

УДК 631.4

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245>

Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья

© 2024 А. А. Данилова ¹, П. П. Данилов ², В. С. Макаров ^{2,3}, А. А. Винокуров²¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск, 630501, Россия. E-mail: danilova7alb@yandex.ru²Научно-исследовательский институт прикладной экологии севера СВФУ имени М.К. Аммосова, проспект Ленина, 43, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 634055, Россия. E-mail: DanPP@mail.ru³Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная 36, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), 677010, Россия. E-mail: mvs379@yandex.ru

Цель исследования – общая микробиологическая характеристика катенального ряда почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья.

Место и время проведения. Район исследования – окрестности п. Томтор (N63°15'41,94"; E143°10'26,91") Оймяконского района Республики Саха (Якутия). Образцы почв отобрали осенью 2011 г. на основных позициях катены. Длина катены ~38 км, высота над ур. м. нижней точки 727 м, верхней – 821 м. Почвы – мерзлотный подбур (лес); мерзлотная каштановая (остепенённый луг), мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг); мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг).

Методы. Содержание подвижного органического вещества (ПОВ) в почве определяли по оптической плотности вытяжки фосфатным буфером (1/15М, рН 6,8). Число колониеобразующих единиц (КОЕ) определяли на стандартных средах МПА, КАА, Чапека. Оценку функционального спектра микробного комплекса почвы провели методом мультисубстратного тестирования с применением 24 субстратов. Уреазную активность почвы оценивали по разложению мочевины с колориметрическим определением продукта реакции – аммония. Все показатели изучили по слоям почвы толщиной 10 см до глубины 40 см.

Основные результаты. Влажность образцов почвы в слое 0–10 см вниз по катене на момент отбора проб изменялась от 5 до 20%, содержание ПОВ – от 2 до 6 г С /кг. В слое 0–10 см наибольшее накопление ПОВ отмечено в почве под настоящим лугом. Там же обнаружено наибольшее число КОЕ (150 млн/г почвы) на разбавленной среде МПА. Установлено увеличение доли клеток, находящихся в стадии покоя, в ряду почв от нижней позиции катены к верхней. В этом же ряду отмечено повышение показателя олиготрофности сообщества. Наибольшая метаболическая активность отмечена в почве под заболоченным лугом, наименьшая – под лесом. Обогащённость органического вещества микроорганизмами возростала в ряду почв под лугом заболоченным – лугом настоящим – лугом остепенённым, в то время как показатель удельной активности микробиоты снижался. Уреазная активность почвы выявлена преимущественно в слое 0–10 см; при переходе в нижележащий слой показатель снижался более чем в 500 раз.

Заключение. Общие черты биологических свойств изученных почв соответствовали известным закономерностям, установленным для катенального ряда почв в других почвенно-климатических условиях. Особенность изученных почв заключалась в крайне резкой дифференциации микробиологического профиля. Падение числа КОЕ при переходе из верхнего 0–10 см слоя в нижние достигало 30–60 раз, ферментативной активности – до 500 раз. Особенность культивируемой части микробного сообщества почвы также заключалась в абсолютном преобладании КОЕ актиномицетов в почве под остепенённым лугом. На этом варианте актиномицеты преобладали не только на среде КАА, где часто учитывают эту группу микроорганизмов, но и на средах МПА и Чапека. Установленные закономерности отражают повышение микробиологической переработанности почвенного органического вещества от заболоченной почвы к остепенённой при снижении удельной активности микробиоты в этом же ряду почв.

Ключевые слова: Оймякон; катена; органическое вещество; число КОЕ; ферментативная активность; мультисубстратное тестирование.

Цитирование: Данилова А.А., Данилов П.П., Макаров В.С., Винокуров А.А. Некоторые биологические особенности почв Куйдусунской впадины Оймяконского Нагорья // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 1. e245. DOI: [10.31251/pos.v7i1.245](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245)

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы интерес к экосистемам высоких широт существенно возрос в связи с изменением климата. На территории Республики Саха (Якутия) актуальность проблемы также обусловлена повышением техногенной нагрузки на северные территории (Данилова, Петров, 2022а).

Фрагментарные описания почв Оймяконского нагорья проводились в середине XX века в рамках обследования территории, прилегающей к федеральной автодороге Р-504 (М-56) «Колыма», которая протянулась от Якутска до Магадана, берега Охотского моря, пересекая хребты Сэттэ-Дабан, Сунтар-Хаята, Оймяконское нагорье и южные отроги хребта Черского (Оконешникова и др., 2021).

Почвы наиболее населённой территории Оймяконского нагорья – Куйдусунской впадины – были описаны в рамках ботанических исследований в 1975 г. (Скрябин, Коноровский, 1975). Первые систематические исследования этих почв были проведены в 2006–2008 гг. под руководством профессора Д.Д. Саввинова. По результатам исследований были выделены 14 типов почв и составлена карта-схема степени их антропогенной нарушенности (Винокуров, 2012). Биологическая составляющая почв полярных областей Якутии остаётся слабоизученной. Опубликованы сведения по техногенно-нарушенным экосистемам в контексте рекультивационных мероприятий: Анабарский район (Данилова и др., 2019), Усть-Янский район (Данилова, Петров, 2022б). При этом сведений по биологии почв естественных экосистем до сих пор крайне недостаточно. Опубликованы первые сведения по биологии почв низовий Колымы (Щелчкова и др., 2017).

