



Оригинальная статья

Микроорганизмы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии

Н. П. Кузьмина[✉], С. В. Ермолаева, А. П. Чевычелов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН г. Якутск, Российская Федерация
[✉]erel1982@mail.ru

Аннотация

Мерзлотные лугово-степные почвы, развитые на охраняемой природной территории Якутского ботанического сада, являются ценными природными эталонами почв Центральной Якутии, но при этом они ранее не были исследованы в отношении микробиологической активности. Приведены результаты комплексных исследований свойств почв, состава сформированных в них микробных сообществ, количества и внутрипрофильного распределения последних. Исследования проведены на пяти почвенных педонах с применением комплекса почвенных и микробиологических методов совокупно со стандартными методиками лабораторных аналитических работ. Установлено, что количество исследуемых групп микроорганизмов изменялось от $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ до $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г почвы. По росту общей численности микроорганизмов (ОЧМ) данные почвы представляют следующую последовательность: солончак солонцеватый, затем лугово-черноземная и чернозем обыкновенный, далее черноземно-луговая, затем лугово-черноземная. Максимальное содержание азотобактера было отмечено в черноземе – в единственной незасоленной почве из всех исследованных. Доминирование определенных групп микроорганизмов в изученных почвенных микробных сообществах зависело от химического состава и гидротермических показателей почв. Установлена высокая корреляция численности микроорганизмов с содержанием гумуса и азота, а также с температурой почвы, что ведет к уменьшению их количества с глубиной. Полученные результаты могут быть использованы для биоиндикации почвенного плодородия и определения степени антропогенной и агрогенной трансформаций криогенных почв Центральной Якутии.

Ключевые слова: мерзлотные почвы, свойства, микробоценозы, состав и численность микроорганизмов

Финансирование. Статья подготовлена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0027, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190033-5).

Для цитирования: Кузьмина Н.П., Ермолаева С.В., Чевычелов А.П. Микроорганизмы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):97–108. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-97-108>

Original article

Microorganisms in the cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia

Nadezhda P. Kuzmina[✉], Svetlana V. Ermolaeva, Aleksandr P. Chevychelov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]erel1982@mail.ru

Abstract

The microbial communities of cryogenic meadow-steppe soils in Central Yakutia, developed within the Yakut Botanical Garden (YBG), have not been previously investigated. This study aimed to analyze soil properties, the composition of microbial communities, their abundance, and their distribution within soil profiles. Data were collected from five soil profiles of the examined cryogenic soils using a combination of soil and microbiological methods, along with standard laboratory analytical techniques. The abundance of microorganism groups studied ranged from $8.2 \pm 3.3 \times 10^1$ to $2.4 \pm 0.8 \times 10^6$ CFU/g of soil. The soils exhibited an increasing sequence of total microorganisms: saline solonetz, meadow-chnozem, ordinary chnozem, chnozem-meadow, and meadow-chnozem. The highest concentration

of azotobacter was identified in the chernozem, which was the only unsalted soil among those studied. The dominance of specific microbial groups was found to be influenced by the chemical composition of the soils and their hydrothermal parameters. A strong correlation was established between the number of microorganism and the content of humus and nitrogen, as well as soil temperature, which decreased with depth. The microbiological findings of cryogenic meadow-steppe soils in the cryolithozone region can be utilized to bioindicate soil fertility and assess anthropogenic and agrogenic transformations of cryogenic soils.

Keywords: cryogenic soils, properties, microbiocenoses, composition and abundance of microorganisms

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. 0297-2021-0027, EGISU R&D No. AAAA21-121012190033-5).

For citation: Kuzmina N.P., Ermolaeva S.V., Chevychelov A.P. Microorganisms in the cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):97–108. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-97-108>

Введение

Территория Якутского ботанического сада расположена в пределах долины Туймаада и приурочена ко второй надпойменной террасе р. Лена. На небольшой площади ЯБС (около 100 га) распространены почти все типы мерзлотных почв, встречающиеся на территории Центральной Якутии. Первые работы по изучению почв Якутского ботанического сада были проведены в далеком 1954 г. Л.Г. Еловской, которая впервые привела данные по выделению и описанию основных типов почв [1, 2]. В настоящее время на изучаемой территории ЯБС выделено 14 типов и 16 подтипов мерзлотных почв, а также достаточно полно исследованы их состав и физико-химические свойства. Почвы ЯБС представлены лесными, лугово-степными и интразональными типами почв [3]. Как известно, продуктивность и плодородие почв напрямую зависят от состава и численности их микробиоты. До последнего времени мерзлотные почвы ЯБС не изучались микробиологическими методами.

Целью работы являлось комплексное исследование свойств мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии, состава сформированных в них микробных сообществ, количества и внутрипрофильного распределения последних.

Полученные результаты микробиологических исследований мерзлотных лугово-степных почв исследуемого региона криолитозоны могут быть использованы для биоиндикации их плодородия, а также для определения степени антропогенной и агрогенной трансформаций криогенных почв.

Материалы и методы

Исследуемые мерзлотные почвы представлены черноземами, черноземовидными и засоленными почвами. Всего было заложено и исследовано пять почвенных разрезов данных мерзлотных почв: 2БС-09, 3БС-18, 4БС-18, 7БС-18

и 12БС-18 (табл. 1). Почвенные разрезы были заложены в третьей декаде июля 2019 г.

Почвенные и микробиологические исследования солончака солонцеватого разреза 7БС-18 представлены в нашей работе, опубликованной ранее [4]. В обсуждении результатов представленной статьи эти сведения также будут приведены.

Изучение данных мерзлотных почв проводилось с применением общепринятых почвенных методов исследования: сравнительно-географического, сравнительно-аналитического [5] и профильно-генетического [6], а их состав и физико-химические свойства – с использованием стандартных методик лабораторных аналитических работ [7, 8]. Классификация и диагностика исследуемых мерзлотных почв проводились согласно известным положениям, изложенным в работе Л.Г. Еловской [9].

Почвенные пробы для микробиологического анализа отбирали по принятой в почвенной микробиологии методике, с разных глубин по генетическим горизонтам. Для определения численности микроорганизмов применяли метод посева на плотные питательные среды [10]. При посеве использовали следующие селективные среды: мясо-пептонный агар (МПА) для аммонифицирующих бактерий; среда Эшби – для олигонитрофильных бактерий; крахмало-аммиачный агар (КАА) – для актиномицетов и среда Чапека – для мицелиальных грибов (микромикетов).

