что высушивание почвенных образцов до воздушно-сухого состояния заметно увеличивает аллелотоксичность почв, что, по-видимому, связано со структурным переходом в матрице почвенных гелей и большей доступностью для растений аллелотоксинов, которые закреплены на гидрофобных участках частиц, образующих почвенные гели.

Ключевые слова: стимуляция семян, предпосевная обработка семян, технологические параметры обработки семян, фунгициды, высушивание почвенных образцов, актуальная и потенциальная аллелотоксичность

DOI: 10.31857/S0032180X2009004X

ВВЕДЕНИЕ

Стимулирующая предпосевная обработка семян известна достаточно давно [15, 19]. Для ее проведения используют различные препараты [7, 15, 18, 19] или стимулирующие воздействия [1, 5, 19, 26]. При этом предпосевная обработка семян препаратами-стимуляторами в условиях производства в отличие от применения стимулирующих воздействий реализуется значительно проще, так как можно использовать стандартное оборудование, применяемое для протравливания семян. Необходимо отметить, что при стимуляции семян наблюдаемые положительные эффекты часто не воспроизводятся, что объясняли влиянием погодных условий, качества семян или другими причинами, но, в целом, природа невоспроизводимости не была понятна.

Было выдвинуто предположение [23, 24], что небольшая величина эффектов при стимулирующей обработке семян биологически активными веществами (**БАВ**) и невоспроизводимость величины стимуляции обусловлены действием веществ-стимуляторов на фоне угнетающего воздействия на семена аллелотоксинов, поступающих в них из почв [2–4, 6, 8–10, 13, 17, 25, 27, 28]. Как следствие, в зависимости от величины ингибирующего действия аллелотоксинов стимулирующее влияние проявляется в различной степени.

Установлено, что защита семян от ингибирующего действия аллелотоксинов сорбционными препаратами на основе бентонита (**БК**) и гумата (**Г**) сама стимулирует их развитие без веществ-стимуляторов, а также обеспечивает значительное повышение эффективности использования некоторых препаратов, содержащих вещества-стимуляторы: гормоны роста растений, субстраты дыхательного метаболизма, стимуляторы широкого спектра действия [21, 23]. При проведении этих исследований выявлено [21], что из почвы в прорастающие семена поступают не только аллелотоксины, но и БАВ, которые необходимы для развития растений, а закрепление этих БАВ на сорбентах за-

медляет прорастание семян и развитие их проростков. Поэтому в сорбционный препарат была введена добавка автолизата пивных дрожжей (**АПД**), содержащего большой набор разнообразных БАВ (витамины, ферменты, аминокислоты и т. д.), которые должны были блокировать сорбционные центры сорбента, способные закреплять БАВ, поступающие в семена из почвы. Тем самым снималось негативное действие сорбционных препаратов на прорастание некоторых видов семян [21, 23].

Эксперименты по предпосевной обработке семян растворами, содержащими наряду с сорбционными препаратами индивидуальные гормоны роста растений, субстраты дыхательного метаболизма и БАВ-стимуляторы, показали, что величина стимуляции этими растворами носит экстремальный характер и может быть достаточно велика. При этом интервал концентраций высокой эффективности применения этих гормонов был достаточно узок. При введении субстратов дыхательного метаболизма, гормонов роста растений и стимуляторов широкого спектра действия в раствор сорбционного препарата (БК-Г-АПД) эффективность применения многих БАВ резко возрастала [21, 23].

В то же время не было отмечено стимуляции при использовании диэтиламиноэтилгексаноата, триаконтанола, а также кинетина и форхлорфенурона. При использовании гормона ауксиновой природы (3-индолилуксусной кислоты) отсутствие стимуляции при малых концентрациях сменялось заметным ингибированием [23].

Большая часть полученных результатов была вполне предсказуемой. Так, трудно было ожидать высоких стимулирующих эффектов при любых применяемых концентрациях БАВ. Это связано с тем, что для растений важную роль играет не увеличение концентрации какого-либо одного гормона или БАВ, а сбалансированность концентраций гормонов и других БАВ в растениях и их отдельных органах [14].

По-видимому, по этой же причине не все изученные препараты оказывали стимулирующее действие на прорастание семян. Если их наличие в растении после поступления необходимых для развития семян БАВ из почвы находилось на близком к оптимальному уровне, то дополнительное введение растительных гормонов уже не могло оказывать стимулирующего действия.

Таким образом, показано, что наличие в составе препарата бентонита кальция (БК) и гумата (Г), образующих бентонито-гуматовый комплекс (закрепляющий аллелотоксины из почв и снижающий их поступление в семена), АПД (предотвращающего закрепление стимулирующих БАВ из почв на сорбционном бентонито-гуматовом комплексе) и введение в препарат по отдельности различных стимулирующих компонентов (гормонов роста растений, субстратов дыхательного метаболизма и веществ-стимуляторов широкого спектра действия) для большинства БАВ значительно увеличивает стимуляцию начального этапа развития растений из семян. Были обнаружены достаточно значительные эффекты стимуляции (от 20 до 50%) [21, 23], но необходимо было проверить, нельзя ли добиться большей стимуляции.

Поэтому представляло интерес изучить влияние на стимуляцию введения в сорбционный препарат, содержащий БК, Г и АПД, одновременно нескольких различных веществ-стимуляторов.

Для внедрения в практику сельского хозяйства возникла необходимость изучить влияние на эффективность применения разработанного стимулирующего препарата в реальных производственных условиях:

- жесткости воды;
- времени, прошедшего от приготовления раствора препарата до обработки им семян;
- времени хранения обработанных препаратом семян;
- введения в раствор препарата фунгицидов;
- посева обработанных семян на различных дерново-подзолистых почвах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В экспериментах использовали семена яровой пшеницы (*Triticum*) сорт “Лиза” урожая 2018 г.

Проращивали семена в образцах дерново-подзолистых почв (здесь и далее названия почв приведены по классификации почв СССР 1977 г.): окультуренная дерново-подзолистая глубоко-подзолистая глубокопахотная легкосуглинистая почва на покровных суглинках после вико-овсяной смеси (1 – ВУ) – 2018 г., после горчицы (2 – ВУ и 2* – И) – 2018 и 2019 г., после картофеля (3 – ВУ) Московская область, Чашниково – 2018 г.; дерново-неглубокоподзолистая освоенная глубокопахотная легкосуглинистая почва на покровных суглинках, подстилаемых мореной, залежь с 2015 г. (5 – ВУ и 5* – И) Московская область, Чашниково – 2019 г.; агродерново-глубокоподзолистая супесчаная на водно-ледниковых (древнеозерных) отложениях почва (9 – ВУ и 9* – И), подстилаемая с глубины 92 см бескарбонатными лёссовидными (покровными) суглинками (окрестности поймы р. Яхрома, Московская область) – 2018 и 2019 г.

В экспериментах также использовали образцы серой лесной освоенной со вторым гумусовым горизонтом высоковскипающей среднесуглинистой почвы на лёссовидных карбонатных суглинках, залежь (10 и 10*) и после пшеницы (11 и 11*) из окрестностей г. Суздаль (поля Владимирского НИИСХ) – 2019 г., а также чернозема выщелоченного среднемощного среднесуглинистого на

лёссовидном суглинке, после пшеницы[1] Орловская область (12) – 2019 г.

Свойства дерново-подзолистых и серых лесных почв приведены в работах [16, 20].

В индексации почв приводятся цифры без звездочки с буквой И и со звездочкой с буквами ВУ. Индекс без звездочки означает, что почвенный образец готовили общепринятым в почвоведении способом – после отбора образца его доводили до воздушно-сухого состояния. Для получения из него увлажненного образца добавляли воду при тщательном перемешивании и выдерживали в таком состоянии не менее 2 нед. Индекс со звездочкой означает, что отобранный образец, содержащий влагу, хранили при комнатной температуре, поддерживая его увлажненное состояние.

Для защитного действия семян от почвенных аллелотоксинов использовали гумат калия (Г), произведенный ООО НВЦ "Агротехнологии" (Россия) из бурого угля, и бентонит кальция (БК) по ОСТ 18-49-71 (Россия). Для блокирования активных центров глино-гумусового комплекса, способных поглощать БАВ, поступающие из почвы в семена, использовали АПД, произведенный ООО "Биотех плюс" (Россия). Применяли суспензии сорбционного препарата, содержащие БК – 40 г/л, Г – 10 г/л, АПД – 12 г/л.

В качестве биологически активных веществ к сорбционным препаратам добавляли субстраты дыхательного метаболизма: янтарную (ЯК), фумаровую (ФК) и щавелевую (ЩК) кислоты; гормоны роста растений: препарат "Бутон", содержащий 2% гиббереллина, гиббереллин 90%-ный (Г), 6-бензиламинопурин (6-БАП), брассинолид (Брасс), содержащий 0.1% брассиностероидов; стимулятор широкого спектра действия: парааминобензойную кислоту (ПАБК). Добавляли их в обнаруженных [21, 23] оптимальных концентрациях. В качестве компонентов сорбционно-стимулирующего препарата использовали также неионогенные ПАВ: Полисорбат 20 (П-20) в концентрации 120 мг/л и полиэтиленгликоль (ПЭГ) с молекулярной массой от 400 до 20000 у. е. в концентрации 300 мг/л. ПАВ использовали в концентрациях, соответствующих для них максимуму эффективности стимуляции.

Обработку семян проводили полусухим способом при расходе 40 литров раствора на тонну семян.

Для повышения воспроизводимости получаемых данных изучали изменение интегральной длины проростков 7.5 г семян (~200 шт.), которую определяли, используя экспресс-метод, основанный на существовании линейной зависимости между насыпным объемом проросших семян в воде и длиной их проростков [22].

Для определения воздействия почв на развитие семян (аллелотоксичности почв) проводили сравнительные испытания по изменению суммарной длины проростков семян в песке и почвах, принимая за 100% развитие семян в песке и рассчитывая относительно этого значения замедления или ускорения развития проростков семян почвой.

Применяли шестикратную повторность с последующей статистической обработкой результатов. В связи с использованием в одном опыте 1000–1200 семян удавалось минимизировать ошибку, связанную с разным качеством семян до 7%.

Для моделирования жесткости воды в дистиллированную воду добавляли нитрат кальция.

Для изучения влияния времени хранения приготовленных растворов и обработанных семян на эффект стимуляции их выдерживали при температуре 27–28°C.

Для изучения влияния фунгицидов на начальную стадию развития растений из семян использовали фунгициды: Тебу-60 (тебуконазол, 60 г/л), Раксил Ультра (тебуконазол, 120 г/л), Ламадор (протиоконазол, 250 г/л; тебуконазол, 150 г/л), Баритон (протиоконазол, 37.5 г/л; флуоксастробин, 37.5 г/л), Иншур перформ (пираклостробин, 40 г/л; тритиконазол, 80 г/л), а также биофунгицид Фитоспорин-М (*Bacillus subtilis*, штамм 26 Д) при рекомендуемых для их применения для предпосевной обработки семян расходах препаратов. Для биофунгицидов Алирин (*Bacillus subtilis*, штамм В-10 ВИЗР), Гамаир (*Bacillus subtilis*, штамм М-22 ВИЗР) и Глиокладин (*Trichoderma harzianum*, штамм 18 ВИЗР) расход препаратов был взят по аналогии с применением Фитоспорина-М. Их применяли, обрабатывая семена растворами фунгицидов или растворами, содержащими фунгицид и стимулятор.

Общую численность бактерий в дерново-подзолистой почве (9 и 9*) определяли методом прямой люминесцентной микроскопии после окраски препаратов почвенной суспензии акридином оранжевым. Длину мицелия грибов и численность спор грибов после окраски почвенной суспензии акридином оранжевым [12]. Численность сапротрофных культивируемых бактерий определяли на глюкозо-пептонно-дрожжевой (ГПД) среде классическим методом посева, таксономическую принадлежность бактерий на основании фенотипических признаков (микроморфология, особенности жизненного цикла, наличие спор и плодовых тел), окраска по Граму (тест с 3% KOH) [11, 12]. Структура бактериального комплекса (СБК) охарактеризована с использованием подходов, разработанных на кафедре биологии почв [11].

[1] Свойства чернозема были определены агрохимической службой: pH – 5.1; P_2O_5 – 15.3 мг/100 г; K_2O – 14.0 мг/100 г; гумус – 5.58%; B – 0.97 мг/100 г; Mg – 7.42 мг/100 г; Zn – 0.86 мг/100 г; Cu – 0.47 мг/100 г; Mn – 20.5 мг/100 г; S – 6.7 мг/100 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для увеличения стимулирующих эффектов была предпринята попытка добавлять в сорбционные препараты одновременно несколько БАВ-стимуляторов в оптимальных при их использовании с сорбционным препаратом концентрациях [21, 23].

Полученные результаты (табл. 1) свидетельствуют, что добавление нескольких БАВ к сорбционному препарату в большинстве случаев не приводит к росту величины стимуляции. Рассмотрим совместное применение фумаровой кислоты и препарата "Бутон", содержащего гиббереллины (опыты 2, 3 и 7). Введение фумаровой кислоты в сорбционный препарат дает стимуляцию 24%, препарата "Бутон" – 34%, а при их совместном применении величина стимуляции даже несколько уменьшается (до 31%). Аналогичный результат наблюдается при совместном использовании препарата "Бутон" с 6-бензиламинопурином (опыты 3, 5 и 8). Введение 6-БАП в сорбционный препарат дает стимуляцию 47%, препарата "Бутон" – 34%, а при их совместном применении величина стимуляции тоже несколько снижается (до 46%). При совместном применении фумаровой и парааминобензойной кислот эффект стимуляции снижается более заметно (опыты 2, 4 и 11). Введение фумаровой кислоты в сорбционный препарат дает стимуляцию 24%, ПАБК – 31%, а при их совместном использовании наблюдается уменьшение до 21%.

Увеличение числа биологически активных компонентов до трех ситуацию не изменяет (опыты 2, 4, 5, 10 и 12). Так одновременное введение в сорбционный препарат фумаровой кислоты, ПАБК и 6-БАП не приводит росту стимуляции по сравнению с использованием двух БАВ – ПАБК и 6-БАП. В случае трех БАВ стимуляция составляет 53%, а при введении в сорбционный препарат только ПАБК и 6-БАП – 55%.

Использование в составе препарата неионогенных ПАВ также принципиально не меняет ситуации (опыты 15, 20 и 21). При введении в сорбционный препарат Брассинолида наблюдается стимуляция 20%, Полисорбата-20 – 17%, а при их совместном введении в сорбционный препарат уменьшается до 14%.

Таким образом, в большинстве случаев эффекты стимуляции от отдельных БАВ, вводимых в сорбционный препарат не суммируются, и предсказать БАВ, которые нужно вводить в сорбционно-стимулирующий препарат для повышения его эффективности не представляется возможным, что хорошо иллюстрируется представленными результатами.

Однако эмпирическим путем, перебирая варианты, удалось найти БАВ, которые при совместном использовании в препарате дают эффекты большей величины, чем каждый из них в отдельности. Так введение в сорбционный препарат одновременно ПАБК и 6-бензиламнопурина (опыт 10) дает заметно больший эффект, чем использование этих БАВ в сорбционном препарате по отдельности (опыты 4 и 5).

Ранее было показано [21], что на величину стимуляции при предпосевной обработке семян сорбционными препаратами большое влияние оказывает состояние почв, в которые высевают обработанные семена – чем выше ингибирующая способность почв, тем выше эффект стимуляции. Поэтому, на наш взгляд, более корректно изучать влияние стимуляторов на почвах, оказывающих минимальное ингибирующее (лучше стимулирующее) воздействие на прорастание семян. Так как в этом случае препарат будет всегда лучше действовать на почвах, оказывающих на развитие семян меньшее стимулирующее и большее ингибирующее влияние.

В связи с этим дальнейшие эксперименты по поиску стимуляторов проводили на почве 9* – И, которая стимулирует, а не угнетает прорастание семян и развитие их проростков по сравнению с инертным субстратом.

Из проведенных экспериментов следует, что в этих условиях стимулирующие эффекты становятся заметно меньше. Так введение в сорбционный препарат ПАБК и 6-бензиламнопурина (опыт 27) дает стимуляцию только 25, а не 55%, как мы наблюдали в опыте 10.

Дальнейшие исследования показали, что к повышению стимуляции приводит добавление к сорбционному препарату гиббереллинов и Полисорбата-20 (опыт 17), а также гиббереллинов и брассинолида (опыт 23).

Попытки заменить Полисорбат-20 на Полисорбат-60 или Полисорбат-80 привели к заметному снижению эффекта стимуляции. Учитывая это, можно предположить, что эффективность использования полисорбатов основывается не только на поверхностной активности, но и на их индивидуальном влиянии на биохимические процессы, протекающие в семенах при прорастании.

Лучшие результаты при создании сорбционно-стимулирующего препарата удается получить, вводя в сорбционный препарат гиббереллины и полиэтиленгликоль (опыт 19). В результате эффект стимуляции возрастает до 36%. При этом молекулярная масса ПЭГ не оказывает значимого влияния на эффект стимуляции, а оптимальная концентрация ПЭГ в сорбционно-стимулирующем препарате составляет 300 мг/л.