Цель работы – сделать общую микробиологическую характеристику катенального ряда почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвы были отобраны осенью 2011 г. на типичных элементах рельефа. Длина катены ~38 км, высота над уровнем моря нижней точки 727 м, верхней – 821 м.

Для исключения разночтений, что неизбежно при описании слабоизученной территории, приводим таблицу названий исследуемых почв в соответствии с различными схемами классификации почв РФ.

Таблица 1

Список типов мерзлотных почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья, отобранных для микробиологического анализа

№ разреза	Фитоценоз	Предварительное название почвы ¹	по Еловской (1987) ²	Классификация и диагностика почв СССР (1977) ³	Классификация и диагностика почв России (2004) ⁴	IUSS Working Group WRB (2014) ⁵
Р-10-07	Лес	Мерзлотный подбур	Мерзлотный подбур	Не предусмотрены	Сухоторфяно-подбур	Cambic Cryosols (fragic, murshic)
Р-15-08	Остепённый луг	Тёмно-каштановая щепнистая суглинистая.	Мерзлотная каштановая	Каштановая	Петрозём гумусовый	Skeletal Cryosols (aridic)
Р-2-08	Настоящий луг	Мерзлотная пойменная дерново-луговая	Мерзлотная аллювиальная дерновая	Аллювиальная луговая кислая	Аллювиальная серогумусовая (дерновая) глеевая	Cambic Cryosols (fluvic)
Р-9-07	Заболоченный луг	Мерзлотная торфянистая пирогенно-преобразованная	Мерзлотная торфяная низинная	Торфяная болотная низинная	Торфяная эутрофная	Folic Cryosols

Примечание.

1 – Предварительное полевое название по Д.Д. Саввинову. 2 – Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии (1987). 3 – Классификация и диагностика почв СССР (1977). 4 – Классификация и диагностика почв России (2004). 5 – IUSS Working Group WRB (2014).

Разрез Р-10-07. Почва – **мерзлотный подбур** (по Еловской, 1987), в соответствии с международной классификацией IUSS Working Group WRB (2014, далее – WRB, 2014) – Cambic Cryosols (Fragic, Murshic). Зональный тип почв, развитый под мохово-лишайниковым листовничником на элювии и делювии разных пород. Приурочены к водоразделам и их склонам. Выражен криогенный бугристый микрорельеф. Почвы оттаивают на небольшую глубину, в зависимости от экспозиции склона, механического состава, характера напочвенного покрова. Характеризуются очень равномерной окраской минеральной толщи. Признаки оглеения отсутствуют.

Описание почвенного разреза Р-10-07, заложенного в 5 км к западу от с. Орто-Балаган в урочище Оттоох на южной экспозиции возвышенности под разреженным листовничником с кустарниковым покровом из ивы и кустарниковой берёзки:

А (0–3 см) – задернованный, свежий, темно-коричневый, слитый, бесструктурный, корни растений, переход резкий, граница ровная, присутствуют зольные остатки;

АВ (3–15 см) – тяжёлый суглинок, сухой, грязно-серый, белесоватый оттенок, комковато-зернистой структуры, плотный, корни растений, переход постепенный, граница ровная;

В (15–55 см) – тяжёлый суглинок, грязно-серый, сухой, глыбистой структуры, слитый, мелкие ржаво-охристые прожилки, корни растений, переход постепенный, граница ровная;

С (55–75 см) – лёгкий суглинок, свежий, слегка оглеен, криотурбированный, бесструктурный, мозаичного цвета, слитый;

Мерзлота – 75 см и глубже.

Разрез Р-15-08. Почва – **мерзлотная каштановая** (по Еловской, 1987), в соответствии с WRB (2014) – Skeletic Cryosols (Aridic). Зональный тип почв развивается в условиях экстраконтинентального климата на южных склонах средних сопкок и высоких надпойменных террас под остепенённой растительностью среди зональной лесной растительности на делювиальных отложениях плотных пород «верхоянской» свиты, включающей сланцы, аргиллиты, алевролиты, песчаники древних террас. Почвообразующие породы отличаются значительной щебнистостью. Почвы образуются под влиянием физических процессов выветривания, малой нормы осадков, обуславливающих непромывной водный режим, склоновых процессов. Травостой низкорослый (10–15 см), разреженный (30–50%), урожайность сухой массы 3–6 ц/га. Почвы и растительность степных склонов ранее рассматривали Е.М. Наумов, Н.А. Андреев (1963), С.З. Скрыбин, А.К. Коноровский (1975), В.И. Волковинцер (1978). М.А. Бронникова с соавторами (2022) предложили ввести подобные почвы в качестве самостоятельного генетического типа в классификации почв РФ под названием *криоаридные почвы*.

Описание разреза Р-15-08, заложенного в 2 км к северо-западу от с. Томтор на южной экспозиции 2/3 склона сопки:

А (0–3 см) – суглинок, слабо задернован, свежий, темно-каштановый, бесструктурный, рыхлый, мелкий щебень, не вскипает, переход постепенный, граница ровная;

АВ (3–15 см) – суглинок, сухой, светлее предыдущего горизонта, мелкозернистой структуры, щебень мелкий, не вскипает, уплотнённый, переход ясный, граница ровная;

В (15–38 см) – суглинок лёгкий, сухой, пылит, светлый со слоистыми коричневыми горизонтальными прожилками, щебень крупный, мелкозернистой структуры, плотный, не вскипает;

Д_{Ca} (38 см и глубже) – щебень.