Для выявления аэробных целлюлозоразлагающих микроорганизмов использовали среду Гетчинсона и Клейтона. Азотфиксирующие бактерии определяли методом обрастания почвенных комочков на безазотистой среде Эшби. Инкубирование засеянных чашек проводили в термостате при 30 °С. Колонии выросших бактерий подсчитывали на 3–4-е сутки, грибов – на 7–10-е сутки. Полученные данные по количеству микроорганизмов выражали в колониеобразующих

**Географические и морфологические характеристики
изучаемых мерзлотных почв Центральной Якутии**

Table 1

Geographical and morphological characteristics of the studied cryogenic soils of Central Yakutia

Почва, номер разреза	Географические координаты	Место заложения	Морфологическое строение
Чернозем, 2БС-09	62°01'12,4"N, 129°36'35,8"E, Н – 100,3 м	На вершине приозерного гривного повышения, на пашне (черный пар)	Aa(0–26) – AB(26–52) – B(52–67) – BCca(67–100) – Cca(100–146 см)
Черноземно-луговая, 3БС-18	62°01'22,4"N, 129°37'24,1"E, Н – 97,2 м	В проточном понижении, злаково-разнотравный луг с пятнами солончаковой растительности (целина)	Av(0–3) – A(3–30) – AB(30–54/62) – BC(54/62–80) – C ₁ (80–96 см)
Лугово-черноземная, 4БС-18	62°01'28,5"N, 129°37'18,1"E, Н – 99,1 м	На ровной поверхности приозерного повышения, пашня (черный пар)	Aa(0–23) – ABca(23–42) – Bca(42–61) – BC(61–84) – C(84–115 см)
Лугово-черноземная, 12БС-18	62°01'20,2"N, 129°37'19,5"E, Н – 98,2 м	На ровной поверхности приозерного повышения, разнотравно-злаковый луг (целина)	Av,ca(0–2) – Aca(2–20) – ABca(20–41) – Bca(41–57) – BCca(57–81) – C(81–123 см)

единицах (далее КОЕ) на 1 г почвы [10]. ОЧМ в исследуемых микробоценозах криогенных почв определяли с выводом средних значений данных по численности микроорганизмов. Морфологию клеток исследуемых культур микроорганизмов изучали посредством световой микроскопии на микроскопе Levenhuk D40T med ($\times 1000$). Математическая обработка полученных материалов осуществлялась при помощи стандартных статистических методов при 95%-й достоверительной вероятности.

Результаты и обсуждение

Мерзлотные черноземы – это зональные почвы степной зоны Центральной Якутии, приуроченной к нижней части аллювиальной равнины с абсолютными высотами 100–140 м. Они формируются под лугово-степями и настоящими степями на гривных повышениях второй надпойменной террасы р. Лена, в условиях криоаридного климата [11]. Эти автоморфные почвы являются наименее увлажненными и наиболее теплыми мерзлотными почвами данной зоны. Глубина сезонного протаивания в них составляет на целине 160–170 см, а на пашне – 180–200 см [9].

Мерзлотные черноземы обыкновенные занимают по рельефу автоморфные позиции, т. е. вершины грив и увалов, по склонам которых обычно развиты полугидроморфные черноземовидные почвы, т. е. лугово-черноземные и черноземно-луговые, получающие дополнительное увлажнение за счет вод склонового и надмерзлот-

ного стока в периоды увлажнения. В межгривных понижениях формируются интразональные мерзлотные почвы – засоленные (солонцы и солончаки) и болотные (лугово-болотные).

В изучаемых мерзлотных почвах максимальная мощность профиля, равная 146 см, выявляется в мерзлотном черноземе, а чуть меньшая, составляющая 115–136 см, отмечается в лугово-черноземных, тогда как минимальная, равная 96–118 см, наблюдается в черноземно-луговых почвах (см. табл. 1). Необходимо также отметить, что средняя мощность гумусового профиля (гор. А + гор. АВ), максимально составляющая 47 см, фиксируется в мерзлотных черноземно-луговых почвах, а в лугово-черноземных почвах и черноземе таковая примерно равна 40 см.

Определение pH водной вытяжки изучаемых почв позволяет утверждать, что значения данного показателя их верхних горизонтов характеризуют обычно как слабощелочные, а нижних – как щелочные и сильнощелочные (табл. 2). Количество гумуса в верхних горизонтах исследуемых почв (А, Аа) изменяется очень вариабельно и соответственно составляет в черноземно-луговых почвах 3,2–9,2 %, лугово-черноземных – 2,6–9,5, черноземе – 4,2 % [12]. Сопоставление средних значений данных величин с принятыми грациями известной шкалы [13] позволяет оценить содержание гумуса в данных горизонтах изучаемых мерзлотных черноземно-луговых почв как высокое, чернозема и лугово-черноземных почв – в основном как среднее. Общее количество азота

в гумусово-аккумулятивном горизонте мерзлотно-го чернозема разреза 2БС-09 равно 0,09 %, а в лугово-черноземных и черноземно-луговых почвах изменяется соответственно в пределах 0,05–0,21 и 0,13–0,86 %.

Содержание общего азота в гумусовых горизонтах изучаемых мерзлотных почв изменяется значительно – до 17 раз. Профильное распределение общего азота в данных мерзлотных почвах, как правило, резко убывающее, в нижних горизонтах содержание его составляет всего 0,02–0,04 %, за исключением черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, в которой таковое увеличивается до 0,07–0,09 % (табл. 2). Исследуемые мерзлотные лугово-степные почвы характеризуются в общем низким содержанием общего

азота, а также низкой и очень низкой обогащенностью гумуса азотом, согласно принятым критериям [13].