Таким образом, в результате проведенных в первой части работы экспериментов удалось разработать комплексный сорбционно-стимулирующий препарат, включающий в свой состав бентонит кальция, гумат калия, автолизат пивных дрожжей, гиббереллин и полиэтиленгликоль, ко-

Таблица 1. Влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы сорт “Лиза” суспензиями сорбционного препарата (БК-Г-АПД) с добавками различных БАВ на изменение суммарной длины проростков на различных дерново-подзолистых почвах

Номер опыта	Номер почвы и год отбора образца	Воздействие почвы, %	Состав препарата, г/л	Изменение суммарной длины проростков*, %
1	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД 40-10-12	+32 ± 4
2	2 – ВУ – 2018	–16	БК-Г-АПД-ФК 40-10-12-1	+24 ± 3
3	2 – ВУ – 2018	–16	БК-Г-АПД-Бутон 40-10-12-2	+34 ± 4
4	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-ПАБК 40-10-12-0.75	+31 ± 4
5	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-6-БАП 40-10-12-0.075	+47 ± 5
6	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-Бутон-ПАБК 40-10-12-2-0.75	+37 ± 4
7	1 – ВУ – 2018	–5	БК-Г-АПД-Бутон-ФК 40-10-12-2-1	+31 ± 4
8	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-Бутон-6-БАП 40-10-12-2-0.075	+46 ± 5
9	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-ФК-6-БАП 40-10-12-1-0.075	+47 ± 6
10	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-ПАБК-6-БАП 40-10-12-0.75-0.075	+55 ± 6
11	2 – ВУ – 2018	–16	БК-Г-АПД-ФК-ПАБК 40-10-12-1-0.75	+21 ± 3
12	2 – ВУ – 2018	–16	БК-Г-АПД-ФК-ПАБК-6-БАП 40-10-12-1-0.75-0.075	+53 ± 6
13	3 – ВУ – 2018	–20	БК-Г-АПД-Бутон-ФК-ПАБК-6-БАП 40-10-12-2-1-0.75-0.075	+35 ± 4
14	1 – ВУ – 2018	–5	БК-Г-АПД-Бутон-ПАБК-6-БАП 40-10-12-2-0.75-0.075	+38 ± 5
15	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-П-20 40-10-12-0.12	+17 ± 2
16	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Гибб 40-10-12-0.1	+23 ± 3
17	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Гибб-П-20 40-10-12-0.1-0.12	+31 ± 3
18	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-ПЭГ 40-10-12-0.1-0.3	+17 ± 2
19	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Гибб-ПЭГ 40-10-12-0.1-0.3	+36 ± 4
20	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Бр 40-10-12-0.3	+20 ± 3
21	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Бр-П-20 40-10-12-0.3-0.12	+14 ± 2
22	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Бр-ПЭГ 40-10-12-0.3-0.3	+22 ± 3
23	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Бр-Гибб 40-10-12-0.3-0.1	+32 ± 4

Таблица 1. Окончание

Номер опыта	Номер почвы и год отбора образца	Воздействие почвы, %	Состав препарата, г/л	Изменение суммарной длины проростков*, %
24	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-Бр-Гибб-П-20 40-10-12-0.3-0.1-0.12	+30 ± 4
25	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-6-БАП 40-10-12-0.075	+15 ± 2
26	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-6-БАП-П-20 40-10-12-0.075-0.12	+15 ± 2
27	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-ПАБК-6-БАП 40-10-12-0.75-0.075	+25 ± 3
28	9* – И – 2019	+23	БК-Г-АПД-ПАБК-6-БАП-П-20 40-10-12-0.75-0.075-0.12	+10 ± 2

Примечание. БК – бентонит кальциевый; Г – гумат; ФК – фумаровая кислота; ЯК – янтарная кислота; ЩК – щавелевая кислота; Бутон – препарат “Бутон”; ПАБК – парааминобензойная кислота; 6-БАП – 6-бензиламинопурин; Гибб – гиббереллин; П-20 – Полисорбат-20; ПЭГ – полиэтиленгликоль; Бр – Брассинолид.
* Проводили сравнение изменения суммарной длины проростков обработанных семян с необработанным контролем на тех же почвах.

торый оказывает заметное стимулирующее влияние на раннюю стадию развития растений из семян яровой пшеницы.

На следующем этапе исследования было изучено влияние технологических параметров приготовления раствора сорбционно-стимулирующего препарата (ССП) на эффективность его использования: жесткости воды, в которой готовят препарат, времени, прошедшего от приготовления раствора препарата до обработки им семян, и времени, прошедшего от обработки семян препаратом до их посева.

Из полученных данных (табл. 2) хорошо видно, что жесткость воды не влияет на эффективность применения препарата, так же как и время, прошедшее от обработки семян до посева. Последнее имеет большое значение, так как позволяет проводить обработку семян заранее, а не в период сева, когда в условиях производства это представляет определенные сложности.

Обращает на себя внимание, что обработку следует проводить не сразу после приготовления раствора препарата, а через несколько часов. Связано это, по-видимому, с тем, что нужно время для набухания и распада крупных глинистых частиц бентонита до мелких. Необходимо также отметить, что препарат не теряет своей эффективности при хранении раствора в течение недели.

Применение фунгицидов, используемых для предпосевной обработки семян совместно с сорбционно-стимулирующим препаратом, не оказывает значимого негативного влияния на эффект стимуляции в сравнении с семенами обработанными только фунгицидами (табл. 3). Величина эффекта от действия сорбционно-стимулирующего препарата сохраняется при использовании химических и биологических фунгицидов. Все это открывает возможности для внедрения сорбционно-стимулирующего препарата в практику сельского хозяйства.

На последнем этапе работы было необходимо проверить эффективность использования разработанного препарата на различных почвах. Причем лабораторные эксперименты должны быть максимально приближены к реальным условиям, в которых обязательным этапом производственного процесса является протравливание семян фунгицидами.

Как хорошо видно из представленных результатов (табл. 4), эффективность действия разработанного стимулятора сохраняется на всех изученных образцах почв вне зависимости от их типа, предыстории и аллелотоксичности. Причем при использовании стимулятора совместно с фунгицидом эффект стимуляции проявляется всегда сильнее.

Из представленных в таблице данных обращает на себя внимание то, что аллелотоксичность почв, которые проходили стадию высушивания практически всегда выше аллелотоксичности тех же почвенных образцов, которые хранили, поддерживая их во влажном состоянии. Этот вопрос с методической точки зрения может быть достаточно важен при изучении аллелотоксичности почв, так как в некоторых случаях аллелотоксичность может оказывать заметное влияние на действие стимуляторов, например сорбционных [21]. Важно это также и при поиске корреляций между аллелотоксичностью почв и урожайностью растений, выращиваемых на этих почвах. Так как всегда встает вопрос о хранении и подготовке для исследования почвенных образцов, чтобы получае-

Таблица 2. Влияние различных параметров обработки семян яровой пшеницы сорт “Лиза” ССП (БК-Г-АПД-Гибб-ПЭГ) на изменение суммарной длины проростков при стимуляции начальной стадии развития из них растений на дерново-подзолистой почве 9* – И – 2019

Изучаемый параметр	Величина параметра, мг/л по Ca^{2+} (характеристика жесткости)	Изменение суммарной длины проростков*, %
Жесткость воды	130 (вода средней жесткости)	+36 ± 3
	250 (вода очень жесткая)	+36 ± 4
Время, прошедшее после приготовления раствора	1 час	+23 ± 3
	2 часа	+31 ± 3
	4 часа	+36 ± 5
	6 часов	+36 ± 4
	1 сутки	+36 ± 4
	4 суток	+36 ± 4
	8 суток	+36 ± 4
	3 недели	+30 ± 4
Время, прошедшее после обработки семян раствором	0–6 часов	+36 ± 4
	3 суток	+36 ± 4
	7 суток	+36 ± 4
	1 месяц	+36 ± 4
	2 месяца	+34 ± 4

* Проводили сравнение изменения суммарной длины проростков обработанных семян с необработанным контролем на тех же почвах.

Таблица 3. Влияние обработки фунгицидами и ССП (БК-Г-АПД-Гибб-ПЭГ) семян яровой пшеницы сорт “Лиза” при посеве в дерново-подзолистую почву (9* – И – 2019) на начальную стадию развития растений (%)

Фунгицид	Изменение длины проростков семян, обработанных		
	стимулятором и фунгицидами, в сравнении с семенами, обработанными стимулятором	фунгицидами, в сравнении с необработанными семенами	стимулятором и фунгицидами, в сравнении с семенами, обработанными только фунгицидами
Тебу 60	–35 ± 4	–43 ± 5	+31 ± 4
Раксил ультра	–21 ± 3	–26 ± 3	+33 ± 4
Ламадор	–26 ± 3	–37 ± 4	+37 ± 4
Иншур перформ	–36 ± 4	–45 ± 5	+31 ± 4
Баритон	–55 ± 6	–71 ± 7	+32 ± 4
Фитоспорин М	+3 ± 2	0 ± 2	+37 ± 4
Алирин	0 ± 2	+4 ± 2	+33 ± 4
Гамаир	0 ± 2	+6 ± 2	+31 ± 4
Глиокладин	+6 ± 2	+5 ± 2	+38 ± 5

мые результаты были корректны. Кроме того, обнаружение потенциальной и актуальной аллелотоксичности[2] расширяет наши экспериментальные возможности, позволяя проводить исследования на одном почвенном образце, имеющем идентичные предысторию и агрохимические свойства, но отличающемся (иногда заметно) по аллелотоксичности.

На наш взгляд, наиболее вероятными является два объяснения этого явления. Первое состоит в том, что при прохождении стадии высушивания происходит частичная гибель почвенных микро-

[2] Мы назвали их так по аналогии с pH. Актуальная аллелотоксичность соответствует исходной почве, а потенциальная аллелотоксичность проявляется при соблюдении определенных условий.

Таблица 4. Воздействие почвы на семена и влияние предпосевной обработки фунгицидом “Ламадор” и сорбционно-стимулирующим препаратом (БК-Г-АПД-Гибб-ПЭГ) семян яровой пшеницы сорт “Лиза” при посеве в различные образцы почв на начальную стадию развития растений (%)

Почва и год отбора образца	Воздействие почвы	Действие стимулятора на развитие проростков семян	
		необработанных фунгицидом	обработанных фунгицидом
Д-п почва 2 – ВУ – 2019	–36 ± 4	+28 ± 4	–
Д-п почва 2* – И – 2019	–33 ± 4	+36 ± 4	+46 ± 5
Д-п почва 5 – ВУ – 2019	–29 ± 4	+25 ± 3	–
Д-п почва 5* – И – 2019	–11 ± 3	+38 ± 4	+56 ± 6
Д-п почва 9 – ВУ – 2019	–27 ± 4	+37 ± 4	–
Д-п почва 9* – И – 2019	+23 ± 3	+35 ± 4	+37 ± 4
С-л почва 10 – ВУ – 2019	–2 ± 2	+17 ± 3	–
С-л почва 10* – И – 2019	+25 ± 3	+15 ± 3	+28 ± 4
С-л почва 11 – ВУ – 2019	–14 ± 3	+28 ± 4	–
С-л почва 11* – И – 2019	0 ± 2	+20 ± 3	+51 ± 5
Чернозем 12 – ВУ – 2019	+24 ± 3	+16 ± 3	+33 ± 4

Таблица 5. Общая численность бактерий, длина грибного мицелия и численность спор грибов в образцах дерново-подзолистой почвы (9 и 9*)

Образец почвы	Бактерии, млрд/г	Грибы	
		мицелий, м/г	споры, млрд/г
9* – И – 2019	7.1 ± 0.7	1340 ± 120	0.11 ± 0.01
9 – ВУ – 2019	6.1 ± 0.6	1007 ± 100	0.25 ± 0.03

Таблица 6. Численность и таксономический состав культивируемых сапротрофных бактерий (глюкозо-пептонно-дрожжевая среда – ГПД) в образцах дерново-подзолистой почвы (9 и 9*)

Образец почвы	Численность, млн КОЕ/г	Актиномицеты	Споровые	Коринеформы	Грамотрицательные
		(млн КОЕ/г)/%			
9* – И – 2019	4.3 ± 0.4	1.2 ± 0.2/27	0.3 ± 0.03/7	1.0 ± 0.1/23	1.8 ± 0.2/43
9 – ВУ – 2019	3.1 ± 0.3	1.0 ± 0.1/30	0.3 ± 0.03/10	1.1 ± 0.1/33	0.7 ± 0.1/27

организмов с последующим их развитием при увлажнении. При этом может изменяться состав почвенной микрофлоры, а это может оказывать влияние на аллелотоксичность.

Для проверки этого объяснения наблюдаемого явления были проведены сравнительные микробиологические исследования исходного образца дерново-подзолистой почвы (9*) и образца, который был высушен и снова увлажнен (9). На этих почвенных образцах наблюдается максимальная разница в их воздействии на прорастание семян и дальнейшее развитие проростков. Полученные результаты представлены в таблицах (табл. 5–7).

Показатели общей численности бактерий в контроле (9*) и опыте (9) составляли 7.1 и 6.1 млрд клеток в 1 г почвы соответственно, длина грибного мицелия 1340 и 1007 м в 1 г почвы соответственно (табл. 5). Более высокие значения численности бактерий и длины грибного мицелия зафиксированы в контроле (9*), более низкие в варианте с высушиванием (9). Обращает на себя внимание более высокая численность спор грибов в варианте с высушиванием (9) по сравнению с контролем (9*) – 0.25 и 0.11 млрд в 1 г соответственно.

Численность сапротрофных культивируемых бактерий на ГПД среде также была больше в контроле (9*) и ниже в варианте с высушиванием (9) – 4.3 и 3.1 млн КОЕ в 1 г соответственно (табл. 6). Состав бактериального комплекса по вариантам опыта различался. Максимальное содержание грамотрицательных бактерий было в контроле (9*) – 43%,

Таблица 7. Таксономическая структура бактериального комплекса (СБК) в образцах дерново-подзолистой почвы (9 и 9*)

Образец почвы	Доминанты, больше 30%	Субдоминанты, 20–30%	Группа среднего обилия, 10–20%	Минорные компоненты, меньше 10%
9* – И – 2019	Грамотрицательные	Актиномицеты, коринеформы	Нет	Споровые
9 – ВУ – 2019	Коринеформы	Актиномицеты, грамотрицательные	Споровые	Нет

меньше содержание актиномицетов и коринеформ – 27 и 23%, еще меньше содержание споровых – 7%. В варианте с высушиванием (9) увеличивалось содержание актиномицетов и коринеформ – 30 и 33%. Значительно уменьшалось содержание грамотрицательных бактерий – 27%. Содержание споровых составляло 10%.

Выявленные закономерности в изменении структуры СБК при высушивании более четко проявляются при анализе СБК с использованием критериев доминирования. В контроле (9*) доминируют грамотрицательные бактерии, в качестве субдоминантов выступают актиномицеты и коринеформы, споровые выступают в роли минорных компонентов (табл. 7). В варианте с высушиванием почвы (9) в качестве доминантов выступают коринеформы, субдоминантами являются актиномицеты и грамотрицательные бактерии, споровые входят в группу среднего обилия. Обращает на себя внимание, что грамотрицательные бактерии в варианте с высушиванием (9) были представлены, в основном, скользящими бактериями родов *Myxococcus* и *Polyangium*. Эти бактерии обладают более высокой устойчивостью к высушиванию, чем другие грамотрицательные бактерии.

Из проведенных экспериментов по микробиологии следует, что, во-первых, показатели общей численности бактерий и длины грибного мицелия в контроле (9*) больше, чем в варианте с высушиванием (9). Численность спор, напротив, больше в варианте с высушиванием и меньше в контроле. Во-вторых, численность сапротрофных культивируемых бактерий выше в контроле (9*), ниже в варианте с высушиванием (9). В-третьих, структура сапротрофного бактериального комплекса в контроле (9*) и варианте с высушиванием (9) различались. В контроле (9*) доминируют грамотрицательные бактерии, в варианте с высушиванием (9) – коринеформы и актиномицеты. После высушивания содержание грамотрицательных бактерий значительно уменьшается.

Таким образом, высушивание приводит к снижению численности микроорганизмов в почве, и это не позволяет объяснить рост аллелотоксичности при высушивании почв с позиции изменения количества почвенных микроорганизмов, выделяющих аллелотоксины. Невозможно также объяснить наблюдаемое явление, полагая, что микроорганизмы используют аллелотоксины в качестве источников углерода, так как во времени аллелотоксичность исходных почв практически не изменяется.

Второе объяснение увеличения аллелотоксичности почв состоит в том, что при высушивании почв в них происходит структурный переход, в результате которого гидрофобные участки частиц матрицы почвенных гелей меняют свое положение в пространстве так, чтобы увеличить свой контакт с воздухом. Во влажном почвенном образце термодинамически выгодно, чтобы гидрофобные участки поверхности частиц минимизировали свои контакты с водой, содержащейся в почвах, ориентируясь друг к другу. При увлажнении воздушно-сухих почвенных образцов происходит обратный структурный переход с ориентацией гидрофобных участков почвенных частиц друг к другу. Однако этот переход требует энергии активации и не проходит до конца. В результате большая часть гидрофобных участков частиц, образующих матрицу почвенных гелей (по сравнению с исходным влажным почвенным образцом), контактирует с водой. Учитывая, что аллелотоксины имеют большей частью гидрофобную природу [3], это приводит к выходу дополнительного количества закрепленных почвенных аллелотоксинов в почвенный раствор и к повышению аллелотоксичности почв.

Таким образом, можно говорить о существовании актуальной и потенциальной аллелотоксичностей, которые могут заметно отличаться друг от друга. Первая из них характерна для отобранных влажных почвенных образцов. Вторая соответствует почвенным образцам, которые были высушены до воздушно-сухого состояния с последующим увлажнением и выдержкой до прихода в равновесное состояние.