Почва имеет укороченный щебнистый профиль, слоистость которого определяется солифлюкционными процессами, редко в минеральной части с нижней стороны щебёнки накопление карбонатной плесени. Растительность степная: несколько видов полыни, пострел многонадрезанный, кипрей узколистный, смолевка ползучая, незабудочник мелковетвистый, осока стоповидная, астра альпийская, камнеломка колючая, вероника седая, лапчатка якутская, овсяница колымская.

Разрез Р-2-08. Почва – **мерзлотная аллювиальная дерновая** (по Еловской, 1987), в соответствии с WRB (2014) – Cambic Cryosols (Fluvis), в регионе рассматриваются как зонально-интразональные образования. Почвы кислые, реже нейтральные, глеевый процесс слабо выражен, не засолены. Формируются под настоящими и слабо остепенёнными лугами. Растительность – тысячелистник обыкновенный, лапчатка гусиная, лапчатка прилистниковая, подорожник большой, колокольчик Лангсдорфа, осока твердоватая, овсяница колымская, кострец безостый. Режим затопления не устойчив по годам.

Описание разреза Р-2-08, заложенного на пойме на левом берегу ручья Буор-Урэх восточнее села Томтор под пологом малоостепенённого луга с колками лиственницы и ивы:

А_д (0–3 см) – дернина, сухая, черно-коричневая, переплетена корнями, плотная, мелкозернистой структуры, слитое, не вскипает, переход не ясный, граница ровная;

АВ (3–8 см) – супесь, сухая, светло-коричневая, уплотнённая, бесструктурный, не вскипает, переход постепенный, граница ровная;

В (8–20 см) – песок, сухой, светло-коричневый светлее предыдущего, уплотнённый, бесструктурный, не вскипает, слабо слоистый, гумусовые натеки по трещинам. Переход заметный, граница ровная;

С (20 см и глубже) – галечник с песком, мерзлота не обнаружена.

Общий рельеф слабо выраженный полигонально-западинный, разрез заложен на вершине полигона. Почвы характеризуются легким гранулометрическим составом. Имеют слабокислую реакцию по всему профилю. Гумусовый горизонт насыщен растительными остатками. В минеральной части профиля встречаются погребённые слои с высоким содержанием гумуса.

Разрез Р-9-07. Почва – мерзлотная торфяная низинная (по Еловской, 1987), в соответствии с WRB (2014) – Folie Cryosols, относится к интразональным почвам. Формируются в условиях холодного почвенного климата и избыточного увлажнения, застоя атмосферной влаги, поверхностного и надмерзлотного стока. Ранее образовавшиеся торфяные залежи консервируются мерзлотой, оттаивая не более чем на 50 см. Растительный покров представлен злаково-осоковыми ассоциациями и сфагновыми мхами. Особенность образования торфяных почв региона заключается в чередовании процессов накопления торфа и сгорания его с накоплением зольных остатков. В результате образуются псевдоминеральные горизонты.

Описание разреза Р-9-07, заложенного в 5 км к западу от с. Орто-Балаган в урочище Оттоох на ровном по рельефу сенокосном лугу под злаково-осоковой ассоциацией на берегу водоёма, быстро заполняемого водой:

О (0–2 см) – моховый, плохо разложившиеся остатки растений;

T₁ (2–8 см) – оторфованная дернина, влажная, светло-коричневая, бесструктурная, слитая, корни и остатки растений, зольные остатки торфяных пожаров, переход постепенный, граница ровная;

T₂ (8–17(20) см) – торфяник разложившийся, мокрый, темно-коричневый, бесструктурный, плотный, корни растений, процесс заболачивания, переход постепенный, граница ровная;

T₃ (17(20)–48 см) – сильноразложившийся торфяник с запахом сероводорода, темно-коричневый, мокрый, слабо-уплотнённый, бесструктурный, близкое залегание мерзлоты;

Мерзлота – 48 см и глубже.

На рисунке 1 представлен общий вид мест отбора проб и морфология почвенного профиля объектов исследования. Наименьшее содержание гумуса отмечено в почве под остепенным лугом; под лугом настоящим и заболоченным распределение органического вещества по профилю было неравномерным (табл. 2). Наиболее кислой была почва под настоящим лугом, наименее – под остепенным.

Таблица 2

Некоторые свойства исследуемых почв (Винокуров, 2012)