Почвенно-поглощающий комплекс (ППК) данных мерзлотных почв насыщен обменными основаниями, в составе которых абсолютно преобладают катионы Ca^{+2} и Mg^{+2} . Однако в ППК отдельных почв, таких как чернозем (разрез 2БС-09) и солончак солонцеватый (разрез 7БС-18), также наблюдается значительное количество обменного Na^{+} , которое, согласно принятым подходам [4, 9], позволяет определять данные почвы как среднесолонцеватые и даже как солонцы (см. табл. 2). Все изучаемые мерзлотные почвы криолитозоны Центральной Якутии обычно отличаются разной солонцеватостью, вследствие

Таблица 2

Химический состав и гидротермические показатели изучаемых мерзлотных почв Центральной Якутии

Table 2

Chemical composition and hydrothermal parameters of the studied cryogenic soils of Central Yakutia

Горизонт	Глубина, см	Температура, °С	Влажность, %	pH _{H₂O}	Гумус, %	N, %	C:N	Обменные катионы, ммоль(экв)/100 г почвы			CO ₂ карбонатов, %
								Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	
Чернозем, разрез 2БС-09											
Aa	8–18	19,8	13,8	7,9	4,2	0,09	27	9,1	4,6	1,8	Н.о.
AB	30–40	17,5	11,4	8,0	3,7	0,08	26	9,1	4,1	2,1	–/–
B	55–65	15,2	13,0	8,7	1,7	0,02	50	6,6	4,6	2,0	–/–
BCca	80–90	12,3	14,0	8,7	1,3	0,03	23	8,7	5,1	2,3	5,3
Cca	101–107	9,1	6,8	9,0	–	–	–	–	–	–	3,5
Cca	110–120	Н.о.	Н.о.	8,9	–	–	–	–	–	–	3,2
Черноземно–луговая, разрез 3БС-18											
Av	0–3	20,6	18,5	8,0	29,0*	1,11	15	58,1	33,2	–	Н.о.
A	10–20	16,7	22,3	8,1	9,2	0,86	6	21,5	17,2	–	–/–
AB	40–50	14,6	18,0	8,5	3,7	0,10	21	9,5	10,5	–	–/–
BC	60–70	11,1	17,9	8,6	1,2	0,07	10	7,9	9,9	–	–/–
C	80–90	7,0	19,1	8,4	1,9	0,09	12	7,3	9,4	–	–/–
Лугово–черноземная, разрез 4БС-18											
Aa	5–15	19,1	11,7	8,2	2,6	0,11	14	14,3	7,2	0,3	Н.о.
ABca	30–40	16,7	12,3	9,3	1,5	0,04	22	9,1	6,1	1,0	5,6
Bca	45–55	14,6	11,5	9,5	0,4	0,02	10	6,1	5,0	1,7	2,8
BC	70–80	11,2	11,0	9,1	0,4	0,01	20	6,0	4,0	1,3	–/–
C	90–100	8,6	11,3	9,4	0,2	–	–	8,1	5,0	–	–/–
Лугово–черноземная, разрез 12БС-18											
Av,ca	0–2	13,8	23,3	8,0	18,1*	0,21	50	14,5	16,5	1,6	4,0
Aca	10–20	9,4	15,1	9,0	9,5	0,13	42	8,2	17,4	1,4	5,7
ABca	26–36	8,6	15,5	9,4	2,9	0,02	85	7,1	9,1	1,2	8,4
Bca	50–60	5,2	20,3	9,2	0,6	0,02	15	7,1	6,1	0,3	9,2
BCca	75–85	2,5	20,3	8,9	0,6	0,01	30	8,1	10,2	0,2	6,2
Cca	90–100			8,9	0,5	–	–	7,6	10,6	0,3	6,5

Примечание: Н.о. – не обнаружено, прочерк – не определено. * – приведено значение потери при прокаливании.

Note: Н.о. – not detected, dash – not determined. * – the value of loss on ignition is given.

проявления солонцового процесса в условиях криоаридного климата исследуемого региона [14].

Количество CO_2 карбонатов в изучаемых мерзлотных лугово-степных почвах изменяется от 1,7 до 9,2 %, при этом в лугово-черноземной почве разреза 12 БС-18 они обнаруживаются с поверхности во всех горизонтах почвенного профиля. В других почвах максимальное содержание CO_2 карбонатов обычно приурочено к горизонтам АВса и Вса. Исключением из этого является черноземно-луговая почва разреза 3БС-18, расположенного в проточном понижении, где данные карбонаты отмыты на всю глубину почвенного профиля (см. табл. 2).

Согласно принятым грациям содержания частиц физической глины [12, 15], минеральные горизонты данных мерзлотных почв в основном характеризуются как супесчано-легко- и средне-суглинистые (разрезы 2БС-09, 3БС-18, 4БС-18,

12БС-18) либо как супесчано-средне- и тяжело-суглинистые (разрез 7БС-18).

По результатам микробиологического исследования, численность микроорганизмов в мерзлотных лугово-степных почвах ЯБС в июле 2019 г., изменялась от $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ до $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г почвы (табл. 3). Полученная численность микроорганизмов оказалась незначительной, что можно объяснить чрезвычайно жаркими и засушливыми летними месяцами 2019 г., что подтверждают данные метеослужбы Республики Саха (Якутия) [16]. Нехарактерные природные условия сказались на состоянии микробиоты исследуемых почв. Тем не менее, максимальное количество микроорганизмов (актиномицеты $-2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г) было отмечено в горизонте А (10–20 см) черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18 злаково-разнотравного луга. По химическим данным, на этой глубине отмечено наибольшее содержание

Таблица 3
Количественный состав микробиоценозов мерзлотных почв Центральной Якутии, июль 2019 г.

Table 3

Quantitative composition of microbiocenoses in cryogenic soils of Central Yakutia, July 2019