Из этого следует практически значимый вывод, что для получения правильных представлений о воздействии почвенных аллелотоксинов на растения необходимо использовать для исследования почвенные образцы с актуальной аллелотоксичностью.

ВЫВОДЫ

1. Разработан сорбционно-стимулирующий препарат, включающий в свой состав бентонит кальция, гумат калия, автолизат пивных дрожжей, гиббереллин и полиэтиленгликоль, который эффективно стимулирует на различных почвах развитие растений на ранних стадиях из семян яровой пшеницы.

2. Показано, что:

– высокая жесткость воды не оказывает негативного влияния на действие стимулятора;

– раствор стимулятора надо готовить за 4–6 ч до применения, и он может храниться более недели, не теряя своих стимулирующих свойств;

– семена, обработанные раствором стимулятора, могут храниться более двух месяцев без потери эффективности действия стимулятора;

– предпосевная обработка семян раствором стимулятора совместно с биологическими и химическими фунгицидами не снижает эффект действия стимулятора.

3. Установлено, что высушивание почвенных образцов до воздушно-сухого состояния заметно увеличивает аллелотоксичность почв, что, по-видимому, связано со структурным переходом в матрице почвенных гелей.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алтухов И.В., Федотов В.А.* Воздействие ИК-излучения различных длин волн на семена пшеницы // Ползуновский вестник. 2011. № 2/1. С. 156–159.
2. *Берестецкий О.А.* Фитотоксины почвенных микроорганизмов и их экологическая роль // Фитотоксические свойства почвенных микроорганизмов. Л.: ВНИИСХМ, 1978. С. 7–30.
3. *Гродзинский А.М.* Аллелопатия растений и почвоутомление. Избр. тр. Киев: Наукова думка, 1991. 432 с.
4. *Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головко Э.А., Дзюбенко Н.Н., Мороз П.А., Прутенская Н.И.* Аллелопатическое почвоутомление. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.
5. *Дмитриев А.М., Страцкевич Л.К.* Стимуляция роста растений / Под ред. Н.Ф. Батыгина. Мн.: Ураджай, 1986. 118 с.
6. *Коношина С.Н.* Влияние различных способов использования почвы на ее аллелопатическую активность. Дис. ... канд. с.-х. н. Орел, 2000. 145 с.
7. *Кравец А.В., Бобровская Д.Л., Касимова Л.В., Зотикова А.П.* Предпосевная обработка семян яровой пшеницы гуминовым препаратом из торфа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 4(78). С. 22–24.
8. *Красильников Н.А.* Микроорганизмы почвы и высшие растения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 464 с.
9. *Лобков В.Т.* Использование почвенно-биологического фактора в земледелии: монография. Орел: Изд-во ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, 2017. 166 с.
10. *Лобков В.Т.* Экологические основы почвоутомления в полевых агроценозах центрально-черноземной полосы России. Автореф. дис. ... докт. с.-х. н. Курск, 1994. 32 с.
11. *Лысак Л.В., Добровольская Т.Г., Скворцова И.Н.* Методы оценки бактериального разнообразия почв и идентификации почвенных бактерий. М.: МАКС Пресс, 2003. 120 с.
12. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под. ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 304 с.
13. *Мирчинк Т.Г.* Почвенная микология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 220 с.
14. *Муромцев Г.С., Чкаников Д.И., Кулаева О.Н., Гамбург К.З.* Основы химической регуляции роста и продуктивности растений. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
15. *Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н.* Справочник по проращиванию покоящихся семян. Л.: Наука, 1985. 506 с.
16. *Окорков В.В.* Удобрения и плодородие серых лесных почв Владимирского ополья. Владимир: ВООО ВОИ, 2006. 356 с.
17. *Рудаков В.О., Рудаков О.Л.* Природа почвенных фитоксикозов и проблема защиты растений // Агро XXI. 2009. № 1-3. С. 11–13.
18. *Рябчинская Т.А., Харченко Г.Л., Саранцева Н.А., Бобрешова И.Ю., Злотников А.К.* Полифункциональное действие препарата Альбит при предпосевной обработке семян яровой пшеницы // Агрохимия. 2009. № 10. С. 39–47.
19. *Сечняк Л.К., Киндрук Н.А., Слюсаренко О.К., Иващенко В.Г., Кузнецов Е.Д.* Экология семян пшеницы. М.: Колос, 1983. 349 с.
20. *Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д., Завгородняя Ю.А., Исакова С.А.* Взаимосвязь предыстории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3.
21. *Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Батырев Ю.П. Горепекин И.В.* Аллелотоксичность почв и повышение эффективности использования гиббереллинов для предпосевной обработки семян // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 6. С. 45–50.
22. *Федотов Г.Н., Шоба С.А., Федотова М.Ф., Горепекин И.В.* Влияние аллелотоксичности почв на прорастание семян зерновых культур // Почвоведение. 2019. № 4. С. 489–496.
23. *Шоба С.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Грачева Т.А.* Повышение эффективности стимуляции развития проростков семян яровой пшеницы при предпосевной обработке гормонами роста растений // Доклады академии наук. Сер. Науки о жизни. 2020. Т. 490. № 2.
24. *Шоба С.А., Салимгареева О.А., Горепекин И.В., Федотов Г.Н., Степанов А.Л.* Закрепление аллелотоксинов почв гуминовыми веществами как основа

стимуляции прорастания семян // Доклады академии наук. 2019. Т. 487. № 3. С. 108–111.

25. Allelopathy. A Physiological Process with Ecological Implications / Eds.: M.J. Reigosa, N. Pedrol, L. Gonzalez. Published by Springer. Printed in the Netherlands. 2006. 637 p.
26. *Balakhnina T. et al.* The influence of wheat *Triticum aestivum* L. seed pre-sowing treatment with magnetic fields on germination, seedling growth, and antioxidant potential under optimal soil watering and flooding // Acta Physiologiae Plantarum. 2015. V. 37. № 3. P. 59.
27. *McCalla T.M., Haskins F.A.* Phytotoxic Substances from Soil Microorganisms and Crop Residues // Bacteriological Reviews. 1964. V. 28. P. 181–207.
28. *Rice E.L.* Allelopathy. N.Y.: Academic Press, 1984. 422 p.

Soil Allelotoxicity and Creation of Sorption-Stimulating Preparation to Accelerate Plant Development from Spring Wheat Seeds at Early Stages

G. N. Fedotov[1, *], I. V. Gorepekin[1], L. V. Lysak[1], and D. I. Potapov[1]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

Sorption-stimulating preparation for pre-sowing seed treatment, containing calcium bentonite, potassium humate, brewer's yeast autolysate, gibberellin and polyethylene glycol is created. It efficiently stimulates plant development from spring wheat seeds at early stages on different soil. It is shown that high water hardness has no negative impact on the effect of stimulant. The stimulant solution should be prepared 4–6 hours prior to its application and can be stored for more than a week without losing its stimulating properties. Seeds treated by the stimulant solution can be stored more than two months without losing the results of treatment; the pre-sowing seed treatment with the stimulant solution in combination with biological and chemical fungicides does not decrease the stimulant efficiency. It was also found that drying the soil samples to air-dry condition increases markedly the soil allelotoxicity, and this phenomenon may be related to the structural transition soil gels in the matrix, and greater availability of allelotoxins for plants. These substances are fixed on hydrophobic ingredients of particles that form the soil gels.

Keywords: seed stimulation, pre-sowing seed treatment, technological parameters of seed treatment, sorption-stimulating preparation, fungicides, drying of soil samples, actual and potential allelotoxicity

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1132–1143

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.41

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРИЗОНТА О ПОДЗОЛА НА ДВУХ В РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)[1]

© 2020 г. Г. М. Кашулина[a], *, Т. И. Литвинова[a], Н. М. Коробейникова[a]

[a]*Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, Ферсмана, 18а, Апатиты, 184209 Россия*

**e-mail: galina.kashulina@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.
После доработки 13.03.2020 г.
Принята к публикации 18.03.2020 г.

С 22 сентября по 10 июля в 2014/2015 и 2015/2016 гг. измеряли температуру верхнего горизонта О подзола (Albic Podzol) на двух участках сильнозагрязненной и деградированной экосистемы в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове: на преобладающей в структуре экосистемы техногенной пустоши без напочвенного покрова и на разрастающегося в ответ на снижение выбросов небольшого куста вороники (*Empetrum hermaphroditum*). Как показали результаты, почвы под куртиной угнетенной вороники и пустоши техногенной значительно различались по всем общим температурным показателям. Почва под куртиной вороники была подвержена значительно меньшим колебаниям температуры, как за период исследований, так и в суточном цикле. В осенний период она дольше поддерживала температуру в положительной области и эффективнее смягчала первые ночные заморозки. Из-за темной окраски разрушающегося гор. О почва пустоши лучше прогревалась и характеризовалась более высокими дневными и среднесуточными температурами в летний период. В осенний период до формирования постоянного снежного покрова почва пустоши, наоборот, сильнее промерзала вслед за резкими снижениями температуры воздуха. Таким образом, наличие даже угнетенного напочвенного покрова предохраняло почву от резких колебаний температуры, обеспечивая более стабильные температурные условия для роста растений. В отсутствии напочвенного растительного покрова дополнительное иссушение в летний период и резкие одновременные снижения температуры почвы и воздуха осенью могут быть дополнительными к экстремальному загрязнению стресс-факторами для выживших древесных растений и их сеянцев.

Ключевые слова: температура почвы, деградированный подзол (Eroded Albic Podzol), напочвенный покров, техногенная пустошь (technogenic barren), медно-никелевое предприятие

DOI: 10.31857/S0032180X20090087

ВВЕДЕНИЕ

Медно-никелевое предприятие, расположенное в центре Кольского полуострова (северо-запад России), является самым крупным и длительно действующим источником выбросов SO_2 и тяжелых металлов на севере Европы [17, 24]. Одним из наиболее очевидных последствий выбросов этого предприятия является экстремальное химическое загрязнение всех поверхностных компонентов окружающей среды: атмосферы и атмосферных осадков [19], почв [3, 4, 22, 24] и растений [11, 23] основными металлами загрязнителями – Ni и Cu. Так, содержание Ni и Cu в горизонте О почв около этого предприятия к настоящему времени достигло уровней свойственных перерабатываемой руде [4]. В меньшей степени все поверхностные среды здесь загрязнены большим спектром других токсичных элементов – Cd, Pb, Hg, As, Tl и др. [3, 22, 24]. Тем не менее, наиболее значительное влияние на химические свойства (содержание органического вещества, ЕКО, содержание обменных оснований и доступных питательных элементов) и морфологическое сложение почв деятельность предприятия оказывает посредством косвенного воздействия – через разрушение растительности [6, 18].

После сокращения выбросов в последние 20 лет около этого предприятия, как и в целом в регионе [17], началось восстановление растительности [7, 13]. В основном оно здесь протека-

[1] Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X20090087 для авторизованных пользователей.

ет за счет разрастания выживших древесных растений – главным образом березы с протяженными, глубоко уходящими корнями. Напочвенный покров здесь восстанавливается значительно медленнее. Это обусловлено не только экстремальным загрязнением, но и физическим разрушением верхнего горизонта О почв [6] – места обитания корней кустарничков. Единичные выжившие куртины кустарничков разрастаются только в местах скопления свежего опада березы под кронами деревьев (рис. S1, А). Вместе с тем, для дальнейшего устойчивого восстановления нарушенных экосистем необходимо формирование не только напочвенного покрова, но и древесного подроста. Как показал многолетний мониторинг, семена выживших березы и сосны являются жизнеспособными и прорастают, несмотря на экстремальное загрязнение верхних слоев почв тяжелыми металлами. Однако через несколько лет эти сеянцы гибнут.

Кроме приведенных выше негативных антропогенных факторов дополнительными причинами угнетенного состояния выживших растений и гибели сеянцев могут быть также изменения водного и теплового режима нарушенных экосистем. Большая роль растений [1, 12] в формировании теплового режима почв и задокументированные его изменения в случае повреждения растительности другими факторами, например, пожарами [8] или рубками леса [2] дают основание предположить, что микроклимат нарушенных экосистем около медно-никелевых предприятий также претерпел серьезные изменения.

Возможность сдвига водного режима нарушенных экосистем в сторону иссушения из-за повреждения напочвенного покрова была нами показана ранее при анализе факторов и механизмов разрушения экосистем под воздействием медно-никелевых предприятий в регионе [18]. Дополнительным стресс-фактором для ослабленных сеянцев березы здесь могут быть и ранние осенние заморозки. Причем, именно, заморозки могут оказаться главным фактором в повреждении сеянцев. Поскольку, согласно теории Маниона [21] именно мороз рассматривается в качестве основного фактора повреждения и гибели деревьев в условиях загрязнения. Остальные факторы, включая загрязнение, могут только ослабить растения. Некоторые лесоводы [15, 16], изучавшие повреждение экосистем под воздействием медно-никелевых предприятий на Кольском полуострове в период наивысшего объема выбросов, также рассматривали мороз в качестве важного фактора повреждения деревьев.

С морозными явлениями могут быть связаны и два других вида повреждения в экстремально загрязненных и нарушенных экосистемах около медно-никелевого предприятия: морозное пучение на отдельных участках с выталкиванием материала иллювиального горизонта BF подзола на поверхность (рис. S1, В) и появившееся в последние несколько лет выталкивание проводящих корней березы над поверхностью (рис. S1, С). Если первое может иметь положительный экологический эффект, поскольку на поверхности оказывается минеральный материал, который не способен накапливать большие количества тяжелых металлов и является менее токсичным субстратом для сеянцев [4]. То последствия от выталкивания корней значительно более серьезные – могут привести к гибели деревьев переживших период наивысшего загрязнения атмосферы.

Вместе с тем изменениям микроклимата экосистем вследствие нарушения растительности около медно-никелевых предприятий на Кольском полуострове посвящены единичные работы [20]. Для выявления возможности повреждения сеянцев березы и выталкивания корней при пучении грунта морозами во время осенних заморозков были проведены рекогносцировочные наблюдения за динамикой температуры почв на двух участках сильно загрязненной и нарушенной экосистемы около источника выбросов: преобладающей в структуре экосистемы техногенной пустоши без напочвенного покрова (где прорастают и гибнут сеянцы березы и выталкиваются на поверхность корни деревьев) и разрастающегося в ответ на снижение выбросов небольшого куста вороники (*Empetrum hermaphroditum*). Эта работа была проведена в рамках комплексного почвенно-геоботанического мониторинга [4–6, 19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения за температурой почвы проводили на стационарной площадке II-1 комплексного почвенно-геоботанического мониторинга [4–6, 19], расположенной в 8 км на север от комбината “Североникель” (рис. S2). Она расположена на плоской вершине моренного холма. Растительность здесь представлена кустистой березой, разросшейся после значительного снижения выбросов в последние 20 лет. Высота берез не превышает 2 м, а проективное покрытие крон на площадке составляет около 30%. Напочвенный растительный покров на большей части территории площадки к началу мониторинговых исследований (2001 г.) был уже полностью разрушен. Почва представлена деградированным подзолом с разрушающимся горизонтом О на поверхности [6]. По данным обследования 2001–2011 гг., эта площадка является одной из самых загрязненных: концентрации Ni в снежном покрове превышали фоновые значения в 7300 и Cu в 5700 раз [19], а в разрушающемся горизонте О – Ni в 1200 и Cu в 730 раз [4].

Экстремальность условий произрастания растений здесь обусловлена не только высоким уровнем загрязнения, но и природной суровостью климата

[10, 14] в данной местности (коротким вегетационным периодом, продолжительной холодной зимой и низкой суммой биологически активных температур) из-за ее высокого широтного положения (67°59′16.7″с. ш.).

Температуру верхнего горизонта О почв на глубине 2 см фиксировали 6 раз в сутки температурными регистраторами марки iButton с 22 сентября 2014 г. по 11 июня 2015 г. и в тот же период 2015/2016 гг. на двух участках стационарной площадки II-1 (рис. S3) Первый участок – "техногенная пустошь" представлял преобладающую часть территории экосистемы без напочвенного покрова с разрушающимся гор. О подзола коренной экосистемы на поверхности. При длительном отсутствии свежего опада старое органическое вещество гор. О здесь хорошо разложилось и превратилось в пылящий материал, смешанный с минеральными частицами из нижерасположенных горизонтов [6]. Сверху горизонт гор. О пустоши имеет темную серовато-коричневую (10YR 3/2) окраску. В нем находятся только редкие крупные проводящие корни деревьев.

Второй участок представлял единичные разрастающиеся после снижения выбросов куртины вороники (*Empetrum hermaphroditum*) рядом с кроной березы – участок "вороника". Здесь горизонт О представлен разлагающимся современным опадом листьев березы, сметаемым сюда с открытых мест ветром. На поверхности кроме живых побегов вороники находится слегка потемневший прошлогодний опад листьев березы. Его светлая золотисто-коричневая окраска на поверхности с глубиной по мере разложения становится темно-серой. На этом участке в горизонте О много живых крупных и мелких корней растений.

Кроме различий по способности отражать радиацию из-за различий цвета и материала поверхности на тепловой режим почв могут также оказать влажность, содержание органического вещества и плотность сложения [1]. Данные разреза-траншеи 2013 года на этой площадке показали, что влажность гор. О пустоши составила всего 8.2% (на воздушно-сухую почву), а влажность гор. О под вороникой варьировала от 19% в верхнем слое 0–1 см, до 44% на глубине 2 см и 256% на глубине 4 см. Площадное опробование в 2018 г. также показало, что влажность гор. О пустоши меньше (варьирует от 17 до 100, среднее – 36%, $n = 13$), чем в почве под вороникой (от 33 до 145, среднее 93%, $n = 5$). Согласно *U*-критерию Манна-Уитни, влажность слоя со свежим опадом листьев березы под вороникой была значимо ($p \le 0.01$) больше по сравнению с разрушающимся гор. О на пустоши.