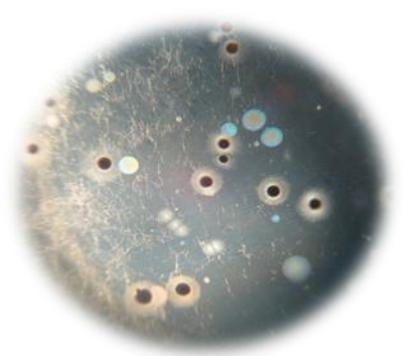
Горизонт (глубина, см)	рН водный	Гумус, %	N общий, %	Обменные основания, мг-экв/100г	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺
Мерзлотный подбур					
A _d (0–5)	5,6	36,7	1,85	11,42	10,31
A ₁ (5–15)	5,1	14,7	0,20	9,22	4,16
AB (B) (25–40)	5,3	13,5	0,44	7,33	2,35
B (BC) (65–70)	4,9	10,2	0,37	8,78	2,80
Мерзлотная каштановая*					
A (0–3)	6,2	7,1	0,30	19,98	5,92
AB (3–15)	6,9	2,5	0,20	14,95	2,60
B (15–38)	7,4	1,3	0,20	23,76	7,26
D _{Ca} (38 и глубже)	щебень				
Мерзлотная аллювиальная дерновая					
A (5–15)	4,7	22,3	1,31	2,10	1,81
AB (15–25)	4,7	0,5	0,04	1,21	0,72
B (30–40)	4,9	23,9	1,18	5,49	1,81
C (56–63)	5,1	10,4	0,44	3,84	1,09
Мерзлотная торфяная низинная					
T ₁ (0–2)	5,5	24,9	1,37	6,59	5,43
T ₂ (2–7)	5,1	9,3	0,65	3,84	1,63
T ₃ (12–35)	4,6	4,9	0,17	2,89	0,90

Примечание.

*Химический состав каштановой почвы по С.З. Скрыбину и А.К. Коноровскому (1975).



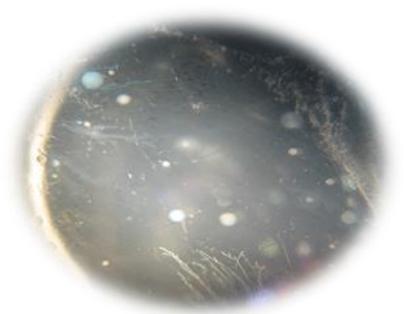
Мерзлотный подбур



Мерзлотная каштановая



Мерзлотная аллювиальная дерновая



Мерзлотная торфяная низинная

Рисунок 1. Общий вид мест отбора проб, профиль почв и морфология колоний микроорганизмов, выросших на поверхности агаризованной среды (МПА), стереолупа МБС10 × 6.

Температурный режим этих почв подробно изучен в средней (под настоящим лугом) и верхней (под лесом) позициях катены при помощи логгеров температуры DS1921G-F5 (Dallas Semiconductor Corp.), установленных в глубинах 0, 10, 20, 40 см. Регистрация данных шла в течение двух периодов: с октября 2016 г. по сентябрь 2017 г. и с сентября 2020 г. по август 2021 г., непрерывно с интервалом в 3 ч. Установлено, что даже в период максимального прогрева почвы в июле–августе в глубине 20 см

температуры не достигают 10 °С. Среднегодовая температура на этой глубине колебалась в пределах – 3,7–6,7 °С. Как и ожидалось, на долинной части катены температурный режим почвы был относительно более мягким в сравнении с плакором: среднегодовая температура на первой позиции составляла от –3,7 до –5,3 °С, на второй – –4,8 до –6,7 °С. Наиболее резкие колебания температуры почвы в течение года наблюдались на глубине 10 см и составляли от –30 до 15 °С (рис. 2).

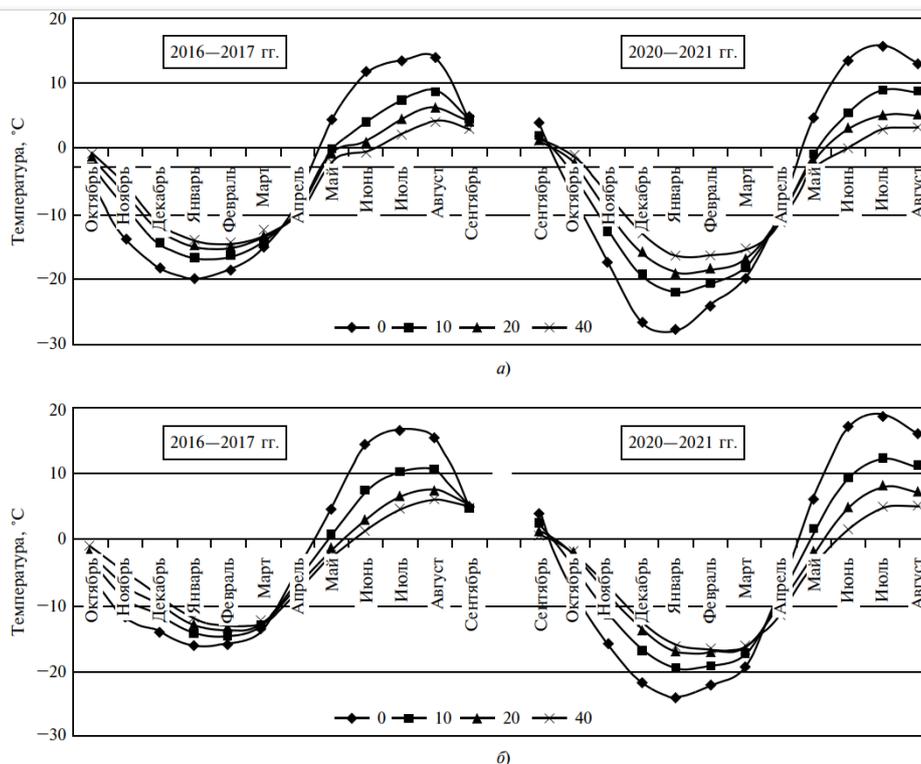


Рисунок 2. Среднемесячные температуры по слоям мерзлотного подбуря (а) и мерзлотной аллювиальной дерновой (серогумусовой) почвы (б) (Макаров и др., 2022).