Горизонт	Бактерии на МПА	Бактерии на среде Эшби	Актиномицеты	Микромицеты	Целлюлозолитики	Азотфиксаторы
	КОЕ/г					%
Чернозем, разрез 2БС-09						
Aa	$6,4 \pm 1,7 \times 10^5$	$6,8 \pm 2,0 \times 10^5$	$4,2 \pm 0,4 \times 10^5$	$5,9 \pm 0,6 \times 10^5$	$1,0 \pm 0,1 \times 10^2$	96,0
AB	$1,1 \pm 0,1 \times 10^5$	$1,5 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,1 \pm 0,5 \times 10^4$	$7,8 \pm 1,5 \times 10^4$	$8,2 \pm 3,3 \times 10^1$	4,0
B	$2,8 \pm 1,5 \times 10^4$	$1,0 \pm 0,2 \times 10^5$	$1,1 \pm 0,6 \times 10^4$	$2,3 \pm 0,6 \times 10^4$	$1,1 \pm 0,2 \times 10^2$	0,6
BCca	$1,7 \pm 1,0 \times 10^4$	$2,9 \pm 0,6 \times 10^4$	0	0	—	—
Cca	0	0	0	0	—	—
Черноземно-луговая, разрез 3БС-18						
Av	$4,3 \pm 2,7 \times 10^4$	$4,9 \pm 3,2 \times 10^4$	$4,3 \pm 2,7 \times 10^4$	$4,3 \pm 2,4 \times 10^4$	$5,7 \pm 2,5 \times 10^3$	6,6
A	$3,6 \pm 0,9 \times 10^5$	$5,8 \pm 1,4 \times 10^5$	$2,4 \pm 0,8 \times 10^6$	$6,4 \pm 3,8 \times 10^4$	$3,9 \pm 0,8 \times 10^3$	1,3
AB	$2,7 \pm 0,4 \times 10^5$	$2,3 \pm 1,2 \times 10^5$	$3,1 \pm 1,6 \times 10^4$	$4,8 \pm 2,1 \times 10^4$	$3,4 \pm 0,6 \times 10^3$	0,6
BC	$5,9 \pm 2,9 \times 10^5$	$2,9 \pm 1,1 \times 10^5$	$1,2 \pm 0,6 \times 10^4$	$2,4 \pm 1,1 \times 10^4$	—	—
C	$1,2 \pm 0,9 \times 10^5$	$5,4 \pm 1,9 \times 10^5$	$3,7 \pm 1,6 \times 10^4$	$3,1 \pm 1,8 \times 10^4$	—	—
Лугово-черноземная, разрез 4БС-18						
Aa	$9,9 \pm 3,8 \times 10^5$	$1,4 \pm 0,3 \times 10^6$	$5,6 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,0 \pm 0,1 \times 10^6$	$1,7 \pm 0,1 \times 10^4$	9,3
ABca	$3,2 \pm 0,2 \times 10^5$	$4,3 \pm 0,7 \times 10^5$	$5,0 \pm 0,9 \times 10^4$	$5,6 \pm 1,5 \times 10^4$	$7,5 \pm 0,8 \times 10^3$	6,6
Bca	$3,5 \pm 0,3 \times 10^5$	$9,7 \pm 1,6 \times 10^5$	$2,2 \pm 0,4 \times 10^5$	$3,4 \pm 1,9 \times 10^4$	$7,2 \pm 0,7 \times 10^3$	0
BC	$1,9 \pm 0,3 \times 10^5$	$3,0 \pm 0,2 \times 10^5$	$1,8 \pm 0,3 \times 10^5$	$2,8 \pm 1,5 \times 10^4$	—	—
C	$3,9 \pm 0,5 \times 10^4$	$5,1 \pm 0,9 \times 10^4$	$1,1 \pm 0,5 \times 10^4$	0	—	—
Лугово-черноземная, разрез 12БС-18						
Av,ca	$5,5 \pm 0,1 \times 10^5$	$7,1 \pm 0,2 \times 10^5$	$2,1 \pm 0,8 \times 10^5$	$3,6 \pm 0,8 \times 10^5$	$2,3 \pm 0,8 \times 10^3$	2,6
Aca	$7,6 \pm 0,6 \times 10^4$	$1,2 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,7 \pm 0,9 \times 10^5$	$1,7 \pm 1,0 \times 10^4$	$1,3 \pm 0,1 \times 10^3$	10,6
ABca	$4,1 \pm 3,3 \times 10^4$	$6,5 \pm 1,2 \times 10^4$	$2,3 \pm 0,6 \times 10^4$	$4,7 \pm 0,6 \times 10^4$	$6,7 \pm 0,8 \times 10^2$	1,3
Bca	$6,9 \pm 1,6 \times 10^4$	$1,2 \pm 0,3 \times 10^5$	$1,2 \pm 0,6 \times 10^4$	$7,5 \pm 1,1 \times 10^4$	—	—
BCca	$4,4 \pm 1,2 \times 10^4$	$8,1 \pm 4,1 \times 10^4$	$8,1 \pm 2,7 \times 10^4$	$6,3 \pm 2,3 \times 10^4$	—	—

Примечание. «0» – не обнаружено, прочерк – не определено.

Note. «0» – not detected, dash – not determined. * – the value of loss on ignition is given.

гумуса (9,2 %), азота (0,86 %) и обменных катионов Ca^{+2} , Mg^{+2} (38,7 ммоль(экв)/100 г), также следует отметить отсутствие карбонатов CO_2 (см. табл. 2). Как уже было отмечено, черноземно-луговые почвы относятся к полугидроморфным типам почв, поэтому данная почва оказалась на более увлажненной из всех исследованных (18,0–22,3 %).

Преобладание актиномицетов в микробоценозе данной почвы объясняется высоким содержанием гумуса. Ведь как известно, актиномицеты встречаются в почвах, богатых растительными остатками, принимают активное участие в их разложении и в процессах минерализации гумуса в почвах. Наименьшее количество актиномицетов ($1,1 \pm 0,5 \times 10^4$ КОЕ/г) было обнаружено в черноземе разреза 2БС-18, где содержание гумуса оказалось средним (см. табл. 2, 3) [13].

Максимальное количество аммонифицирующих бактерий ($9,9 \pm 3,8 \times 10^5$ КОЕ/г) было отмечено в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18, в поверхностном горизонте почвы Аа, а минимальное количество этих бактерий ($1,2 \pm 0,6 \times 10^4$ КОЕ/г) – в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18, на глубине 80–90 см [4]. Наибольшее содержание бактерий на среде Эшби (олигонитрофилы – $1,4 \pm 0,3 \times 10^6$ КОЕ/г) было обнаружено в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18, в том же горизонте Аа, где было выявлено максимальное содержание аммонификаторов. Наименьшее количество олигонитрофилов ($1,2 \pm 0,6 \times 10^4$ КОЕ/г) наблюдалось также в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18 на глубине 80–90 см [4]. Больше всего мицелиальных грибов (микромикетов) ($1,0 \pm 0,1 \times 10^6$ КОЕ/г) было выявлено в вышеназванной почве разреза 4БС-18, в том же горизонте Аа (см. табл. 3). Минимальное количество мицелиальных грибов ($1,2 \pm 0,6 \times 10^4$ КОЕ/г) отмечено в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18 в верхнем горизонте А [4]. Исходя из этих данных, была подсчитана общая численность микроорганизмов для каждой почвы. Наиболее богатой ($1,5 \pm 0,7 \times 10^6$ КОЕ/г) оказалась мерзлотная лугово-черноземная почва разреза 4БС-18, заложенного на пашне. Чуть меньшее значение ($1,2 \pm 0,6 \times 10^6$ КОЕ/г) общей численности микроорганизмов было определено в микробоценозе черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, заложенного на злаково-разнотравном лугу. Второе место по ОЧМ заняли два разреза – 2БС-09 и 12БС-18 с соответствующими значениями $5,8 \pm 4,4 \times 10^5$ и $5,8 \pm 3,1 \times 10^5$ КОЕ/г.