Различия по содержанию $C_{орг}$ в гор. О между участками в разрезе-траншее были менее существенны (41% на абсолютно-сухую почву в пустоши, 51% в верхнем слое 0–1 см и 49% на глубине 2–4 см под вороникой), но по составу органики почва на пустоши и под вороникой отличались принципиально: в первом случае – это остатки старого органического вещества почвы исходного кустарничково-зеленомошного ельника, а под вороникой – свежий разлагающийся опад листьев березы.

Более высокая влажность гор. О, состоящего из опада листьев березы, не означает ее более высокую теплопроводность, поскольку она имеет более рыхлое сложение по сравнению с пустошью: плотность гор. О пустоши по результатам площадного опробования 2018 г. составила (среднее ± стандартное отклонение) 0.58 ± 0.19 г/см^3 ($n = 13$), а под вороникой – 0.14 ± 0.07 г/см^3 ($n = 5$).

Логгеры были установлены в метре друг от друга. Что позволило свести к минимуму различия по затенению обследованных участков деревьями.

Температуру воздуха, высоту снежного покрова, облачность и направление ветра за период исследования представляли данные метеостанции "Мончегорск" (URL: http://www.rp5.ru), расположенной в 4 км на В-ЮВ от площадки мониторинга (рис. S2). Некоторое представление о мощности и плотности снега, от которых зависит тепло- и воздухообмен между почвой и воздухом в зимний период [9] на обследуемой площадке дают данные наблюдений 2005–2011 гг. [19]. Так средняя мощность снега на конец марта здесь в тот период варьировала от 47 до 78 см и была от 9 до 24 см выше, чем на метеостанции "Мончегорск". Плотность снега варьировала от 0.18 до 0.30 г/см^3. Для мощности снега на этой площадке свойственно очень высокое пространственное варьирование. Например, в 2006 году при средней мощности снежного покрова 66.2 см на площадке, она варьировала от 40 до 83 см, то есть в 2 раза.

Обработка данных и построение диаграмм были проведены с использованием Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали результаты, почвы под куртиной угнетенной вороники и техногенной пустоши в обследованной экосистеме, значительно различались по всем температурным показателям (табл. 1). Так, средняя за период исследования (с 22 сентября по 11 июня) температура воздуха в 2014/2015 гг. составила –2.9, в 2015/2016 гг. – –2.6°С. В почвах на обоих участках эта величина была в области положительных температур. При этом средняя температура почвы в 2014/2015 гг. под вороникой была на 0.9°С ниже по сравнению с почвой пустоши.

Максимальная среднесуточная температура почвы пустоши благодаря темной окраске поверхности и лучшему прогреванию в летний период была близка к этому показателю для воздуха оба сезона и почти на 4°С превышала температу-

Таблица 1. Основные температурные показатели гор. О деградированного подзола на глубине 2 см на участках с полностью разрушенным напочвенным покровом – "пустошь" и под угнетенной куртиной вороники – "вороника" и атмосферного воздуха по данным метеостанции Мончегорск (www.rp5.ru) по данным наблюдения с 22 сентября по 10 июня 2014/2015 и 2015/2016 гг.

Показатель	Пустошь 14/15 гг.	Пустошь 15/16 гг.	Вороника 14/15 гг.	Воздух 14/15 гг.	Воздух 15/16 гг.
Температура, °С					
Средние за весь период наблюдений	1.1	1.82	0.21	−2.9	−2.6
Максимальные среднесуточные	14.2	15.2	10.1	15.7	16.8
Минимальные среднесуточные	−5.9	−2.7	−3.9	−34	−36.7
Абсолютный максимум	23.2	22.7	13.1	20.9	21.5
Абсолютный минимум	−7.5	−3.4	−3.9	−35.4	−38
Диапазон варьирования	30.7	26.1	17	56.3	59.5
Сумма отрицательных среднесуточных	−109	−68	−234	−1168	−1278
Сумма положительных среднесуточных	395	548	287	436	605
Сумма среднесуточных – 5–10°С	163	444	181	149	296
Сумма среднесуточных >10°С	124	213	10	141	174
Даты					
Переход к отрицательным	21.10.14	7.11.15	21.10.14	10.10.14	6.11.15
Переход к положительным	2.05.15	1.05.16	6.05.15	30.03.15	26.04.16
Установка снежного покрова	–	–	–	12.11.14	6.11.15
Сход снежного покрова	–	–	–	10.05.15	2.05.16
Продолжительность периода, дней					
С отрицательными среднесуточными	112	95	182	160	151
С положительными среднесуточными	150	167	80	102	111
Количество дней					
Со среднесуточной T 5–10°С	33	48	25	33	39
Со среднесуточной T > 10°С	11	18	1	12	14

ру почвы под вороникой в 2014/2015 гг. Благодаря теплоизоляционным свойствам снежного покрова минимальная среднесуточная температура в почвах на обоих участках оказалась значительно менее низкой по сравнению с воздухом. Минимальная среднесуточная температура в почве под вороникой при этом в 2014/2015 гг. была на 2°С выше по сравнению с пустошью.

Абсолютный максимум температуры почвы и в воздухе оба сезона был отмечен в самом конце мая. При этом в почве пустоши он был выше не только по сравнению с почвой под вороникой, но и по сравнению с воздухом.

Абсолютная минимальная температура в почве пустоши, наоборот, была ниже, по сравнению с почвой под вороникой, причем минимальные абсолютные температуры почвы на разных участках были отмечены в разное время: в почве пустоши в 2014/2015 гг. – −7.5°С осенью (утром 6 ноября), в 2015/2016 гг. – −3.4°С (12 ноября 2015 г.), когда мощность снега на метеостанции была менее 0.5 и 8 см соответственно. В почве под вороникой минимальная абсолютная температура (−3.9°С) была отмечена в середине зимы (12–14 января 2015 г.), когда температура воздуха несколько предшествующих дней держалась около −30°С.

Диапазон варьирования температуры воздуха за период наблюдений оба сезона по данным метеостанции составил почти 60°С. Температура почвы за период исследований варьировала в более узком диапазоне по сравнению с воздухом. При этом в почве под вороникой в 2014/2015 гг. он был значительно уже (всего 17°С) по сравнению с пустошью (около 30°С).

Наблюдения 2014/2015 гг. также выявили значительные различия между участками по продолжительности периода с отрицательными среднесуточными температурами: в почве на пустоши он составил 112 дней, в почве под вороникой – 182 дня. Количество дней со среднесуточной температурой >+5 и >+10°С в почве пустоши было сопоставимо с воздухом в 2014/2015 гг. и существенно больше в 2015/2016 гг. (табл. 1). В почве под вороникой продолжительность этих периодов была значительно меньше. Соответственно, и суммы биологически активных температур за пе-

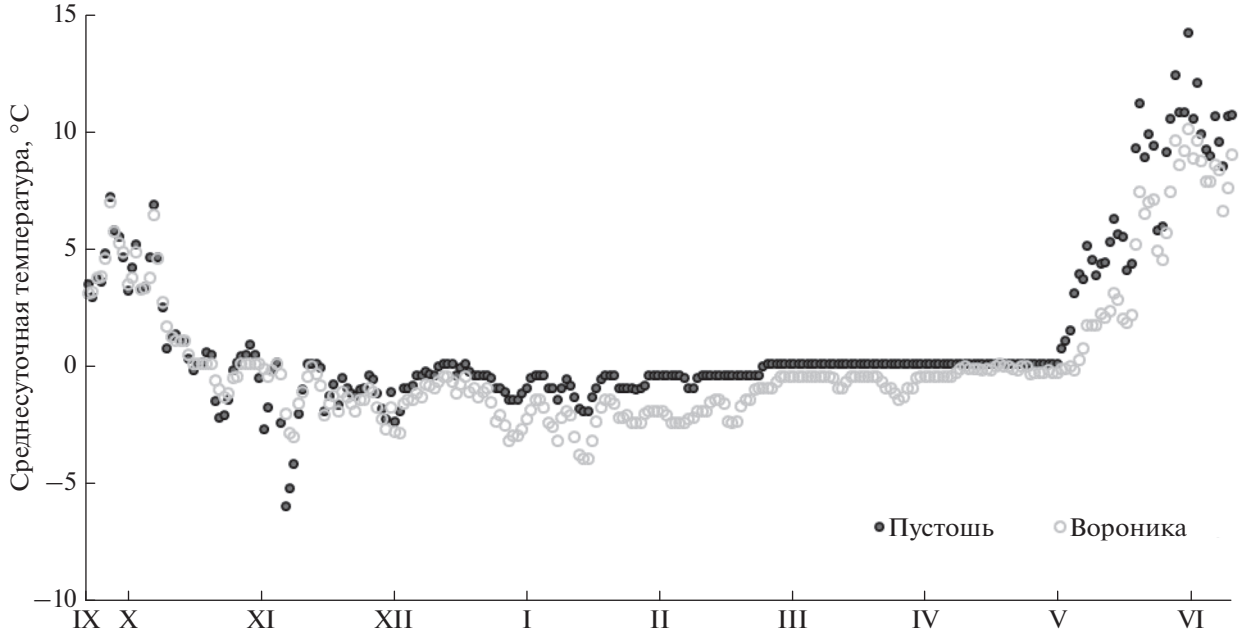

Рис. 1. Среднесуточная температура почвы на глубине 2 см на участке с полностью нарушенным напочвенным покровом (“пустошь”) и под разрастающейся куртиной вороники (“вороника”) с 22 сентября 2014 г. по 10 июня 2015 г.

риод исследований в почве на пустоши также были значительно выше по сравнению с почвой под вороникой.

Снежный покров оказывает значительное влияние на температуру почвы в зимний период. Согласно данным метеостанции, непостоянный снежный покров мощностью 0.5–5 см на территории присутствовал с 14 октября по 11 ноября 2014 г. и с 27 октября по 2 ноября 2015 г. Постоянный снежный покров оба сезона держался около 180 дней. Из них в 2014/2015 гг. 132 дня высота снежного покрова превышала 30 см и 93 дня – 40 см. Максимальной мощности – 58 см он достиг 1 апреля 2015 г. В 2015/2016 гг. 113 дней высота снега была более 30 см, 80 дней – 40 см, 59 дней – более 50 см. Максимальная высота – 69 см была обнаружена 28 февраля 2016 г.

Ход среднесуточных температур за период исследования. Соотношение среднесуточной температуры почвы между разными участками за период исследований не было постоянным и зависело от периода времени (рис. 1). В осенний период с 22 сентября до 12 ноября 2014 г. (до формирования постоянного снежного покрова по данным метеостанции) среднесуточная температура почвы под вороникой менее четко следовала за изменениями температуры воздуха по сравнению с почвой пустоши. В конце сентября благодаря солнечной активности почва пустоши днем прогревалась сильнее, но в вечерние и ночные часы остывала значительнее. В результате различия среднесуточной температуры почвы между пустошью и вороникой были незначительными – на 0.2 ± 0.1°C (здесь и далее: среднее ± стандартное отклонение). При этом в 56% случаев температура была выше под пустошью, а в 44% – под вороникой.

В октябре–первой декаде ноября среднесуточная температура почвы пустоши также более четко следовала за ходом температуры воздуха ($r = 0.81$). При этом разница между воздухом и почвой пустоши сокращалась с каждым новым случаем резкого похолодания: 22 октября температура почвы на пустоши была на 9.6°C, 1 ноября – на 2.3°C, а 6 ноября только на 1.5°C выше по сравнению с воздухом. В эти первые три эпизода резкого похолодания, снижение температуры почвы под вороникой запаздывало на 1–2 дня, и было менее значительным по сравнению с почвой пустоши. Например, 6 ноября, когда среднесуточная температура почвы пустоши резко снизилась до минимальной среднесуточной за весь период наблюдений (–5.9°C), температура почвы под вороникой была почти на 4°C выше. В этот период среднесуточная температура почвы под пустошью в 57% случаев была выше, чем под вороникой на 0.3 ± 0.2°C. В 44% случаев почва под вороникой была теплее, но ее преимущество было значительнее: на 0.9 ± 1.0°C (рис. 1).

Среднесуточная температура воздуха в период с 12 ноября 2014 г. (сформировался постоянный снежный покров) до 30 марта 2015 г. (переход температуры воздуха через 0°C) составила –7.4 ± ± 7.4°C. Благодаря термоизоляционным свойствам снежного покрова среднесуточная темпе-

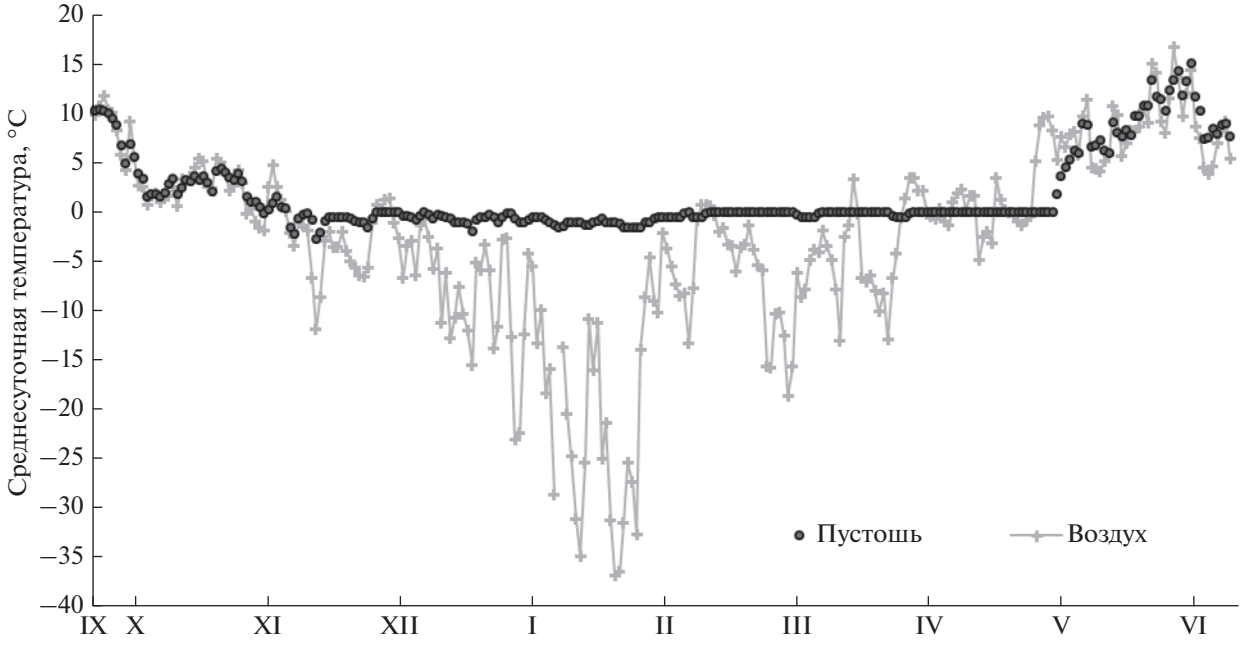

Рис. 2. Среднесуточная температура почвы на глубине 2 см на участке с полностью нарушенным напочвенным покровом (“пустошь”) и атмосферного воздуха (данные метеостанции “Мончегорск”, www.rp5.ru) с 22 сентября 2015 г. по 10 июня 2016 г.

ратура почвы зимой и ее варьирование на обоих участках было значительно ниже: −0.5 ± 0.6°С – для пустоши и −1.5 + 0.9°С – для воронки.

В почве пустоши варьирование среднесуточной температуры постепенно уменьшалось по мере увеличения мощности снега. Начиная с 24 февраля 2015 г., когда мощность снега по данным метеостанции достигла 50 см, и до 1 мая среднесуточная температура почвы пустоши устойчиво держалась на +0.1°С. В отличие от весенне-летнего и осеннего периодов, среднесуточная температура почвы под вороникой в зимний период была устойчиво ниже, чем в пустоши и она продолжала, хотя и слабо реагировать на резкие снижения температуры воздуха в течение всего зимнего периода. Именно на зимний период (13–14 января 2015 г.) пришлась минимальная среднесуточная температура −3.9°С в почве под вороникой, когда температура воздуха несколько дней держалась ниже −30°С.

Причиной различий хода среднесуточных температур почвы между участками в зимний период может быть пространственное варьирование на площадке мощности и плотности снега, которые оказывают значительное влияние на теплопроводность снега и интенсивность воздухообмена почвы с атмосферой [9]. То есть в данном случае над куртиной вороники мощность снега (возможно из-за приподнятости поверхности над пустошью) или плотность (из-за шероховатости поверхности) снега были меньше по сравнению с пустошью.

Из-за значительного многолетнего и пространственного варьирования мощности и плотности снежного покрова (см. выше) можно допустить возможность более сильного промерзания почвы на всей площадке в малоснежные годы.