Пробы почв отбирали в трёхкратной повторности с зачищенных стенок разрезов. Микробиологические анализы проводили в лаборатории плодородия почв СФНЦА РАН в течение месяца после отбора проб. До анализов образцы хранили в состоянии естественной влажности при температуре не выше 5 °С. Анализировали образцы в трёхкратной аналитической повторности.

Относительное содержание **подвижного органического вещества (ПОВ)** в почве определяли при помощи измерения оптической плотности вытяжки фосфатным буфером по Соренсену 1/15 М, рН = 6,8, соотношение почва: раствор 1:5, инкубация при 30 °С течение 24 ч., светофильтр 492 нм.

Число **колониеобразующих единиц (КОЕ)** определяли на стандартных агаризованных средах КАА, Чапека, а также на МПА в стандартной и разбавленной в 30 раз концентрациях. Оценку функционального спектра микробного комплекса почвы провели при помощи **метода мультисубстратного тестирования (МСТ)** (Горленко, Кожевин, 2005) в модификации (Данилова и др., 2019). Модификация метода связана с необходимостью учёта спектра активности сапротрофной части микробного сообщества почвы, быстро реагирующей на изменение состояния питательных источников в почве. Подготовку образцов к анализу проводили по обычной схеме для посева на агаризованные среды: 2 г почвы растирали в 20 мл стерильного фосфатного буфера по Соренсену с рН = 6,5. Суспензию взбалтывали на лабораторной качалке в течение 15 мин., подвергали центрифугированию в течение 20 мин. при 4000 об/мин. Инокулят объёмом 0,1 мл из разведения 1:10 вносили в 0,5 мл среды, содержащей минеральную основу среды Чапека, субстрат, пептон и индикатор трифенилтетразолийхлорид (ТТХ). Конечная концентрация субстрата в реакционной смеси составляла 0,2%, пептона – 0,1%. Использовали набор из 24 тест-субстратов: дульцит, инозит, маннит, сорбит, глицерин, мальтоза, лактоза, раффиноза, глюкоза, арабиноза, рамноза, ксилоза, галактоза, фруктоза, сахароза, крахмал, ацетат натрия, цитрат калия, цитрат аммония, малат калия, тартрат калия-натрия, мочевины, карбоксиметил целлюлоза, ТВИН-80. Инкубацию проводили 40 ч при температуре 28 °С. Окрашенность среды оценивали в баллах. Полученные функциональные спектры анализировали по:

(1) сумме баллов оценки активности процесса по 24 субстратам (суммарная активность); (2) выравненности спектра (равномерность утилизации субстратов согласно формуле: $E = 1/\sum (p_i)^2$, где p_i – доля балла активности утилизации каждого субстрата в общей сумме баллов по всем субстратам. Поскольку скорость развития окраски реакционной смеси зависит от исходного числа микробных клеток в посевном материале, необходима поправка на исходную неравнозначность посевного материала по микробной заселённости. Поэтому одновременно с постановкой МСТ проводили посев той же суспензии на агаризованную среду следующего состава (г/л): сухая питательная среда МПА – 0,3, пептон – 0,6, глюкоза – 0,1. Состав среды приближен к таковому органической основы реакционной смеси МСТ. Инкубацию чашек проводили в тех же условиях, что и пробирки МСТ. Учёт проводили через 72 часа после посева. Анализ проводили из 3 отдельных навесок каждого образца, с каждой навески заседали по 2-3 пробирки. При отсутствии достоверных различий между вариантами опыта числовые значения показателей усредняли, что существенно снижало вероятность случайных колебаний расчётных величин. Рассчитывали величину **удельной метаболической активности (УМА)** сапротрофного микробного сообщества, представляющего собой отношение суммы баллов оценки метаболической активности по 24 субстратам к числу КОЕ, млн/г почвы. Уреазную активность почвы оценивали по (Методы ..., 1980).

Статистическую обработку экспериментальных данных провели с использованием пакета программ Statistica. Анализ различия факторных средних выполнили методом дисперсионного анализа на уровне значимости $\alpha = 0,05$. В таблице и рисунках приведено среднее арифметическое значение со стандартным отклонением. Группировку объектов исследования при МСТ провели при помощи кластерного анализа (k-means clustering).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влажность почвы на момент отбора проб в целом соответствовала общим закономерностям распределения влаги по катене (рис. 3). Содержание ПОВ по объектам исследования также соответствовало известным закономерностям: в толще почвы мощностью 0–40 см показатель был наибольшим в болотной почве. В верхнем 0–10 см слое наибольшее накопление ПОВ отмечено в почве под настоящим лугом. При движении вверх по катене показатель закономерно снижался, что очевидно связано с низкой продуктивностью растительного покрова.