Общая численность микроорганизмов в микробоценозе солончака солонцеватого оказалась минимальной и составляла $5,0 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г [4].

В микробоценозе лугово-черноземной почвы разреза 4БС-18 были выявлены максимальные содержания четырех групп исследуемых микроорганизмов, а именно аммонифицирующих ($9,9 \pm 3,8 \times 10^5$ КОЕ/г), олигонитрофильных ($1,4 \pm 0,3 \times 10^6$), мицелиальных грибов ($1,0 \pm 0,1 \times 10^6$) и целлюлозолитиков ($1,7 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г). Пул бактерий был локализован в поверхностном горизонте Аа, на глубине 0–23 см (см. табл. 3).

Исходя из вышеизложенного, ОЧМ в микробных сообществах изучаемых мерзлотных почв возрастала в следующей последовательности: солончак солонцеватый (разрез 7БС-18) $5,0 \pm 0,1 \times 10^4$, лугово-черноземная (разрез 12БС-18) $5,8 \pm 3,1 \times 10^5$ и чернозем (разрез 2БС-09) $5,8 \pm 4,4 \times 10^5$, черноземно-луговая (разрез 3БС-18) $1,2 \pm 0,6 \times 10^6$, лугово-черноземная (разрез 4БС-18) $1,5 \pm 0,7 \times 10^6$.

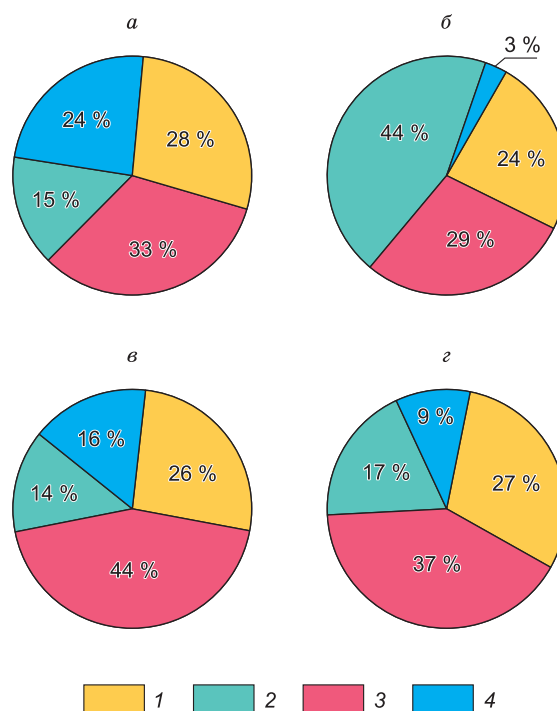
Если сравнить две лугово-черноземные почвы разрезов 4БС-18 и 12БС-18, то можно проследить их различия не только по химическому составу и гидротермическим параметрам, но и по содержанию микроорганизмов. Разрез 4БС-18 заложен на пашне, а разрез 12БС-18 – на разнотравно-злаковом лугу (целина). По гидротермическим условиям данные почвы различались. Так, в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18 влажность почвы была низкой и держалась на одном уровне по всей глубине почвенного профиля 11,0–12,3 %, а температура почвы (8,6–19,1 °С) падала с глубиной (см. табл. 2). В лугово-черноземной почве разреза 12БС-18 влажность была выше (15,1–23,3 %), чем в почве разреза 4БС-18, а температура, наоборот, была пониженной (2,5–13,8 °С) и также падала с глубиной. Лугово-черноземная почва разреза 12БС-18 оказалась наиболее увлажненной среди всех исследуемых почв и наименее прогретой. Лугово-черноземная почва разреза 4БС-18 оказалась менее увлажненной, но более теплой. По химическим данным, почвы различались по количеству гумуса, N и обменных катионов. В почве разреза 4БС-18 содержание последних оказалось чуть пониженным, чем в почве разреза 12БС-18, но содержание обменного катиона Ca^{+2} у обеих почв было практически равным. По показаниям pH обе лугово-черноземные почвы оказались (8,0–9,4) щелочными и сильнощелочными. В лугово-черноземной почве разреза 12БС-18 свободных карбонатов было больше, чем в почве разреза

4БС-18, при этом первая почва была более засоленной. По общей численности микроорганизмов микробоценоз лугово-черноземной почвы разреза 4БС-18 ($1,5 \pm 0,7 \times 10^6$ КОЕ/г) оказался более насыщенным микроорганизмами, чем микробоценоз лугово-черноземной почвы разреза 12БС-18 ($5,8 \pm 3,1 \times 10^5$ КОЕ/г), при этом разница в ОЧМ составила почти 3 раза. Таким образом, здесь основными отличительными признаками являлись содержание карбонатов и засоленность почв. Засоленность почв негативно влияет на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов, что может привести к ухудшению свойств почв. Следовательно, по химическим и гидротермическим показателям почва разреза 4БС-18 оказалась наиболее благоприятной для развития почвенных микроорганизмов.

Для оценки биологической активности изучаемых мерзлотных почв был проведен анализ на наличие аэробных целлюлозолитических и азотфиксирующих микроорганизмов. Содержание целлюлозолитических микроорганизмов варьировало в пределах $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ – $1,7 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г, а их максимальное количество было зафиксировано в мерзлотной лугово-черноземной почве разреза 4БС-18 (см. табл. 3).

Азотфиксирующие бактерии были определены почти во всех изучаемых мерзлотных почвах, за исключением солончака солонцеватого [4], а их максимальное количество (96,0 %) отмечалось в черноземе разреза 2БС-09, в единственной незасоленной почве из всех исследованных (см. табл. 3). Известно, что азотобактер обитает в плодородных почвах, а засоленность, как было указано выше, считается одним из факторов, отрицательно влияющих на качество и плодородие почвы. Остальные исследуемые почвы оказались в разной степени засоленными и характеризовались наличием различных солевых профилей, но тем не менее, азотфиксаторы в них были обнаружены – в наименьшем содержании, равном 1,3–10,3 %. В целом, изучаемые мерзлотные почвы имели низкую биологическую активность, так как согласно вышеупомянутой шкале их обогащенность гумусом и азотом считалась низкой и очень низкой [13].