С 1 марта до начала мая снежный покров продолжал предохранять почву от резкого падения температуры. Устойчивый переход через ноль в сторону положительных температур для воздуха был отмечен 30 марта 2015 г. В почве это событие было отмечено значительно позже: 2 и 6 мая, для пустоши и под вороникой, соответственно, когда мощность снега на метеостанции составляла уже менее 30 см. В отличие от осеннего периода, в весенне-летний период с 6 мая по 10 июня среднесуточная температура почвы под вороникой была устойчиво ниже (на 2.5 ± 0.9°С) по сравнению с почвой пустоши. Различия по температуре почвы между двумя участками были значимы согласно U-критерию Манна-Уитни при $p < 0.01$. Распределение среднесуточной температуры в почвах обоих участков достоверно при $p < 0.01$ коррелировало с температурой воздуха: $r = 0.83$ и 0.80 для пустоши и вороники, соответственно. Относительно воздуха температура почвы пустоши была в 47% случаев на 2 ± 0.9°С выше; почва под вороникой была ниже в 75% случаев на 3.1 ± 1.7°С.

Наблюдения за температурой почвы пустоши в 2015/2016 гг. (табл. 1, рис. 2) также показали, что среднесуточная температура в бесснежный период достоверно коррелировала с температурой воздуха: $r = 0.93$ для осени (22 сентября–6 ноября) и

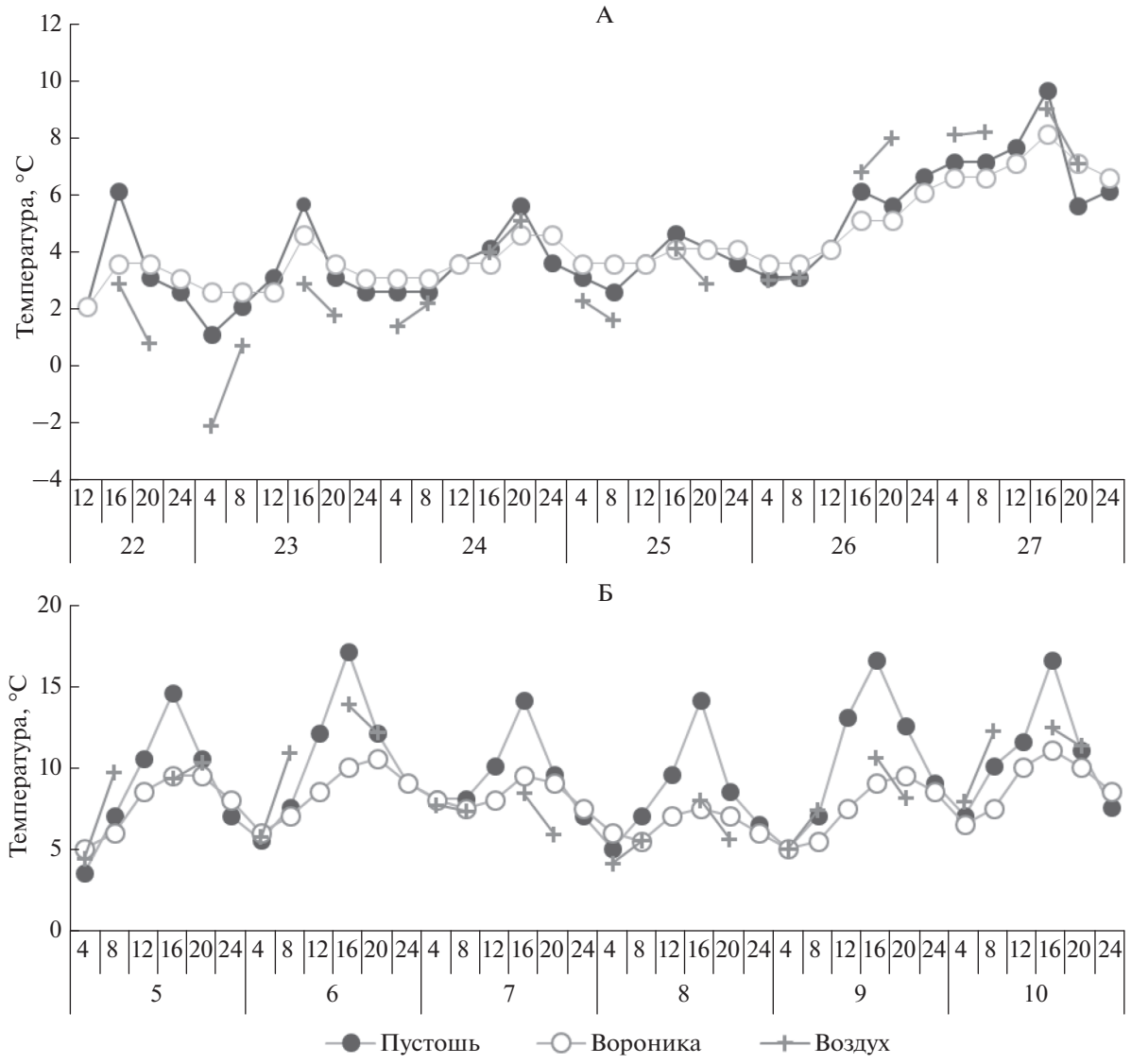

Рис. 3. Суточный ход температуры почвы пустоши и под вороникой и температуры атмосферного воздуха (данные метеостанции “Мончегорск”, www.rp5.ru): А – с 22 по 27 сентября 2014 г.; Б – с 5 по 10 июня 2015 г.

0.78 для весенне-летнего периода (2 мая–10 июня). При этом в 68% случаев почва пустоши была теплее воздуха на 1.8 ± 1.0°С, в 32% – на такую же величину – ниже. Из-за более теплой погоды температура почвы пустоши осенью не опустилась ниже 0°С в бесснежный период. А снежный покров мощностью 8 см значительно смягчил резкое снижение температуры воздуха 12 ноября до –11.9°С, поэтому минимальная среднесуточная температура почвы пустоши в этот сезон была выше, чем в сезон 2014/2015 гг. и составила всего –2.7°С.

Под снегом почва пустоши зимой 2015/2016 гг. продолжала с отставанием на один день слабо реагировать на резкие изменения температуры воздуха. Например, при снижении температуры воздуха до –23°С 28 декабря при мощности снега 33 см температура почвы снизилась только до –0.9°С 29 декабря; при температуре ниже –36°С 20 и 21 января и мощности снега 42 см температура почвы с 22 по 26 января была –1.2°С. И с 11 февраля, когда мощность снега достигла 50 см, и до конца апреля температура почвы устойчиво держалась на 0.1°С.

Суточный ход температуры. В сезон 2014/2015 гг. варьирование температуры почвы в течение суток отчетливо проявилось в начале осени до 10 октября (переход через 0°С воздуха) и возобновилось 2 мая в почве пустоши и 6 мая в почве под вороникой (рис. 3, А, 3, Б). Оно обусловлено, главным образом, суточным ходом солнечной активности, снижаясь и повышаясь вслед за высотой солнцестоя-

ния и продолжительностью дня. С 10 октября (переход температуры воздуха через 0°С) до 12 ноября (установился постоянный снежный покров) для пустоши и до конца зимы для почвы под вороникой изменение температуры в течение суток определялось температурой воздуха и редко имело определенную приуроченность минимальных и максимальных значений к определенному времени суток. Суточный ход температуры почвы на каждом из обследованных участков имел свои специфические особенности и зависел от времени года и погодных условий. Например, от наличия облачности: в солнечные дни почва лучше прогревается днем и сильнее охлаждается ночью, обусловливая более высокое варьирование температуры в течение суток.

В почве пустоши максимальная температура и осенью (22 сентября–10 октября) и в весенне-летний (7 мая–10 июня) период в наших исследованиях чаще всего (в 74% случаев осень и 94% – весна-лето) приходилась на 16 ч. Более детальные исследования в ненарушенной экосистеме [10] показали, что максимум температуры поверхности почвы приходится на 13–15 ч, на глубине 5–10 см максимум запаздывает на 2–3 ч. То есть в наших исследованиях в 16 ч фиксировалась близкая к максимуму суточная температура.

В почве под вороникой суточный температурный максимум только в 76% случаев приходился на то же время и в 24% случаев сдвигался на срок позже. Для нее также характерна небольшая разница температуры между 16 и 20 ч.

В *осенний период* наиболее высокие различия по максимальной суточной температуре почвы между участками – 2.4°С были обнаружены в самом начале исследований – 22 сентября. Затем различия между участками по максимальным дневным температурам почв постепенно снижались, достигая значений, не превышающих 0.5°С к 20 октября.

Начиная с 8 мая, когда почва на обоих участках начала интенсивно прогреваться в дневное время, температура почвы на пустоши в 16 ч была от +1 (24 мая высокая облачность и южный ветер весь предшествующий день) до +10.1°С (31 мая – ночью дул северный ветер, днем было ясно и подул теплый ветер с ВЮВ) выше по сравнению с почвой под вороникой. Различия по температуре почвы между участками в утренние и вечерние часы были значительно ниже.

Минимальная суточная температура почвы на обоих участках, как и в ненарушенных экосистемах [10] в весенне-летний период более четко приходилась на ночные часы – 24 и 4 ч. При этом с 8 по 24 мая минимальная суточная температура почвы под вороникой была на 0.5–2°С ниже по сравнению с почвой пустоши. Возможно, это обусловлено более интенсивным и глубоким промерзанием почвы под вороникой в зимний период (рис. 1). В период с 24 мая по 11 июня почва пустоши ночью была, как правило, от 0.5 до 1.5°С холоднее почвы под вороникой.

Сравнение суточного хода температур почвы с другими метеорологическими данными показало, что почва под вороникой лучше удерживает тепло ночью в малооблачную погоду и/или когда дует северный ветер. Например, 5 июня в отсутствии облаков и при северном направлении ветра температура в почве пустоши ночью снизилась на 10°С (с 13.7 до 3.6°С). За это же время температура почвы под вороникой снизилась всего на 2°С: с 7.1 до 5.1°С. То есть в начале вегетационного периода присутствие даже угнетенного напочвенного покрова, разрастающегося по свежему опаду листьев березы, предохраняет почву от резкого снижения температуры ночью в наиболее неблагоприятные по погодным условиям дни.

Если положение максимальной суточной температуры в почве пустоши в период с 22 сентября по 10 октября (переход через 0°С воздуха), как и в весенне-летний период, довольно четко приходится на 16 ч, то положение минимальной температуры осенью менее определенно. Суточный минимум в почве на обоих участках в осенний период может приходиться, как на ночное, так и на вечернее или утреннее время. При этом различия между вечерними, ночными и утренними часами по температуре почвы на обоих участках сглаживались.

В отличие от весенне-летнего периода, минимальная суточная температура почвы под вороникой в период с 22 сентября по 10 октября была на 0.6 ± 0.6°С выше по сравнению с почвой на пустоши. Наиболее существенное превышение минимальной суточной температуры почвы под вороникой по сравнению с пустошью отмечалось при резком снижении температуры воздуха до отрицательной температуры. При этом почва на обоих участках в этот период удерживают температуру в области положительных значений, и почва под растительностью с наличием свежего опада делает это более эффективно.

С 10 октября (дата перехода среднесуточных температур воздуха через 0°С) и до 21 октября (дата перехода среднесуточной температуры почв через 0°С) почва под вороникой все сроки наблюдений оставалась в положительной области (+0.1°С), тогда как в почве пустоши в ночные часы температура один день – 16 октября вслед за резким снижением температуры воздуха до –6.5°С впервые снизилась до –1°С.

Поздней осенью с 21 октября по 12 ноября до установления постоянного снежного покрова почва под вороникой также более успешно поддерживала ночную температуру и смягчала первые ночные заморозки в отличие от почвы пусто-

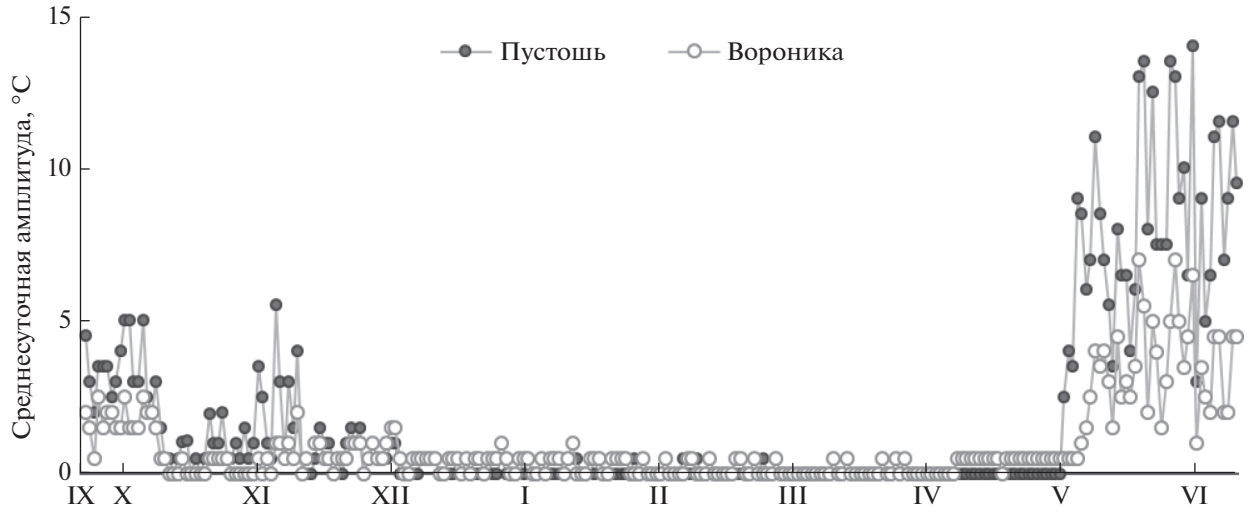

Рис. 4. Суточная амплитуда температуры почвы пустоши и под вороникой с 22 сентября 2014 г. по 11 июня 2015 г.

ши. Например, 6 ноября при падении температуры воздуха ночью до −11.4°C, температура почвы под вороникой была на 5.6°C выше по сравнению с пустошью: −1.4 и −7.0°C соответственно.

Суточные амплитуды колебаний температуры характеризуют способность почв поддерживать температурный гомеостаз в течение суток. С 22 сентября по 20 октября 2014 г. и с начала мая (2 мая для пустоши и 6 мая 2015 г. для почвы под вороникой) в течение суток температура почв находились в области положительных температур. Суточная амплитуда температуры в почве пустоши в эти периоды была всегда выше, чем в почве под вороникой (рис. 4). Согласно *U*-критерию Манна-Уитни, амплитуда температуры почвы пустоши в эти периоды была значимо выше, чем в почве под вороникой. При этом величины суточной амплитуды достоверно ($p \le 0.01$) коррелировали между двумя участками: с 22 сентября по 20 октября $r = 0.88$ ($n = 28$); с 6 мая по 10 июля $r = 0.81$ ($n = 35$).

В период с 22 сентября по 20 октября суточная амплитуда в почве на пустоши варьировала от 0 до 5°C, в почве под вороникой – от 0 до 2.5°C. Наиболее высокие амплитуды приходились на малооблачные дни с резкой сменой направления ветра в течение суток (2, 3 и 6 октября). Минимальное варьирование – 0°C – в облачные дни с устойчивым южным ветром (13, 17 и 19 октября).

В весенний период в почве пустоши суточное варьирование возобновилось со 2 мая, в почве под вороникой 6 мая. При этом почва на обоих участках очень резко увеличивала суточную амплитуду, и к 9 мая в почве под пустошью она достигла 11°C, а в почве под вороникой – 4°C. Максимальная амплитуда суточной температуры в наших исследованиях пришлась на конец мая: и достигла 14°C в почве пустоши (19, 20, 22, 26 и 31 мая), и 7°C под вороникой (19 и 27 мая). Наибольшую суточную амплитуду температуры в это время обеспечивает меньшая облачность в дневное время и смена направлений ветра в течение суток.

Очень важным для экосистемы является способность почв поддерживать температурный гомеостаз и смягчать ночные заморозки осенью в период между переходом среднесуточных температур почвы через 0°C (21 октября 2014 г.) и формированием постоянного снежного покрова (12 ноября). В этот период было отмечено несколько эпизодов (21–23 октября, 31 октября–1 ноября и 5–8 ноября), когда температура почвы пустоши в ночной период резко опустилась вслед за температурой воздуха. Наиболее высокие амплитуды температуры были отмечены 5–6 ноября: с 0.1°C в 4 утра 5 ноября температура почвы пустоши упала до −7.5°C (абсолютный минимум за период наблюдений) к 8 ч утра 6 ноября. За это время температура почвы под вороникой снизилась только с +0.1 до −1.9°C.

Метеоданные за 2005–2019 гг. Наиболее опасными явлениями для растений являются заморозки в отсутствии снежного покрова, когда его воздействию одновременно подвергается, и надземная часть растений, и корни. Для оценки частоты встречаемости заморозков в отсутствии снежного покрова на обследуемой территории в настоящее время был проведен анализ данных метеостанции Мончегорск (rp5.ru) за 2005–2019 гг. Продолжительность бесснежного периода за эти годы варьировала от 146 (2017 г.) до 200 (2011 г.) дней (среднее – 148 дней). Продолжительность периода без заморозков была от 0 (2019 г.) до 53 (2018 г.) дней (среднее – 27 дней) короче.

Интенсивность осенних заморозков, включая дни с мощностью снега 1 см и менее, варьировала от 0.1 до 11.4°C. Распределение заморозков осенью по интенсивности было следующим: ниже −5.0°C – 12%, от −4 до −5°C – 8%, от −3 до −4°C – 12%, от −2 до −3°C – 16%, от −1 до −2°C – 20% и от −0.1 до −1°C – 32% случаев. Самый ранний осенний заморозок был отмечен 26 сентября 2012 г. Наиболее часто заморозки осенью случались в конце октября–начале ноября. Продолжительность заморозков осенью также значительно варьировала: от одного срока наблюдений (то есть ночного) до 22 дней (с 11 октября по 8 ноября 2009 г.).