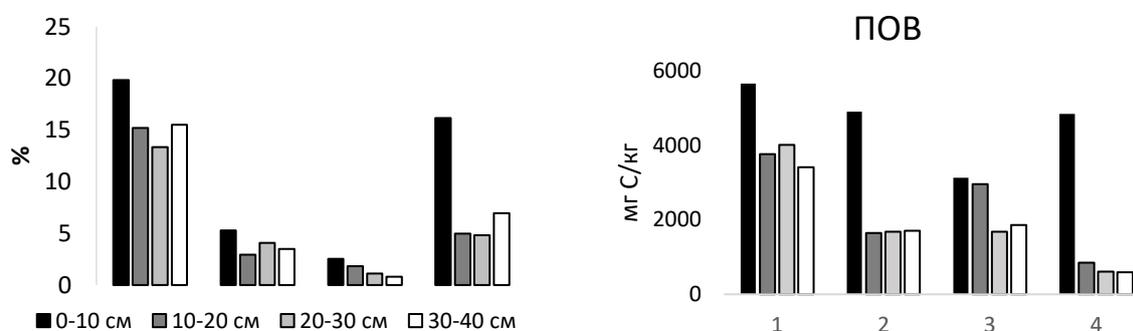


Рисунок 3. Влажность почвы и содержание подвижного органического вещества (ПОВ) в почве, переходящего в фосфатный буфер с рН 6,8. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес).

Микробный пейзаж почв, полученный на поверхности твёрдой питательной среды (МПА), четко различался морфологически (см рис. 1). Сапротрофный комплекс болотной почвы был представлен мелкими однообразными колониями. В луговой почве отмечали достаточно большое разнообразие бактериального населения, представленного относительно крупными колониями разнообразной формы и окраски. В остепенённой почве отмечали преобладание актиномицетов с различной окраской колоний (белые, серые, сиреневые). Микробный пейзаж лесной почвы был представлен тяжёлыми стерильного грибного мицелия и мелкими однообразными колониями бактерий. Таким образом, на морфологическом уровне удалось отметить чёткое различие в составе микробного населения изученных почв.

Общее число КОЕ в почве оценивали в сильно разбавленной среде МПА, что позволило обнаружить достаточно большое число микробных КОЕ, достигающее в луговой почве (0–10 см) 150

млн/г почвы. В целом наиболее заселённой была почва в пределах верхнего 0–10 см слоя. Несколько более равномерная заселённость по профилю отмечалась только в болотной почве (табл. 3).

Таблица 3

Культивируемая часть микробного сообщества исследуемых почв

Фитоценоз	Слой, см	Утилизирующие азот органический, млн КОЕ/г			Утилизирующие азот минеральный (КАА), млн КОЕ /г		КАА/МПА	Грибы (среда Чапека), тыс. КОЕ /г
		А	Б	А/Б*	Всего	Из них актиномицеты		
Заболоченный луг	0–10	3,2 ± 0,2	19,2 ± 2,8	6	6,6 ± 2,4	не обн.	2	47 ± 6,3
	10–20	30,7 ± 1,2	27,5 ± 2,3	1	1,8 ± 1,0	не обн.	0,1	11 ± 3,8
Настоящий луг	0–10	26,3 ± 1,9	150 ± 6,5	6	18,7 ± 6,5	2	0,7	30 ± 3,4
	10–20	1,6 ± 1,2	4,7 ± 1,2	3	2 ± 1,5	един.	1,2	17 ± 2,7
Остепенённый луг	0–10	11,6 ± 0,8	64,7 ± 15,4	6	26,8 ± 5,9	15	2,3	100 ± 17,0
	10–20	0,4 ± 0,3	5,6 ± 3,3	13	0,7 ± 0,1	един.	1,5	30 ± 5,1
Лес	5–10	1,2 ± 0,7	60 ± 12,4	60	0,7 ± 0,1	един.	0,1	41 ± 2,8
	10–20	0,2 ± 0,06	1,2 ± 0,5	6	0,9 ± 0,1	не обн.	4,5	6 ± 0,6

Примечание.

* – отношение числа КОЕ в среде МПА стандартной концентрации (А) и разбавленной в 30 раз (Б) для сравнения олиготрофности сапротрофной части микробного сообщества почв по катене.

Разбавленная среда МПА позволила учесть не только максимальное число КОЕ, но и скорость появления колоний на поверхности среды. При движении от болотной почвы к лесной повышалось относительное содержание медленнорастущих бактерий (доля колоний, вырастающих в пределах 3–7 дней после посева). То есть, микробный комплекс почв в этом направлении постепенно обогащался клетками, находящимися в стадии покоя, что вполне закономерно в связи с ужесточением гидротермического режима почв (рис. 4).

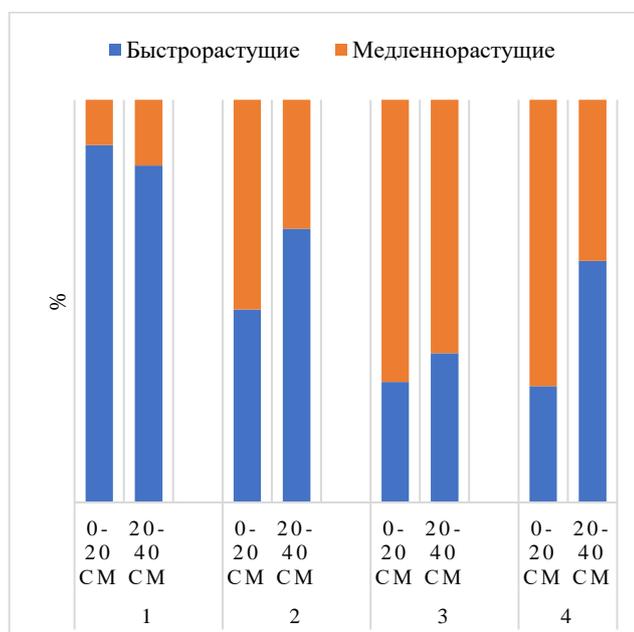


Рисунок 4. Дифференциация сапротрофного микробного сообщества почвы по скорости роста на поверхности агаризованной среды. Быстрорастущие – учитываемые в пределах 3 дней после посева, медленнорастущие – в пределах 3–7 дней после посева. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3- мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес).