Исходя из данных по ОЧМ, было рассчитано процентное соотношение исследуемых групп микроорганизмов в каждой почве (см. рисунок). Результаты по содержанию эколого-физиологических групп микроорганизмов показали разные процентные соотношения в микробных сообще-



Соотношение состава функциональных групп в микробоценозах исследуемых почв, 2019 г.

а – чернозем (разр. 2БС-09); б – черноземно-луговая (разр. 3БС-18); в – лугово-черноземная (разр. 4БС-18); г – лугово-черноземная (разр. 12БС-18). 1 – бактерии на МПА; 2 – актиномицеты; 3 – бактерии на среде Эшби; 4 – грибы (микробицеты)

The ratio of the composition of functional groups (%) in the microbiocenoses of the studied soils, 2019.

а – chernozem; б – chernozemic-meadow; в – meadow-chernozem; г – meadow-chernozem. 1 – Bacteria on MPA; 2 – Actinomycetes; 3 – Bacteria on Ashby; 4 – Micromycetes

ствах изучаемых почв. Так в микробном сообществе чернозема (разрез 2БС-09) доминировали бактерии на среде Эшби (олигонитрофильные бактерии – 33 %), затем бактерии на МПА (аммонификаторы – 28), мицелиальные грибы (24) и актиномицеты (15 %) (см. рисунок, а).

В микробоценозе черноземно-луговой почвы (разрез 3БС-18) преобладали актиномицеты (44 %), бактерии на среде Эшби (олигонитрофилы – 29), бактерии на МПА (аммонификаторы – 24) и мицелиальные грибы (3 %) (см. рисунок, б). В наиболее насыщенной микроорганизмами лугово-черноземной почве (разрез 4БС-18) больше всего обнаружено бактерий на среде Эшби (олигонитрофилов – 44 %), затем бактерии на МПА (аммонификаторы – 26), грибы (16) и актиномицеты (14 %) (см. рисунок, в).

В составе микробного сообщества мерзлотной лугово-черноземной почвы разреза 12БС-18 было выявлено больше всего олигонитрофилов

(37 %), аммонификаторов (27), актиномицетов (17) и мицелиальных грибов (9 %) (см. рисунок, з). В микробном пуле солончака разреза 7БС-18, группа аммонифицирующих бактерий превосходила остальные – 35 %, второе место занимали олигонитрофилы (30), затем актиномицеты (25), и подавляющее меньшинство – мицелиальные грибы (10 %) [4].

Таким образом, в микробных комплексах исследуемых мерзлотных почв в основном доминировали олигонитрофильные бактерии, которые способны обитать в почвах с низким количеством азота. Следовательно, количество этих микроорганизмов в данных почвах подтверждает низкое содержание в них гумуса и общего азота.

Обнаружение в микробных сообществах исследуемых почв мицелиальных микроорганизмов позволяет судить об интенсивности протекания процессов, влияющих на биологическую активность почв. Так в наиболее обогащенной гумусом и увлажненной черноземно-луговой почве разреза 3БС-18 содержание почвенного органического вещества максимально составляло 29 %, и здесь было отмечено наибольшее количество актиномицетов – $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г. Максимальное содержание мицелиальных грибов (24 %) отмечено в микробоценозе чернозема (разр. 2БС-09). Значимость мицелиальных грибов в почвах несомненна, так как они активно участвуют в деградации органики, круговороте веществ, поэтому их присутствие подтверждает биогенность данной почвы. Таким образом, соотношение определенных групп микроорганизмов в микробоценозах изучаемых почв зависело от содержания гумуса и общего азота.

Для установления зависимости количества почвенных микроорганизмов от гидротермических и химических показателей почв был проведен корреляционный анализ по каждой исследуемой почве. В черноземе разреза 2БС-09 достоверных для данного уровня доверительной вероятности коэффициентов корреляции между количеством микроорганизмов, гидротермическими и химическими почвенными показателями обнаружено не было. Однако, здесь наблюдались более значительные положительные корреляционные связи между количеством исследуемых групп микроорганизмов и другими параметрами ($r = 0,740-0,806$), за исключением влажности ($r = 0,380-0,404$). Существенную корреляционную зависимость ($r = 0,770-0,833$) отмечали у численности олигонитрофильных бактерий

от температуры. Корреляционная связь количества микроорганизмов и pH почвы носила незначительный и отрицательный характер. В микробоценозе данной почвы численность микроорганизмов зависела в большей степени от содержания гумуса и температуры почвы (табл. 4).

Высокое статистически достоверное значение коэффициента корреляции ($r = 0,967$) было обнаружено между численностью актиномицетов и влажностью почвы в мерзлотной черноземно-луговой почве разреза 3БС-18. В данной почве был отмечен значительный положительный коэффициент корреляции между численностью аммонификаторов и pH ($r = 0,845$). Количество актиномицетов здесь также зависело от pH, но связь была отрицательной ($r = -0,855$). В микробоценозе черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18 численность микроорганизмов не зависела от температуры почвы и содержания азота (см. табл. 4).

Высокие коэффициенты корреляции, как положительные, так и отрицательные с pH почвы (r от $-0,886$ до $0,960$), гумусом ($r = 0,884-0,910$) и содержанием азота ($r = 0,800-0,975$) были обнаружены у аммонифицирующих бактерий, актиномицетов и микромицетов в микробоценозе лугово-черноземной почвы разреза 4БС-18. Также были выявлены статистически значимые коэффициенты корреляции ($r = 0,920-0,993$) в лугово-черноземной почве разреза 12БС-18, которые отмечались у трех групп микроорганизмов (аммонификаторов, олигонитрофилов и микромицетов) с содержанием гумуса и азота (см. табл. 4).