Весенние заморозки в бесснежный период случались не каждый год. Их не было в 2005, 2015, 2018 и 2019 гг. Весенние заморозки могли особенно негативно сказаться на состоянии растений в 2007, 2010, 2012 и 2016 гг., поскольку им в эти годы предшествовал теплый период и растения уже начали расти. В остальные годы заморозки наступали сразу после схода снега и только задерживали начало вегетации. Весенние заморозки не были продолжительными и наблюдались только в ночное время. Их интенсивность также была низкой: в 46% случаев они были ниже −1°C.

Таким образом, метеоданные за 2005–2019 гг. показали, что угнетенные растения на сильно загрязненной и нарушенной площадке, кроме экстремального загрязнения подвергаются воздействию таких природных стресс-факторов, как периодические весенние и регулярные многочисленные осенние заморозки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рекогносцировочные исследования в течение 263 дней (с 22 сентября по 11 июля) 2014, 2015 и 2016 гг. в экстремально загрязненной и нарушенной экосистеме около медно-никелевого предприятия показали, что горизонт О подзола, состоящий из свежего опада листьев березы под разрастающимся небольшим кустом вороники, значительно отличался по всем температурным показателям от гор. О техногенной пустоши без напочвенного покрова.

Почва под единичной угнетенной куртиной вороники значительно эффективнее предохраняла почву от резких колебаний температуры: разница между абсолютным минимум и абсолютным максимумом за период исследований составила всего 17°C, а максимальная суточная амплитуда – 7°C. В тоже время почва пустоши, где на поверхности находится темноокрашенный горизонт О эродирующегося подзола, характеризовалась значительно более высокими амплитудами температур: около 30°C за весь период исследования и 14°C максимальная суточная.

Соотношение всех определенных температурных показателей почвы между обследованными участками за период исследований не было постоянным и зависело от периода времени. В *весенне-летний период,* в зависимости от погодных условий (облачность, устойчивость направления ветра) максимальная дневная температура почвы пустоши была от 1 до 10°C, а среднесуточная от 0.9 до 4.1°C выше, чем в почве под вороникой. Значительно более высокая дневная и среднесуточная температура в почве пустоши, преобладающей в структуре экосистемы, могут значительно усилить расход влаги на испарение и способствовать еще большему сдвигу водного режима всей экосистемы в сторону иссушения в летний период. Как показали дополнительные исследования, влажность разрушающегося гор. О пустоши, действительно, значимо, согласно *U*-критерия Манна-Уитни, ниже по сравнению с гор. О под вороникой.

В осенний период, несмотря на лучший прогрев в летний период, почва пустоши без напочвенного покрова обладает меньшим запасом тепла и быстрее начинает остывать, опускаясь до отрицательной температуры вслед за резкими снижениями температуры воздуха сначала в ночные часы, а затем и в течение суток. Абсолютный температурный минимум (−7.5°C) и минимальная среднесуточная температура (−5.9°C) в почве пустоши пришлись именно на осенний период до формирования постоянного снежного покрова на территории. Одновременные резкие снижения температуры, и воздуха, и почвы на большей части территории экосистемы осенью могут быть губительными для ослабленных сеянцев березы. Периодическое промерзание и оттаивание почвы в этот приод может быть причиной и морозного пучения с выталкиванием материала нижнего минерального горизонта BF и проводящих корней деревьев на поверхность.

Почва под вороникой обладала большим запасом тепла и дольше удерживала температуру почвы в положительной области осенью и значительно смягчала первые ночные заморозки. Дополнительным к солнечной энергии источником тепла здесь могут быть интенсивно протекающие в начале осени процессы разложения скапливающегося здесь опада березы.

В зимний и ранневесенний период снежный покров хорошо защищал почву на обоих участках от интенсивного промерзания. Вместе с тем, почва под вороникой продолжала реагировать на наиболее резкие снижения температуры воздуха в течение всего зимнего периода. Поэтому абсолютный минимум и минимальная среднесуточная температура (−3.9°C) в почве под вороникой были обнаружены 11 января 2015 г., когда температура воздуха несколько дней держалась ниже −30°C.

Вероятно, на этом участке экосистемы имел место более интенсивный воздухообмен между почвой и воздухом вследствие меньшей высоты и/или плотности снега. Зависимость интенсивности теплообмена с воздухом [9] от высоты и плотности снега означает, что на отдельных участках этой площадки, особенно в малоснежные зимы, почва может промерзать сильнее, также вызывая морозное пучение и выталкивание проводящих корней растений на поверхность, и последующую гибель дерева.

Таким образом, рекогносцировочные исследования показали, что такие изменения микроклимата, как дополнительное иссушение летом и одновременное резкое снижение температуры, и почвы, и воздуха осенью только из-за отсутствия напочвенного покрова на большей части территории могут быть дополнительным к экстремальному загрязнению и суровым климатическим условиям [10, 14] стресс-факторами для выживших растений и ослабленных сеянцев березы в техногенно нарушенной экосистеме около медно-никелевого предприятия. Они, вместе с экстремальным загрязнением, препятствуют реализации, имеющегося даже в этой сильно нарушенной экосистемы, потенциала к самовосстановлению древесного яруса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Современная трансформация почв Крайнего Севера в условиях техногенного воздействия”, ГЗ № 0229-2016-0003.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Фото сеянца березы (А), морозное пучение грунта с выходом на поверхность иллювиального BF горизонта (В) и выталкивание проводящих корней березы из почвы (С) на площадке мониторинга II-1 (8 км на север от комбината “Североникель”).

Рис. S2. Схема расположения площадки II-1, метеостанции Мончегорск и медно-никелевого комбината “Североникель” (А). Общий вид (В) площадки II-1 (8 км на север от комбината “Североникель”).

Рис. S3. Фото места установки температурных регистраторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Димо В.Н.* Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
2. *Дымов А.А., Старцев В.В.* Изменение температурного режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесосечных рубок // Почвоведение. 2016. № 5. С. 599–608.
3. *Кашулина Г.М.* Аэротехногенная трансформация почв европейского субарктического региона. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с. Ч. 2. 234 с.
4. *Кашулина Г.М.* Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. № 4. С. 493–505.
5. *Кашулина Г.М., Кубрак А.Н., Баскова Л.А., Коробейникова Н.М.* Влияние длительного экстремального загрязнения выбросами комбината “Североникель” на содержание доступных для растений P, K, Ca и Mg в подзолах // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № 1/2. С. 184–193.
6. *Кашулина Г.М., Переверзев В.Н., Литвинова Т.И.* Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината “Североникель” // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1265–1275.
7. *Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е., Кудрявцева А.Д., Турбабина К.А.* Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных промышленных выбросов в Кольской Субарктике // Журн. общей биологии. 2016. Т. 77. № 2. С. 147–165.
8. *Крапивин В.Ф., Потапов И.И.* Лесной пожар и радиационный баланс бореального леса // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2010. № 5. С. 77–82.
9. *Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А.* Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // Лед и снег. 2013. № 3(123). С. 63–70.
10. *Семко А.П.* Гидротермический режим почв лесной зоны Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1982. 142 с.
11. *Сухарева Т.А., Лукина Н.В.* Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104.
12. *Тишков А.А., Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Влияние синузий мохообразных на деятельный слой арктических почв // Известия РАН. Сер. географическая. 2013. № 3. С. 39–46.
13. *Черненькова Т.В., Кабиров Р.Р., Басова Е.В.* Восстановительные сукцессии северотаежных ельников при снижении аэротехногенной нагрузки // Лесоведение. 2011. № 6. С. 49–66.
14. *Яковлев Б.А.* Климат Мурманской области. Мурманск, 1961. 180 с.
15. *Aamlid D., Venn K.* Methods of monitoring the effect of air pollution on forest and vegetation of eastern Finnmark, Norway // Norwegian J. Agricultural Science. 1993. V. 7. P. 71–87.
16. *Alexeyev V.A.* Impacts of air pollution on far north forest vegetation // The Science of the Total Environment. 1995. V. 160/161. P. 605–617.
17. AMAP Assessment report 2006: Acidifying pollutants, Arctic Haze and Acidification in the Arctic. Arctic Mon-

itoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, 2006. 111 p.

18. *Kashulina G., Reimann C., Finne T.E., Halleraker J.H., Ayras M., Chekushin V.* The state of the ecosystems in the Central Barents Region: scale, factors and mechanism of disturbance // The Science of the Total Environment. 1997. V. 206. P. 203–225.
19. *Kashulina G., Caritat P. de, Reimann C.* Snow and rain chemistry around the "Severonikel" industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // Atmospheric Environment. 2014. V. 89. P. 672–682.
20. *Kozlov M.V.* Changes in wind regime around a nickel-copper smelter at Monchegorsk, Northwestern Russia // International J. Biometeorology. 2002. V. 46. P. 76–80.
21. *Manion P.D.* Tree disease concepts. Prentice Hall, New Jersey, 1991. 402 p.
22. *Reimann C., Kashulina G., Caritat P. de, Niskavaara H.* Multi-element, multi-medium regional geochemistry in the European Arctic: element concentration, variation and correlation // Applied Geochemistry. 2001. V. 16. P. 759–780.
23. *Reimann C., Koller F., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P.* Influence of extreme pollution on the inorganic chemical composition of some plants // Environmental Pollution. 2001. V. 115. P. 239–252.
24. *Salminen R., Chekushin V., Tenhola M. et al.* Geochemical atlas of eastern Barents region // J. Geochemical Exploration. 2004. V. 83. № 1–3. 530 p.

Comparative Analysis of Soil Temperature on Two Degraded Sites of the Technogenic Ecosystem of Nickel Industrial Complex (Kola Peninsula)

G. Kashulina[1, *], T. Litvinova[1], and N. Korobeinikova[1]

[1]*Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the KSC RAS, Apatity, Russia*

**e-mail: galina.kashulina@gmail.com*

Soil temperature was measured during 263 days in the damaged ecosystem, located 8 km north of the "Severonikel" industrial complex – the largest source of SO_2 and heavy metals in Northern Europe. The aim of the study was to compare the temperature regimes of the soil at a site with depressed crowberry cover with that at a site, where ground vegetation was completely destroyed by pollution – technogenic barren. Results of measurements demonstrated that, despite the depressed state of the crowberry, ground vegetation cover continues to perform its functions – protects soil from strong temperature fluctuations. In contrast, complete ground vegetation disturbance results in a significant increase in temperature amplitude of the upper layer of soil, diurnal and mean daily temperatures during summer. This can essentially increase the moisture evaporation and shift water regime of the damaged ecosystem toward dryness. In autumn, prior to the stable snow cover formation, the barren soil, on the contrary, froze more strongly after the sharp decrease in the air temperature. Thus, both extra-drying in summer and freezing during autumn can be an additional stress to extreme pollution stress-factors for survived trees and birch seedlings in the damaged ecosystem near emission source.

Keywords: soil temperature, Eroded Albic Podzol, ground vegetation, technogenic barren, copper-nickel industry

ПОЧВОВЕДЕНИЕ, 2020, № 9, с. 1144–1154

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.42:632.122.1

МИГРАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИЛЬНОЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ В ОКРЕСТНОСТЯХ КОМБИНАТА “СЕВЕРОНИКЕЛЬ” (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

© 2020 г. А. С. Фрид[a], *, Т. И. Борисочкина[a]

[a] *Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия*

**e-mail: asfrid@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.
После доработки 13.09.2019 г.
Принята к публикации 27.12.2019 г.

Оценена миграционная подвижность Cd, Co, Cu, Ni, Zn в подзолах (Podzols) и органогенных почвах (Histosols) в зоне многолетнего воздействия Мончегорского медно-никелевого комбината (Мурманская область) с использованием параметров диффузионной и конвективно-диффузионной моделей. Найденные значения диффузионных параметров не противоречат данным по другим регионам. В большинстве случаев конвективный перенос тяжелых металлов был достоверно направлен вниз со скоростью от 0.126 до 0.31 см/год, в остальных случаях значимо не отличался от нуля. Подзолы и органогенные почвы в среднем по совокупности тяжелых металлов не различались по диффузионным параметрам, но различались по скорости конвективного переноса, которая в органогенных почвах была значительно меньше. Модельные оценки поступления загрязняющих элементов в почву не были связаны с расстоянием от комбината. Из-за недостаточного объема выборки не удалось оценить связи параметров миграции со свойствами почв, а связь их с химической подвижностью (вытяжка ацетатно-аммонийным буфером) проявилась в виде недостоверной тенденции.

Ключевые слова: кадмий, кобальт, медь, никель, цинк, миграционная подвижность в почвах, динамические модели миграции, подзолы (Podzols), органогенные почвы (Histosols), Кольский полуостров

DOI: 10.31857/S0032180X20090051

ВВЕДЕНИЕ

Имеется довольно много публикаций, посвященных изучению степени загрязнения почвенного покрова в зонах воздействия различных промышленных предприятий, особенно металлургических [2–4, 6–9, 26, 31–33]. Значительно реже изучают проникновение загрязняющих веществ в этих зонах вглубь почвы. В частности, к последним работам относится работа Кашулиной [6], посвященная загрязнению почв в зоне воздействия Мончегорского медно-никелевого комбината (“Североникель”). Однако полученные данные по вертикальной миграции загрязняющих веществ практически не анализировались с помощью известных математических миграционных моделей. В последние годы нами в этом направлении проводится систематическая работа на основе анализа литературных и авторских экспериментальных данных [16–25, 27, 28].

Цель работы – оценка параметров моделей вертикальной миграции в почвах тяжелых металлов (**ТМ**), выпадающих на почвы в результате многолетних выбросов Мончегорского медно-никелевого комбината. Знание этих параметров позволяет осуществлять ретроспективный и перспективный прогнозы загрязнения профилей почв для целей мониторинга. Кроме того, пополняется база данных аналогичных параметров для разных регионов, почв, загрязняющих элементов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на основе экспериментальных данных трех публикаций [6–8]. Медно-никелевый комбинат находится в Мурманской области РФ (Кольский полуостров). По данным сайта комбината, начало его непрерывной работы относится к 1945 г. Почвенные образцы на загрязнение отобраны в 2001 г. [6]; для расчетов принят срок загрязнения до отбора 56 лет. В работе [6] представлены концентрации Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn по трем катенам (I, II, IV), девяти разрезам в различных почвах региона. Катены расположены на разных расстояниях в северных направлениях от комбината. Названия почв использованы из [6].

Каждый концентрационный профиль рассматривался с точки зрения пригодности его для анализа с помощью моделей миграции: наличие четко выраженных градиентов не менее, чем на трех горизонтах (слоях), причем ниже подстилок. Последнее связано с тем, что подстилки заведомо резко отличаются по миграционным параметрам от минеральных горизонтов. Поэтому при анализе профиля с учетом подстилок потребовалось бы использовать двухслойную модель миграции, точное решение которой при данных граничных условиях нам неизвестно, а численные методы решения в данной работе, как и в других, мы не использовали. Отобранные для последующего анализа концентрационные профили представлены в табл. 1. Различные почвенные свойства этих объектов представлены в работах [6–8].

Для анализа данных табл. 1 использовали две динамические модели миграции. *Диффузионная модель* использована при допущении в данной ситуации двух граничных условий, предполагающих либо постоянный (усредненный за много лет загрязнения) поток загрязняющего элемента через поверхность почвы (границу с атмосферой) или через границу подстилки и верхнего минерального горизонта, либо постоянную концентрацию загрязняющего элемента на тех же границах, изменяющуюся скачком в некоторый искомый нами момент времени. Последнее граничное условие применялось в тех случаях, когда концентрация загрязняющего элемента не убывала сверху вниз, а имела наибольшее значение на некоторой глубине. Нами предполагалось, что это могло быть связано с резким сокращением выбросов завода (например, после модернизации процессов технологии и очистки). Автор экспериментальных данных [6] высказала другие предположения для разреза IV-3: снижение аккумулирующей способности верхнего горизонта, усиление вертикальной миграции (в том числе техногенной пыли), латеральный перенос с вышерасположенного склона к средней части профиля. Не отвергая эти предположения, мы решили попытаться описать подобные концентрационные профили в рамках диффузионной модели, тем более, что подобный эффект наблюдался не только в разрезе IV-3, но и в подзолах.

Для первого граничного условия и нулевой начальной концентрации в почве решение диффузионного уравнения имеет вид [5, 10]:

$$C(x,t) = 2q\sqrt{(Dt/\pi)}\exp(-x^2/4Dt) - qx\mathrm{erfc}(x/2\sqrt{(Dt)}),$$

где $C(x, t)$ – концентрация диффундирующего (мигрирующего) вещества для координаты x и времени t, D – коэффициент диффузии, $\mathrm{erfc}(...) = 1 - \mathrm{erf}(...)$, $\mathrm{erf}(...)$ – интеграл вероятности. Если начальная концентрация вещества не равна нулю, общее решение приведено в [10, с. 29].

Для второго граничного условия на поверхности почвы (и нулевой начальной концентрации) в течение времени $0 < t < t_0$ поддерживается концентрация поступающего вещества C_1, а при $t > t_0$ – C_2. Тогда решение диффузионного уравнения имеет вид [5, 10]:

$$\text{при } 0 < t < t_0 \; C(x,t) = C_1\mathrm{erfc}(x/2\sqrt{(Dt)}),$$

$$\text{при } t > t_0 \; C(x,t) = C_1\mathrm{erfc}(x/2\sqrt{(Dt)}) + (C_2 - C_1)\mathrm{erfc}[x/2\sqrt{(D(t-t_0))}].$$

В тех же источниках приведено более общее решение, когда начальная концентрация вещества в почве не равна нулю.