Для составления сравнительного представления об особенностях числа КОЕ в исследуемом объекте приводим соответствующие данные для почв аласной катены на Лено-Виллойском междуречье (табл. 4). В почвах исследуемого объекта микробная обсеменность слоя почвы глубже 10 см была ниже, чем в аласных почвах, тогда как в верхнем 0–10 см показатель был существенно выше. В целом, в исследуемых почвах распределение микробных клеток в почве как по катене, так и по слоям почвы было более закономерным в сравнении с аласной системой почв, где в динамику показателя существенный вклад вносило засоление.

Таблица 4

Число колониеобразующих единиц (КОЕ) в почвах аласной катены (Лено-Амгинское междуречье), млн КОЕ/г (Данилова и др., 2017)

Слой, см	Гидротермический пояс аласа, фитоценоз			Межаласье
	Нижний, заболоченный луг	Средний, настоящий луг	Верхний, остепненный луг	Лес
0–10	6,9	11,1	18,9	8,2
10–20	4,2	5,6	6,6	23,7
20–30	1,7	1,2	3,2	3,7
30–40	2,3	0,8	1,4	3,8

Учёт числа КОЕ на стандартных питательных средах разной концентрации позволил оценить степень олиготрофности микробного комплекса исследуемых почв (см. табл. 3). Так, число КОЕ, учитываемое на богатой среде МПА, было ниже такового на бедной в 6–13 раз. При этом отметим, что данный показатель в слое почвы до 10 см практически не зависел от типа почвы, тогда как в слое 10–20 см отмечалось его закономерное повышение от болотной почвы к остепенённой до 13 см, что является, вероятно, отражением уменьшения в этом ряду почв запасов доступных источников питания для сапротрофной микробиоты.

Число КОЕ, утилизирующих минеральные источники азота (КАА), возрастало с нижней точки катены к верхней. Однако это обстоятельство вряд ли может быть свидетельством обогащения почвы минеральным азотом. Повышение числа КОЕ на этой среде было связано с повышением в составе микробного комплекса зачатков актиномицетов, наибольшее число и разнообразие которых отмечено в остепенённой почве. Эта закономерность вполне понятна и связана с понижением влажности почвы. Как известно, актиномицеты наиболее конкурентноспособны именно в этих условиях. Из сказанного следует, что общепринятый в почвенной биологии коэффициент минерализации, представляющий собой соотношение числа КОЕ на средах КАА и МПА, в нашем случае может применяться с должной мерой осторожности.

Число КОЕ, учитываемое на среде Чапека со стрептомицином, на нашем объекте также имело свои особенности. Повышение показателя в остепенённой почве в сравнении с болотной и луговой было связано с развитием на среде актиномицетов.

Таким образом, основная черта микробной заселённости почв объектов исследования заключалась в крайне резкой дифференциации микробиологического профиля. Падение числа КОЕ при переходе из верхнего 0–10 см слоя в нижние достигало 30–60 раз. Особенность культивируемой части микробного сообщества почвы также заключалась в преобладании актиномицетов в почве под остепенённым лугом. На этом варианте актиномицеты преобладали не только на среде КАА, где обычно учитывают эту группу микроорганизмов, но и на средах МПА и Чапека. Обилие актиномицетов в культивируемой части микробного сообщества сближает исследуемую почву под остепенённым лугом с каштановыми почвами сухостепных и пустынных областей. Черты подобного сходства по морфологическим показателям почвенного профиля отмечали первые исследователи почв Оймяконского нагорья (Скрябин, Коновский, 1975).

Следующий этап наших исследований заключался в оценке пищевых предпочтений микробного комплекса почвы. Для этих целей микробному населению предлагали спектр источников пищи (субстратов) от самых доступных (глюкоза) до сложных (целлюлоза) и оценивали степень их потребления в лабораторных условиях. Чем интенсивнее окраска ячейки, тем активнее потребляется субстрат. Степень окрашенности оценивали в баллах. Совокупность этих пиков составляет функциональный спектр микробного комплекса почвы (рис. 5). Картина получилась вполне закономерная. Наибольшая активность отмечена в под заболоченным лугом, наименьшая – под остепенённым.