Летом 2019 г. для всех исследуемых мерзлотных почв ЯБС, кроме черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, не отмечались значимые корреляционные связи между численностью микроорганизмов и изучаемыми параметрами данных почв. В то время как проведенный корреляционный анализ для почвы вышеназванного разреза показал, что здесь отмечалась положительная статистически значимая корреляционная связь ($r = 0,967$) между влажностью этой почвы и количеством актиномицетов. В микробоценозах четырех почв, кроме черноземно-луговой почвы разреза 3БС-18, численность микроорганизмов находилась в сильной зависимости от температуры. Коэффициенты корреляции численности микроорганизмов и pH почвы были отрицательными. В микробных сообществах исследуемых мерзлотных почв численность микроорганизмов, как правило, коррелировала с содержаниями гу-

Таблица 4

Коэффициенты корреляции (r) между численностью микроорганизмов и физико-химическими параметрами в исследуемых почвах

Table 4

Correlation coefficients (r) between the number of microorganisms and the physicochemical parameters in the studied soils

Фактор	Бактерии на МПА	Бактерии на среде Эшби	Актиномицеты	Микромицеты
Разрез 2БС-09, мерзлотный чернозем				
Температура	0,760	0,806	0,675	0,741
Влажность	0,404	0,450	0,380	0,388
pH _{H₂O}	-0,761	-0,780	-0,656	-0,734
Гумус	0,781	0,783	0,690	0,763
N	0,761	0,743	0,670	0,740
Разрез 3БС-18, мерзлотная черноземно-луговая почва				
Температура	-0,256	-0,567	0,294	0,611
Влажность	0,030	0,691	0,967	0,742
pH _{H₂O}	0,845	0,520	-0,855	-0,434
Гумус	-0,673	-0,810	0,704	0,624
N	-0,611	-0,760	0,633	0,400
Разрез 4БС-18, мерзлотная лугово-черноземная почва				
Температура	0,866	0,833	0,690	0,704
Влажность	0,330	0,258	-0,003	0,193
pH _{H₂O}	-0,886	-0,680	-0,890	-0,960
Гумус	0,910	0,720	0,740	0,884
N	0,975	0,800	0,830	0,970
Разрез 12БС-18, мерзлотная лугово-черноземная почва				
Температура	0,781	0,770	0,680	0,681
Влажность	0,693	0,710	0,240	0,789
pH _{H₂O}	-0,182	-0,200	0,335	-0,350
Гумус	0,976	0,974	0,830	0,920
N	0,993	0,990	0,710	0,975

Примечание. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые коэффициенты корреляции (p = 0,95).
Note. Statistically significant correlation coefficients (p = 0,95) are shown in bold.

муса и общего азота. В мерзлотной лугово-черноземной почве разреза 4БС-18, которая отличалась максимальной общей численностью микроорганизмов, наблюдались значимые положительные корреляционные зависимости между количеством микроорганизмов и почвенными параметрами, такими как температура, содержание гумуса и общего азота.

Заключение

Проведено комплексное исследование свойств, состава и микробиологической активности мерзлотных лугово-степных почв ЯБС на территории Центральной Якутии. Оценка данных по гидро-термическим показателям всех изученных почв позволила констатировать, что мерзлотный со-

лончак солонцеватый разреза 7БС-18 оказался наиболее теплой из всех изученных почв, здесь температура на глубине 90 см составляла 14 °С. Повышенной увлажненностью (15,1–23,3 %) выделялись почвы разрезов 3БС-18 и 12БС-18. Основными физико-химическими показателями, влияющими на численность и внутрипрофильное распределение микроорганизмов, являлись pH, содержание гумуса и общего азота. При этом необходимо отметить, что реакция среды этих мерзлотных почв, как правило, изменялась по их профилям сверху вниз от слабощелочной (pH 7,9–8,1) до сильнощелочной (pH 8,9–9,5). Внутрипрофильное распределение гумуса и азота в исследуемых мерзлотных почвах обычно характеризовалось как резко убывающее с мак-

симумами, отмечаемыми в верхних гумусовых горизонтах, и минимумами – в нижних минеральных.

Проведенные микробиологические исследования показали, что численность отдельных эколого-физиологических групп микроорганизмов в изучаемых мерзлотных почвах колебалась значительно от $8,2 \pm 3,3 \times 10^1$ до $2,4 \pm 0,8 \times 10^6$ КОЕ/г почвы. По возрастанию микробиологической активности исследуемые почвы можно выстроить в ряд: солончак солонцеватый (разрез 7БС-18) → лугово-черноземная (разрез 12БС-18) и чернозем (разрез 2БС-09) → черноземно-луговая (разрез 3БС-18) → лугово-черноземная (разрез 4БС-18). Наибольшее количество микроорганизмов по ОЧМ было обнаружено в мерзлотной лугово-черноземной почве разреза 4БС-18.

В микробоценозах данных мерзлотных почв отмечалось различное относительное содержание основных эколого-физиологических групп микроорганизмов в зависимости от типов почв, особенностей их свойств и состава. Так в микробоценозе чернозема разреза 2БС-09 доминировали олигонитрофильные бактерии, в черноземно-луговой почве разреза 3БС-18 – актиномицеты, в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18 – олигонитрофилы, в солончаке солонцеватом разреза 7БС-18 – аммонификаторы. Доминирование определенных групп микроорганизмов зависело от химического состава и гидротермических показателей почв. В изучаемых почвах количество обнаруженных аэробных целлюлозолитических микроорганизмов было незначительно и его максимальное значение ($1,7 \pm 0,1 \times 10^4$ КОЕ/г) было отмечено в лугово-черноземной почве разреза 4БС-18. Азотфиксаторы обнаружены в четырех исследуемых почвах, за исключением солончака солонцеватого. Наибольшее содержание азотфиксаторов отмечено в черноземе, в единственной незасоленной почве из всех исследуемых. В пределах почвенных профилей максимальное количество изучаемых микроорганизмов отмечалось в органо-аккумулятивных горизонтах, затем вниз по профилю наблюдался спад их численности.

Оценка корреляционной зависимости численности микроорганизмов от параметров исследуемых почв показала, что количества микроорганизмов в основном следовали за изменениями содержания гумуса и азота. В микробоценозах исследуемых мерзлотных почв численность микро-

организмов также больше зависела от температуры, нежели от влажности почвы. Коэффициенты корреляции связей численности микроорганизмов со значениями pH почв оказались отрицательными для всех исследованных почв.

Полученные результаты микробиологических исследований мерзлотных лугово-степных почв исследуемого региона криолитозоны могут быть использованы для биоиндикации их почвенного плодородия, а также для определения степени антропогенной и агрогенной трансформаций криогенных почв.