Вторая – *конвективно-диффузионная модель* – предполагала на тех же вышеупомянутых границах массообмен элемента между аэрогенными выпадениями (или подстилкой) и почвой (также усредненный за много лет). По этой модели также возможно образование максимума концентрации не на поверхности, а на некоторой глубине.

Граничное условие на поверхности почвы ($x = 0$) в этом случае записывается:

$$-Dk\partial C/\partial x + VC = VC_{\text{вх}},$$

где Dk – коэффициент конвективной диффузии, V – скорость направленного (конвективного) потока вещества, $C_{\text{вх}}$ – концентрация вещества во входном потоке. Решение конвективно-диффузионного уравнения в этом случае будет [29]

$$C(x,t) = C_i + (C_{\text{вх}} - C_i)A(x,t),$$

$$A(x,t) = 0.5\mathrm{erfc}((x - Vt)/2\sqrt{(Dkt)}) + \sqrt{(V^2t/\pi Dk)}\exp[-(x - Vt)^2/4Dkt] - 0.5(1 + Vx/Dk + V^2t/Dk) \times \exp(Vx/Dk)\mathrm{erfc}((x + Vt)/2\sqrt{(Dkt)}),$$

где C_i – начальная концентрация мигрирующего вещества в почве. Все приведенные решения уравнений миграции представлены также в работах [17–20].

Параметры этих моделей миграции – коэффициенты диффузии (D) и конвективной диффузии (Dk), скорость конвективного переноса элемента (V) предполагались постоянными по глубине и времени как результат многолетнего усреднения реальных изменений почвенных условий и скоростей почвенных процессов. Оцененные таким образом значения параметров называют “кажущимися”.

Процедура поиска оценок параметров моделей миграции состояла в следующем. Для каждого горизонта определяли диапазон концентрации, исходя из ошибок измерения (в работе [6]

Таблица 1. Валовые концентрации элементов и доли (% от валового) их подвижных форм (1 М ацетатно-аммонийный буфер с pH 4.8) в горизонтах разрезов, отобранных для анализа с помощью миграционных моделей (из [8])

Горизонт	Глубина, см	Валовое содержание, мг/кг					Доля подвижной формы, % от валового содержания				
		Cd	Co	Cu	Ni	Zn	Cd	Co	Cu	Ni	Zn
Разрез I-3. Торфяная эутрофная почва (Sapric Histosol), 17.1 км, ССВ											
TE1	0–3	2.3		823	1684	85.5	17.7	4.4	12.4	5.3	13.9
TE2	3–10	1.53	–	141	182	161	17.6	–	3.0	23.9	6.8
TE3	10–20	0.56		52.4	106	97.5	32.1	–	–	22.9	7.4
Фон		0.50–0.58		50–60	0–100	70	–	–	–	–	–
Разрез II-1. Подзол иллювиально-железистый эродированный (Rustic Podzol), 7.9 км, С											
O_{er}	0–2		234	4058	6025			1.1	1.6	1.7	
E	2–5		<12	106	222			–	49.1	2.5	
BF1	5–16		61.9	139	431			2.6	33.2	1.0	
BF2	16–26	–	38.3	54.3	307	–	–	–	26.3	1.2	–
BC1	26–56		46.5	50.7	270			–	21.2	0.8	
2BC2	56–66		38.6	27.3	249			–	5.1	1.1	
Фон			–	23–68	210			–	–	–	
Разрез II-3. Торфяная эутрофная почва (Sapric Histosol), 7.6 км, С											
TE1	0–10	75.1		1773	2278	92.6		35.4	20.8	33.0	19.1
TE2	10–20	27.1		140	592	262		64.4	7.3	41.9	5.5
TE3	20–30	<12		124	258	97.5	–	–	3.4	16.9	4.7
Фон		7–10		110–120	200–230	70		–	–	–	–
Разрез IV-2. Подзол эродированный остаточно-оруденелый (Podzol), 3.3 км, ССЗ											
O_{er}	0–4	4.6		4946	9034		15.9		–	1.3	
E	4–7	0.19		205	174		31.1		63.2	5.8	
BF	7–11	0.35		352	378		20.3		54.9	3.2	
$2BF_{fh}$	11–26	0.26	–	112	225	–	18.8	–	26.7	2.0	–
3BC1	26–43	0.15		25.2	212		3.3		–	12.5	
3BC2	43–60	0.11		29.0	129		1.8		–	5.8	
3BC3	60–70	0.14		38.5	160		2.9		–	2.1	
Фон		0.12		25–27	–		–		–	–	
Разрез IV-3. Минерально-перегнойно-торфяная эутрофная “осушенная” почва (Histic Cryosol), 3.4 км, ССЗ											
$TE_{mr,h1}$	0–3	3.9	198	3533	5908	160	22.4	4.3	–	5.8	4.2
$TE_{mr,h2}$	3–10	7.4	326	6336	3324	195	27.9	5.2	–	21.9	5.7
TE3	10–20	4.2	92.9	1127	9278	120	31.8	37.1	11.2	10.2	23.1
TE4	20–30	3.3	30.9	1318	1095	63.4	45.6	56.9	20.5	40.2	17.4
Фон		2.9	30	1250	–	0–50	–	–	–	–	–

они не указаны) или задавая их в виде 10%-ой относительной ошибки. В результате получали коридор (диапазон) концентраций по глубинам. Далее, задавая различные сочетания значений параметров модели (коэффициент диффузии, поток или концентрацию на верхней границе, срок скачка концентрации – для диффузионной модели; коэффициент конвективной диффузии, скорость конвективного переноса элемента, концентрацию во входном потоке на верхней границе – для конвективно-диффузионной модели), подбирали такие сочетания, чтобы рассчитанные по модели концентрации по всем глубинам укладывались в вышеуказанный коридор значений. Такой подход

позволял одновременно получить диапазоны возможных значений параметров, а в некоторых случаях и разные их равноправные сочетания.

Кроме того, для признания модели и найденных оценок значений параметров адекватными экспериментальным данным сравнивали содержания загрязняющего элемента в почве (за вычетом фоновых) с рассчитанными по моделям входами загрязняющего элемента в почву за известное время. Если разница составляла больше пяти единиц во второй значащей цифре, то модель и соответствующие оценки параметров признавали недостаточно адекватными. В результате такого контроля не было найдено адекватных решений для концентрационных профилей Co (разрез II-1), Ni (разрезы IV-2 и IV-3), отобранных для анализа.

Фоновые содержания подбирали, исходя из данных конкретного разреза, и они обычно не противоречили региональным фоновым содержаниям, представленным в работе [6]. Только для основных в данной зоне загрязняющих элементов (Cu и Ni) в некоторых разрезах фоновые концентрации в нашем случае оказались больше.

Несмотря на вышеуказанные упрощения (усреднения), имеются принципиальные сложности при анализе подобных экспериментальных данных. Во-первых, концентрационные профили (по глубине) загрязняющих веществ измеряют только один раз через много (десятки) лет загрязнения. Промежуточных сроков отбора образцов нет, поэтому остается неизвестным, как шло загрязнение почв на разных временны́х этапах. В результате нет дополнительной и убедительной возможности проверить адекватность моделей и их параметров. Результаты анализа вертикальной миграции тяжелых металлов в почвах, когда было проведено два отбора образцов с интервалом в 30 лет, представлены в работах [16, 27].

Во-вторых, свойства почв тоже определяют в единственный срок оценки загрязнения. Поэтому имеет место некорректность при сравнении усредненных за много лет параметров моделей миграции и разовых оценок свойств почв. Исходные (до загрязнения) значения свойств почв как правило неизвестны, а использование для этих целей свойств обычно удаленных фоновых разрезов затруднено пространственным варьированием и неизвестным естественным временны́м трендом их изменения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Найденные значения оценок параметров моделей миграции, сгруппированные по элементам, представлены в табл. 2.

Первое, что обращает на себя внимание – нет четкой зависимости по большинству элементов между расстоянием от завода и параметрами поступления элементов в почву (q, C_1, C_2, $C_{вх}$). Нет такой зависимости даже по экспериментально измеренным содержаниям в верхних слоях почв, учитывая и подстилки (табл. 1).

Второе касается сроков резкого уменьшения аэрогенных выпадений на поверхность почв: в разрезе IV-3 для Cd, Cu, Co, Zn получился срок этого скачка от начала работы комбината около 50 лет, а для чисто торфяных почв (разрезы I-3 и II-3) и только для цинка – около 15 лет. Как последний результат интерпретировать – пока неясно.

Если более подробно рассмотреть изменение входной концентрации загрязняющего элемента по катенам и почвам, то можно заметить, что для торфяных почв и минерально-перегнойно-торфяной, независимо от расстояния и направления от завода, высоты́ местности, входные потоки загрязняющих элементов значительно больше, чем для подзолов. Это видно для Cd, Cu, Ni, для которых удалось проанализировать те и другие почвы. Так как торфяные почвы расположены в локальных депрессиях [6], то вполне вероятны дополнительные поступления загрязняющих элементов с латеральными потоками на поверхность, в отличие от предположения автора работы [6] (см. выше).

Сопоставим полученные величины диффузионных параметров миграции элементов в почвах с имеющимися литературными данными, оцененными для почв в полевых условиях. В основном, они получены нами в предыдущих работах (табл. 3). Значения параметров для Cd сопоставимы со значениями для других почв, кроме орошаемых почв Египта. Та же ситуация для Co, Cu, Ni (кроме одной из залежей в Оренбургской обл.) и Zn.

Сводка основных параметров моделей миграции, полученных в данной работе, представлена в табл. 4. Следует обратить внимание, что для торфяных почв (разрезы I-3 и II-3) только для цинка отмечен направленный вниз конвективный перенос, а для остальных загрязняющих элементов он достоверно не отличался от нуля. Для других трех почв конвективный перенос всегда отличался от нуля для всех элементов. По-видимому, в органогенных почвах цинк в значительно большей степени (или большее время), чем другие элементы находился в почвенном растворе. Скорость достоверного конвективного переноса элементов составила от 0.126 до 0.31 см/год. Сопоставление значений параметров D и Dk между элементами для разных почв не дало четкой картины; даже ход изменений этих параметров в одной и той же почве различался.

Видно также, что только для меди имеется 5 значений параметров Dk, в остальных случаях имеем лишь 2–3 значения, не позволяющие более глубоко изучить зависимости параметров миграции отдельных элементов от свойств почв. Поэтому мы попытались подойти к этому вопросу, объединив все элементы в одну выборку.

Таблица 2. Параметры моделей миграции тяжелых металлов в почвах

Разрез	Почва	Диффузионная модель					Конвективно-диффузионная модель		
		$D \times 10^8$, см^2/с	постоянный поток на верхней границе (q), мг/(см^2 с)	скачок концентрации на верхней границе			$Dk \times 10^8$, см^2/с	$V \times 10^9$, см/с	$C_{вх}$, мг/кг
				время скачка, годы	концентрация, мг/кг				
					до скачка (C_1)	после скачка (C_2)			
				Кадмий					
IV-2	Подзол эродированный остаточно-оруденелый, 3.3 км, ССЗ	–	–	–	–	–	0.25–0.55	5.5–6.1	0.20–0.22
IV-3	Минерально-перегнойно-торфяная эутрофная “осушенная” почва, 3.4 км, ССЗ	4.0–6.5	–	49–51	7	0.7	0.27–0.58	5.0–6.5	3.9–4.3
I-3	Торфяная эутрофная почва, 17.1 км, ССВ	1.8–2.2	0.33–0.39	–	–	–	1.2–1.8	–0.8...+0.3	2.3–3.1
				Кобальт					
IV-3	Минерально-перегнойно-торфяная эутрофная “осушенная” почва, 3.4 км, ССЗ	2.5–3.3	–	50–53	450–650	0–110	0.5–0.7	4–5	112–128
II-3	Торфяная эутрофная почва, 7.6 км, С	4–6	9.5–13	–	–	–	2.7–5	–0.5...+0.5	87–119
				Медь					
II-1	Подзол иллювиально-железистый эродированный, 7.9 км, С	–	–	–	–	–	≈3	≈8	≈77
IV-2	Подзол эродированный остаточно-оруденелый, 3.3 км, ССЗ	–	–	–	–	–	0.38–0.55	4.3–6.0	115–155
IV-3	Минерально-перегнойно-торфяная эутрофная “осушенная” почва, 3.4 км, ССЗ	1.45–1.6	–	45–47	12700–13800	0–800	0.21–0.43	3.2–4.7	2370–3100
I-3	Торфяная эутрофная почва, 17.1 км, ССВ	0.47–0.55	330–430	–	–	–	0.31–0.38	–0.01...+0.16	800–1060
II-3	Торфяная эутрофная почва, 7.6 км, С	0.85–1.13	1070–1470	–	–	–	0.7–0.9	–0.15...+0.10	3950–6350
				Никель					
II-1	Подзол иллювиально-железистый эродированный, 7.9 км, С	–	–	–	–	–	≈0.5	≈8	≈280
I-3	Торфяная эутрофная почва, 17.1 км, ССВ	0.33–0.43	725–1175	–	–	–	0.22–0.28	–0.22...+0.15	1900–2900
II-3	Торфяная эутрофная почва, 7.6 км, С	3.3–4.3	320–420	–	–	–	2.2–3.0	–0.2...+0.3	1900–3100
				Цинк					
IV-3	Минерально-перегнойно-торфяная эутрофная “осушенная” почва, 3.4 км, ССЗ	2.25–3.3	–	36–48	350–570	35–65	0.6–2.4	4.0–4.8	100–122
I-3	Торфяная эутрофная почва, 17.1 км, ССВ	1.7–2.7	–	13–15	950–1100	0–12	0.16–0.21	5.2	97–103
II-3	Торфяная эутрофная почва, 7.6 км, С	4–5	–	11–19	1100–2200	0–10	0.2–0.4	9–10.5	104–124

Примечание. Прочерки означают заведомую непригодность модели или граничного условия.

Таблица 3. Сопоставление литературных данных и оценок, полученных в данной работе, по кажущимся диффузионным параметрам для тяжелых металлов в почвах

Элемент	Почва	Условия загрязнения	$\frac{D\times10^8}{Dk\times10^8}$, см^2/с	Источник
Cd	Карбонатные засоленные орошаемые аллювиальные и пустынные почвы Египта	Многолетнее орошение природными водами	$\frac{-}{28-53}$	[18, 20]
		Многолетнее орошение городскими сточными водами	$\frac{1000-5100}{430-4200}$	
	Песок карбонатный, Испания	Разовое затопление пиритными хвостами	$\frac{-}{3.5-3.7}$	[21]
	Юг Китая	Многолетнее аэрогенное загрязнение		[22]
	– Hapli-Udic Argosols		$\frac{0.9-1.6}{0.35-0.57}$	
	– Claypani-Udic Argosols		$\frac{0.50-1.25}{0.3-0.5}$	
	Пахотная легкая почва, север Франции	То же	$\frac{4.3-4.7}{2.4-3.8}$	[23]
	Почвы Мурманской обл.	»		
	– подзол эродированный остаточно-оруденелый		$\frac{-}{0.25-0.55}$	
	– минерально-перегнойно-торфяная почва		$\frac{4.0-6.5}{0.27-0.58}$	
	– торфяная почва		$\frac{1.8-2.2}{1.2-1.8}$	
Co	Карбонатные засоленные орошаемые аллювиальные и пустынные почвы Египта	Многолетнее орошение природными водами	60–100	[19, 20]
		Многолетнее орошение городскими сточными водами	160–190	
	Песок карбонатный, Испания	Разовое затопление пиритными хвостами	$\frac{-}{0.5}$	[21]
	Почвы Мурманской обл.	Многолетнее аэрогенное загрязнение		
	– минерально-перегнойно-торфяная почва		$\frac{2.5-3.3}{0.5-0.7}$	
	– торфяная почва		$\frac{4-6}{2.7-5}$	
Cu	Водный раствор	–	700–800	[14]
	Карбонатные засоленные орошаемые аллювиальные и пустынные почвы Египта	Многолетнее орошение природными водами	110–370	[17, 18, 20]
		Многолетнее орошение городскими сточными водами	300–330	
	Почвы Оренбуржья сильноподкисленные	Многолетнее аэрогенное загрязнение		[25]

Таблица 3. Продолжение

Элемент	Почва	Условия загрязнения	$\frac{D\times10^8}{Dk\times10^8}$, см^2/с	Источник
Cu	– дресвяно-щебнистый горный чернозем		$\frac{2.4–2.8}{2.1–2.3}$	
	– чернозем южный		$\frac{0.23–0.33}{0.06–0.12}$	
	Почвы Мурманской обл.	То же		
	– подзол иллювиально-железистый эродированный		$\frac{–}{\approx3}$	
	– подзол эродированный остаточно-оруденелый		$\frac{–}{0.38–0.55}$	
	–минерально-перегнойно-торфяная почва		$\frac{1.45–1.6}{0.21–0.43}$	
	– торфяная почва		$\frac{0.5–1.0}{0.35–0.8}$	
Ni	Водный раствор 8.8 мМ $Ni(NO_3)_2$	–	670	[14]
	Карбонатные засоленные орошаемые аллювиальные и пустынные почвы Египта	Многолетнее орошение природными водами	82–110	[19, 20]
		Многолетнее орошение городскими сточными водами	190–730	
	Почвы Оренбуржья	Многолетнее аэрогенное загрязнение		[25]
	– залежь		$\frac{10–22}{4–9}$	
	– залежь черноземно-луговая		$\frac{1.5–2.8}{0.5–1.1}$	
	Почвы Мурманской обл.	То же		
	– подзол иллювиально-железистый эродированный		$\frac{–}{\approx0.5}$	
	– торфяная почва (разрез II-1)		$\frac{0.33–0.43}{0.22–0.28}$	
	– торфяная почва (разрез II-3)		$\frac{3.3–4.3}{2.2–3.0}$	
Zn	Выщелоченная дерново-карбонатная, Вологодская обл.	»	3.6	[16, 27]
	Карбонатные засоленные орошаемые аллювиальные и пустынные почвы Египта	Многолетнее орошение природными водами	49–52	[18, 20]
		Многолетнее орошение городскими сточными водами	220–230	
	Песок карбонатный, Испания	Разовое затопление пиритными хвостами	$\frac{0.24–0.30}{–}$	[21]