Список литературы / References

1. Еловская Л.Г. Почвы территории Чочур-Муранской опытно-биологической лаборатории. *Научные сообщения*. 1961;(5):3–11.
2. Yelovskaya L.G. Soils of the territory of the Chochur-Muransk experimental biological laboratory. *Scientific reports*. 1961;(5):3–11. (In Russ.)
3. Горохов А.Н., Чевычелов А.П., Николаева О.А. Особенности природных условий ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны. *Проблемы региональной экологии*. 2020;(2):15–19. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12015>.
4. Gorokhov A.N., Chevychelov A.P., Nikolaeva O.A. Features of natural conditions of the Botanical Garden Institute of Biological Problems of the Cryolithozone. *Regional Environmental Issues*. 2020;(2):15–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12015>.
5. Чевычелов А.П., Горохов А.Н., Николаева О.А. и др. Почвенно-растительный покров Якутского ботанического сада. Новосибирск: Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние РАН; 2022. 164 с. <https://doi.org/10.53954/9785604782408>
6. Chevychelov A.P., Gorokhov A.N., Nikolaeva O.A., et al. *Soil and vegetation cover of the Yakut Botanical Garden*. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022. 164 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.53954/9785604782408>.
7. Кузьмина Н.П., Ермолаева С.В., Чевычелов А.П. Микробоценозы мерзлотных лугово-степных почв Центральной Якутии в экстремальных условиях засоления. В кн.: *Почвы и окружающая среда: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, 2–6 октября 2023 г.* Новосибирск: ИПА СО РАН; 2023. С. 297–301. <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>
8. Kuzmina N.P., Ermolaeva S.V., Chevychelov A.P. Microbiocenoses of cryogenic meadow-steppe soils of Central Yakutia in extreme salinity conditions. In: *Soils and the Environment: Collection of scientific papers of the Russian Scientific Conference with international par-*

icipation dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, October 2-6, 2023. Novosibirsk: IPA SB RAS; 2023, pp. 297–301. (In Russ.) <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>

5. Роде А.А. Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск: Наука; 1971. 92 с.

Rode A. A. A system of research methods in soil science. Novosibirsk: Nauka, 1971. 92 p. (In Russ.)

6. Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1983. 320 с.

Rozanov B.G. Morphology of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1983. 320 p. (In Russ.)

7. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета; 1970. 487 с.

Arinushkina E.V. Manual on chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1970. 487 p.

8. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М.: Изд-во Московского университета; 1989. 272 с.

Vorobyeva L.A. Chemical analysis of soils. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1989. 272 p.

9. Еловская Л.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР; 1987. 172 с.

Yelovskaya L.G. Classification and diagnostics of cryogenic soils in Yakutia. Yakutsk: Yakut Branch of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1987. 172 p. (In Russ.)

10. Методы почвенной микробиологии и биохимии. Звягинцев Д.Г. (ред.) М.: Изд-во Московского университета; 1991. 304 с.

Methods of soil microbiology and biochemistry. Zvyagintsev D.G. (ed). Moscow: Publishing House University; 1991. 304 p. (In Russ.)

11. Коноровский А.К. Зональность и мерзлотность почв Якутии. Якутск; 1990. 43 с.

Konorovsky A.K. Zonality and cryogenic of soils of Yakutia. Yakutsk; 1990. 43 p. (In Russ.)

12. Мякина Н.Б., Аринушкина Е.В. Методическое пособие для чтения результатов химических анализов почв. М.: Изд-во Московского университета; 1979. 63 с.

Myakina N.B., Arinushkina E.V. Methodological guide for interpreting the results of soil chemical analyses. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1979. 63 p. (In Russ.)

13. Орлов Д.С., Лозанская И.Н., Попов П.Д. Органическое вещество почв и органические удобрения. М.: Изд-во Московского университета; 1985. 98 с.

Orlov D.S., Lozanskaya I.N., Popov P.D. Organic matter of soils and organic fertilizers. Moscow: Publishing House of Moscow University; 1985. 98 p. (In Russ.)

14. Чевычелов А.П., Скрыбыкина В.П., Васильева Т.И. Географо-генетические особенности формирования свойств и состава мерзлотных почв Центральной Якутии. Почвоведение. 2009;(6):648–657. <https://doi.org/10.1134/S1064229309060039>

Chevychelov A.P., Skrybykina V.P., Vasil'eva T.I. Geographic and genetic specificity of permafrost-affected soils in central Yakutia. Eurasian Soil Science. 2009;42(6): 600–608. <https://doi.org/10.1134/S1064229309060039>

15. Практикум по почвоведению. Кауричев И.С. (ред.) М.: Колос; 1980. 272 с.

Soil science workshop. Kaurichev I.S. (ed.) Moscow: Kolos Publ.; 1980. 272 p. (In Russ.)

16. Якутское УГМС – гидрометеорологическая информация в Республике Саха (Якутия). Режим доступа: <https://ykuthydromet.ru>

Yakut UGMS – hydrometeorological information in the Republic of Sakha (Yakutia). Available at: <https://ykuthydromet.ru>

Об авторах

КУЗЬМИНА Надежда Петровна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-4581-7085>, ResearcherID: ABT-0098-2022, Scopus Author ID: 55237081500, SPIN: 2067-0172, e-mail: erel1982@mail.ru

ЕРМОЛАЕВА Светлана Валерьевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4173-4970>, ResearcherID: ANH-9453-2022, Scopus Author ID: 57322414800, SPIN: 5171-4571, e-mail: sveta_efa@mail.ru

ЧЕВЫЧЕЛОВ Александр Павлович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, <http://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, ResearcherID: D-7565-2018, Scopus Author ID: 6602651664, SPIN: 6088-1487, e-mail: chev.soil@list.ru

Вклад авторов

Кузьмина Н.П. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, руководство исследованием; **Ермолаева С.В.** – проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, визуализация; **Чевычелов А.П.** – разработка концепции, методология, верификация данных, ресурсное обеспечение исследования, руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KUZMINA, Nadezhda Petrovna, Cand. Sci. (Biol.), Scientific Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-4581-7085>, ResearcherID: ABT-0098-2022, Scopus Author ID: 55237081500, SPIN: 2067-0172, e-mail: ere11982@mail.ru

ERMOLAEVA, Svetlana Valeryevna, Research Engineer, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4173-4970>, ResearcherID: AHH-9453-2022, Scopus Author ID: 57322414800, SPIN: 5171-4571, e-mail: sveta_efa@mail.ru

CHEVYCHELOV, Aleksandr Pavlovich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2668-9745>, ResearcherID: D-7565-2018, Scopus Author ID: 6602651664, SPIN: 6088-1487, e-mail: chev.soil@list.ru

Authors' contribution

Kuzmina N.P. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, writing – original draft, writing – review & editing, supervision; **Ermolaeva S.V.** – investigation, resources, visualization; **Chevychelov A.P.** – conceptualization, methodology, validation, resources, supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 22.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 21.11.2024

Принята к публикации / Accepted 10.12.2025