Таблица 3. Окончание

Элемент	Почва	Условия загрязнения	$\frac{D\times10^8}{Dk\times10^8}$, см^2/с	Источник
	Юг Китая – Hapli-Udic Argosols	Многолетнее аэрогенное загрязнение	$\frac{0.42–0.80}{0.27–0.50}$	[22]
	Пахотная легкая почва, север Франции	То же	$\frac{4.6–4.9}{4.85–5.5}$	[23]
	Почвы Мурманской обл. – минерально-перегнойно-торфяная почва	»	$\frac{2.25–3.3}{0.6–2.4}$	
	– торфяные почвы		$\frac{2.2–4.5}{0.18–0.30}$	

Таблица 4. Сводка основных параметров моделей миграции (*D*, *Dk*, *V*, средние значения)

Разрез, почва, удаление от комбината, ориентация по сторонам света	Cd	Co	Cu	Ni	Zn
	D Dk V	*D Dk V*	*D Dk V*	*D Dk V*	*D Dk V*
Разрез II-1. Подзол иллювиально-железистый эродированный. 7.9 км, С	–	–	– ≈3 ≈8	– ≈0.5 ≈8	–
Разрез IV-2. Подзол эродированный остаточно-оруденелый. 3.3 км, ССЗ	– 0.4 5.8	–	– 0.46 5.1	–	–
Разрез IV-3. Минерально-перегнойно-торфяная. 3.4 км, ССЗ	5.25 0.42 5.7	2.9 0.6 4.5	1.5 0.32 4.0	–	2.8 1.5 4.4
Разрез I-3. Торфяная эутрофная. 17.1 км, ССВ	2.0 1.5 ±	–	0.51 0.34 ±	0.38 0.25 ±	2.2 0.18 5.2
Разрез II-3. Торфяная эутрофная. 7.6 км, С	–	5 3.8 ±	0.99 0.8 ±	3.8 2.6 ±	4.5 0.3 9.7

Примечание. Значения *D* и *Dk* умножены на 10^8, значения *V* умножены на 10^9. Если значение *V* достоверно не отличается от нуля, то указан символ "±". Прочерк означает отсутствие оцененных параметров.

На первом этапе мы взяли традиционные свойства тех почвенных горизонтов (из работ [6–8]), где были сосредоточены основные содержания загрязняющих элементов, использованные для оценки параметров моделей миграции (11 показателей – pH_{H_2O}, гидролитическая кислотность, сумма обменных Ca и Mg, ЕКО, степень насыщенности основаниями, $C_{орг}$ по Тюрину, содержания липидов, гуминовых и фульвокислот, остатка во фракционно-групповом составе по Тюрину в модификации Пономаревой и Плотниковой, $C_{гк}/C_{фк}$). По этим показателям проведена группировка почвенных горизонтов методами дендрограмм сходства и главных компонент. Получен ожидаемый результат – горизонты подзолов четко отделились от горизонтов торфяных почв по первой главной компоненте; основными разделяющими показателями были сумма обменных оснований, ЕКО и содержание органического углерода. Внутри этих больших групп горизонты тоже разделялись (вторая главная компонента) по таким показателям, как остаток при фракционировании гумуса и pH_{H_2O}. У подзолов несколько отделялись по второй главной компоненте горизонты Е от нижележащих, а во второй большой группе – горизонты торфяных почв от горизонтов перегнойно-торфяной.

На втором этапе для указанных больших групп горизонтов были рассчитаны медианы значений параметров миграции для совокупности всех элементов (использовать более дробное разделение на группы не позволял объем выборки). Для подзолов получили медиану *Dk* 0.48×10^{-8} см^2/с (для подзолов значения *D* не были определены – см. табл. 4), для *V* – 6.9×10^{-9} см/с; для торфяных почв в целом медианы *D* 2.5×10^{-8}, *Dk* – 0.51×10^{-8},

$V - 2 \times 10^{-9}$. Таким образом, при подобной группировке почв явные различия видны только по скорости конвективного переноса элементов – в торфяных почвах она значительно меньше (из табл. 4 видно, что для большинства элементов значения V в чисто торфяных почвах не отличались от нуля).

На третьем этапе сделана попытка оценить, как элементы и свойства почв связаны с найденными параметрами моделей миграции. Ранее подобная работа, но по результатам лабораторных опытов, была проведена для коэффициента диффузии ^{90}Sr в почвах [11]. Предварительно рассчитаны средневзвешенные значения показателей свойств горизонтов, использованных на первом этапе, и к этим показателям для последующих анализов добавлены валовые содержания загрязняющих элементов и их подвижности. Затем проводили многофакторный дисперсионный анализ [1] зависимости от всего этого комплекса показателей для D, Dk, V, по-прежнему не разделяя выборку по элементам.

Оказалось, что в рамках данной выборки практически все почвенные показатели в большей или меньшей степени коррелируют между собой, и нет статистических оснований для предпочтений с точки зрения построения эмпирических регрессионных зависимостей для параметров миграции. В то же время, обычно считают, что чем выше извлекаемость ТМ из почв разными вытяжками (химическая подвижность), тем выше можно ожидать и миграционную способность элементов (миграционная подвижность, отражаемая в значениях параметров моделей миграции). Концентрация элементов в вытяжках (в долях от валового содержания) по смыслу соответствует коэффициенту распределения между твердой и жидкой фазами почвы. А коэффициент распределения входит в давно известные теоретические модели миграции в почве как пористой сорбирующей среде [12, 13, 15, 30].

Исходя из этого посыла, мы более подробно исследовали лишь регрессионные зависимости указанных миграционных параметров от экспериментально измеренной подвижности ТМ в почвах, добавив такой независимый в данном случае показатель, как валовое содержание загрязняющих элементов в почвах (для обоих показателей речь также идет о средневзвешенных величинах). Конечно, надо иметь в виду, что сама химическая подвижность элементов очевидно зависит от свойств почв (величины и прочности сорбции).

Выяснилось следующее. Все полученные регрессионные зависимости оказались незначимыми или слабозначимыми, закономерности расплывчатыми, а для параметра V можно сказать отсутствуют. То есть речь может идти о возможных тенденциях, которые надо уточнять на выборках значительно большего объема. Для параметра D (торфяные почвы) наиболее приемлемо следующее уравнение

$$D \times 10^8 = 1.23 + 0.0835\text{Подв} - 3.89 \times 10^{-4}\text{Вал},$$

где: $R^2 = 0.49$, средняя ошибка уравнения 1.3 см^2/с при размахе значений $D \times 10^8$ 0.38–5.25 см^2/с, подвижностей ТМ (Подв) 5.8–50% от валового содержания, валовых содержаний (Вал) ТМ в почвах 1.76–3310 мг/кг. Уравнение для параметра Dk (все почвы):

$$Dk \times 10^8 = 0.319 + 1.26 \times 10^{-3}\text{Подв}^2,$$

где: $R^2 = 0.59$, средняя ошибка уравнения 0.75 см^2/с при размахе значений $Dk \times 10^8$ 0.18–3.8 см^2/с, подвижностей ТМ 1.3–37.5%. Напомним, что все это получено для совокупности загрязняющих элементов.

Единственным элементом, для которого получены параметры миграции для всех пяти почв, оказалась медь (Dk и V). Для Cu получили также незначимые уравнения:

$$Dk \times 10^8 = 0.13 + 0.0426\text{Подв},$$

где: $R^2 = 0.26$, средняя ошибка уравнения 1.1 см^2/с при размахе значений $Dk \times 10^8$ 0.32–3 см^2/с, подвижности 5.8–36.8%;

$$V \times 10^9 = -0.55 + 0.2\text{Подв},$$

где: $R^2 = 0.63$, средняя ошибка уравнения 2.4 см/с при размахе значений $V \times 10^9$ 0–8 см/с и том же интервале значений подвижности.

Общий вывод из этого этапа анализа данных такой, что гипотеза о положительной связи параметров моделей миграции в полевых многолетних условиях и химической подвижностью в качестве тенденции не опровергается.

ВЫВОДЫ

1. Оценена миграционная подвижность Cd, Co, Cu, Ni, Zn в подзолах и органогенных почвах в зоне многолетнего воздействия Мончегорского медно-никелевого комбината (Мурманская область) с использованием параметров диффузионной и конвективно-диффузионной моделей.

2. Найденные значения диффузионных параметров сопоставимы с данными по другим регионам; исключением являются засоленные карбонатные орошаемые почвы Египта. В большинстве случаев конвективный поток тяжелых металлов был достоверно направлен вниз со скоростью от 0.126 до 0.31 см/год (в остальных случаях достоверно не отличался от нуля). Подзолы и органогенные почвы в среднем по совокупности тяжелых металлов не различались по диффузионным параметрам, но различались по скорости конвек-

тивного переноса, которая в органогенных почвах была значительно меньше.

3. Не найдено связи параметров моделей, характеризующих поступление загрязняющих элементов в почву, с расстоянием от комбината, но имеется связь этих параметров с типами почв – в органогенных почвах, находящихся в локальных депрессиях, вероятно, имеет место дополнительное латеральное поступление на поверхность. Не найдено соответствия диффузионных параметров со спецификой тяжелого металла и с типом почвы. Из-за недостаточного объема выборки не удалось оценить связи параметров миграции со свойствами почв, а связь их с химической подвижностью (вытяжка ацетатно-аммонийным буфером) проявилась в виде недостоверной тенденции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственной программы, раздел 0591-2019-0024.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритмы и программы для ЭВМ СМ-4. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 1985. С. 29–34.
2. *Борисочкина Т.И., Маркина Л.Г.* Процессы геохимической трансформации в зоне воздействия металлургического комплекса // Экология России: на пути к инновациям. 2015. № 12. С. 87–91.
3. *Важенин И.Г.* Деградация плодородия черноземных почв под воздействием техногенеза // Агрохимия. 1991. № 5. С. 85–95.
4. *Ежов А.Ю.* Техногенное загрязнение тяжелыми металлами ландшафтов северо-запада Кольского полуострова // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2010. № 1. С. 98–103.
5. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
6. *Кашулина Г.М.* Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2017. № 7. С. 860–873.
7. *Кашулина Г.М., Кубрак А.Н., Коробейникова Н.М.* Кислотность почв в окрестностях медно-никелевого комбината “Североникель”, Кольский полуостров // Почвоведение. 2015. № 4. С. 486–500. https://doi.org/10.7868/S0032180X15040048
8. *Кашулина Г.М., Переверзев В.П., Литвинова Т.И.* Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината “Североникель” // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1265–1275.
9. *Копцик Г.Н., Лукина Н.В., Копцик С.В., Ливанцова С.Ю., Щербенко Т.А., Ерасова С.А., Удачин Н.В.* Поведение тяжелых металлов в подзолах под сосновыми лесами в условиях атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2004. № 4. С. 42–50.
10. *Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А.* Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М.: Факториал, 1998. 368 с.
11. *Прохоров В.М., Баранова З.А., Рыжинский М.В., Фрид А.С., Широков В.Д.* Изучение связи между подвижностью ^{90}Sr и свойствами почвы методами многомерной математической статистики // Агрохимия. 1972. № 4. С. 101–108.
12. *Прохоров В.М., Фрид А.С.* Количественные закономерности диффузии ионов в почве как пористой адсорбирующей среде // Миграция в почве и ее моделирование. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 138–146.
13. *Рыжинский М.В., Фрид А.С.* Обобщение уравнения конвективной диффузии на многофазную среду // Миграция в почве и ее моделирование. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 180–184.
14. Справочник химика. Изд. 2-е. Т. 3. М.-Л.: Химия, 1964. 1006 с.
15. *Фрид А.С.* Диффузия в каналах переменного сечения // Миграция в почве и ее моделирование. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2006. С. 185–192.
16. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Использование миграционных моделей при исследовании передвижения тяжелых металлов в загрязненных почвах // Проблемы техногенного воздействия на сферу агропромышленного производства: теория и практика. Обнинск, 2011. С. 100–105.
17. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Миграционное поведение тяжелых металлов и фтора в почвах оренбургской техногенной биогеохимической провинции и его прогноз на 2020 год // Агрохимия. 2019. № 4. С. 79–90. https://doi.org/10.1134/S0002188119040057
18. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Параметры моделей миграции тяжелых металлов в ненарушенных лесных почвах в зоне воздействия сталелитейного завода // Агрохимия. 2018. № 3. С. 72–76. https://doi.org/10.7868/S0002188118030092
19. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Параметры моделей миграции тяжелых металлов и других элементов из пиритных хвостов в первые два месяца после попадания на карбонатную песчаную почву // Агрохимия. 2018. № 2. С. 88–98. https://doi.org/10.7868/S0002188118020084
20. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Фтор: миграционная подвижность в почвах при техногенных загрязнениях // Агрохимия. 2019. № 3. С. 65–71. https://doi.org/10.1134/S0002188119030062
21. *Фрид А.С., Борисочкина Т.И.* Параметры моделей миграции Zn и Cd в пахотных почвах в зоне воздействия металлургического комплекса // Агрохимия. 2018. № 6. С. 63–67. https://doi.org/10.7868/S0002188118060078
22. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция железа, кобальта и никеля в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2016. № 8. С. 68–81.

23. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция меди, цинка и кадмия в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2014. № 11. С. 62–73.

24. *Фрид А.С., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция тяжелых металлов в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами (подведение итогов) // Агрохимия. 2016. № 11. С. 46–57.

25. *Фрид А.С., Шуравилин А.В., Гома Ботхина Саад М.А., Борисочкина Т.И.* Миграция меди в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами // Агрохимия. 2014. № 3. С. 60–68.

26. *Яковлев А.С., Плеханова И.О., Кудряшов С.В., Аймалетдинов Р.А.* Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании "Норильский никель" // Почвоведение. 2008. № 6. С. 737–750.

27. *Frid A.S.* Migration models of Cu, Zn, Cd in soils under irrigation with urban wastewater // Biogenic-abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems. Springer Int. Publ. AG Switzerland, 2016. P. 157–163. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_13

28. *Frid A.S., Borisochkina T.I.* Radial migration of heavy metals in contaminated soils calculated by mathematical models // 100 years Bulgarian soil science. Internat. Confer. Sofia, 2011. Part II. P. 713–717.

29. *van Genuchten M.Th., Alves W.J.* Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation / U.S. Department of Agriculture. 1982. Technical Bull. № 1661. 151 p.

30. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency. 2010. (Technic. Rep. Ser., № 472).

31. *Koptsik S., Koptsik G., Livantsova S., Eruslankina L., Zhmelkova T., Vologdina Z.* Heavy metals in soils near the nickel smelter: chemistry, spatial variation, and impacts on plant diversity // J. Environmental Monitoring. 2003. V. 5. № 3. P. 441–450.

32. *Ruan Xin-Ling, Zhang Gan-Lin, Ni Liu-Jian, He Yue* Distribution and migration of heavy metals in undisturbed forest soils: a high resolution sampling method // Pedosphere. 2008. V. 18(3). P. 386–393.

33. *Yuan Y., Xiang M., Liu C., Theng B.K.G.* Geochemical characteristics of heavy metal contamination induced by a sudden wastewater discharge from a smelter // J. Geochemical Exploration. 2017. V. 176. P. 33–41.

Heavy Metals Mobilization Capacity in Strongly Polluted Soils near "Severonickel" Plant (Murmansk Region)

A. S. Frid[1, *] and T. I. Borisochkina[1]

[1]Dokuchaev Soil Science Institute, per. Pyzhevskii, 7, b. 2, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: asfrid@mail.ru*

The potential mobility of Cd, Co, Cu, Ni, Zn in podzols and organic soils (Histosols) in the area for a long time affected by Monchegorsk Copper-Nickel Plant (Murmansk region) is assessed using parameters of diffusion and convective-diffusion models. The values of the diffusion parameters are similar to data from other regions except for saline carbonate irrigated soils of Egypt. In most cases, the convective flow of heavy metals was with high confidence directed downward and might have the rate from 0.126 to 0.31 cm/year (in other cases, it did not significantly differ from zero). On average, podzols and organic soils did not differ in diffusion parameters in terms of the aggregate of heavy metals, but they differed in the rate of convective transfer, which was much weaker in organic soils. The relationship between the parameters of input of contaminating elements into the soil and the distance from the plant was not found, but there is a relationship between these parameters and soil types: in organic soils in local depressions, there is probably an additional lateral influx on the surface. No relationship between diffusion parameters, specificity of heavy metal and soil type was found. Due to the insufficient sampling, it was not possible to estimate the relationship between migration parameters and soil properties. Their dependence on chemical mobility (ammonium acetate buffer extract) was manifested in the form of an unreliable trend.

Keywords: heavy metals, migratory mobility in soils, migration dynamic models, highly contaminated soils, podzols, organic soils (Histosols), "Severonickel" plant, Kola Peninsula