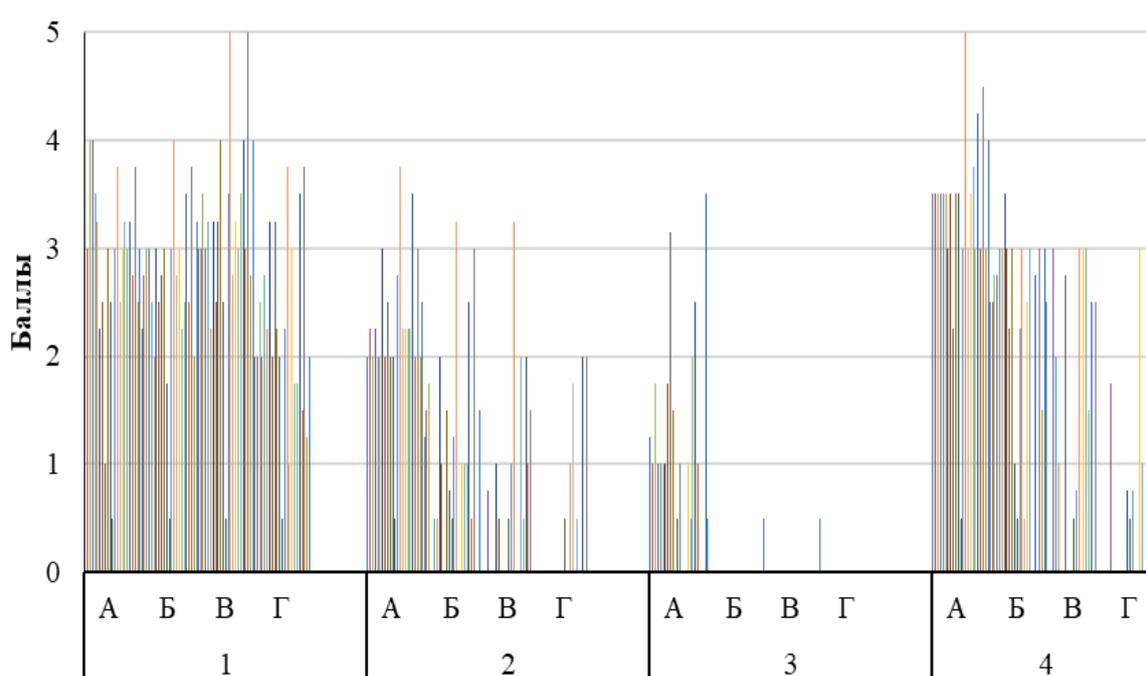


Рисунок 5. Функциональный спектр сапротрофного микробного сообщества катенарного ряда почв. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепененный луг), 4 – мерзлотный подбур (лес); слои почвы (см): А – 0–10, Б – 10–20, В – 20–30, Г – 30–40.

При интерпретации функционального спектра сапротрофного сообщества мы исходили из следующего положения: регистрируемый в момент анализа спектр активности утилизации групп субстратов микробным сообществом является отражением состава имеющихся в почве источников питательных веществ, то есть показателем адаптированности сообщества к потреблению того или иного спектра соединений (Banning et al., 2012, Kaneda et al., 2019). На первом этапе анализа результатов оценивали общий метаболический профиль сообщества без учёта числа КОЕ в инокуляте. Активность потребления углеводов в слое 0–10 см под заболоченным и настоящим лугами и под лесом оценивалась как высокая и видимо отражала отсутствие лимитирования сообщества по поступлению в среду лёгкой фракции органических веществ в условиях относительно высокой продуктивности растительности. Слабая развитость растительного покрова на остепенённом склоне обусловила более низкую активность утилизации углеводов микробным сообществом каштановой почвы. Анализ данных в более нижних слоях очевидно указывает на различие состава растительной биомассы поступающей в почву. Так в болотной почве состав биомассы по содержанию углеводов видимо был относительно равномерным до глубины 40 см. Резкое снижение показателя в луговой почве отражает очевидно соответствующее снижение поступления в почву углеводной фракции ОВ. Под лесом показатель вниз по профилю снижался вполне закономерно и плавно (рис. 6).

По утилизации спиртов особенности профиля в целом совпадали со спектром потребления углеводов.

По утилизации солей органических кислот профиль луговой почвы был сходен с профилем лесной почвы, с той лишь разницей, что под лесом глубина активного слоя была меньше.

Специфичность метаболического профиля каждого из вариантов достаточно хорошо была заметна по потреблению полимеров. Мощность наиболее активного слоя почвы снижалась в ряду болото – лес – луг – степь, что очевидно отражало специфику состава поступающих питательных источников для микробного сообщества.

Несколько иные закономерности отметили при расчёте метаболической активности микробиоты с учетом числа КОЕ в исходной вытяжке. В почве заболоченного луга удельная метаболическая активность (УМА) сообщества оказалась ниже, чем общая, то есть уровень последней обеспечивался за счёт высокого числа КОЕ с низкой метаболической активностью, что может быть свидетельством заторможенности минерализационных процессов в болотной почве вследствие высокого отношения С:N в поступающем растительном опаде. Сходная закономерность отмечена в слое 0–10 см почв настоящего луга (рис. 7 а, б).



Рисунок 6. Метаболический профиль сапротрофного микробного сообщества почв. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (заболоченный луг), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (настоящий луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес). Ячейки без окраски – активность не обнаружена.

Дополнительным показателем направленности биологических процессов является относительная обогащённость общего и подвижного органического вещества почвы ($C_{орг}$, ПОВ) клетками микроорганизмов. Для этого рассчитали число КОЕ, соответствующее единице $C_{орг}$ и ПОВ. Как видно из графика, в слое почвы 0–10 см показатель растёт от болотной почвы к остепенённой, что, согласно Мишустину (1975), означает повышение глубины переработанности почвенного органического вещества (рис.7 в, г).

По результатам расчёта показателей для удельной активности микробного комплекса, наибольшая активность отмечена для лесной почвы, где показатели были несоизмеримы с остальными типами почв. Анализ данных, полученных для катены, свидетельствует, что наибольшая удельная активность приходится на ПОВ луговой почвы, что вполне закономерно. Показатели, присущие болотной почве, вероятно, свидетельствуют о процессах консервации биомассы, остепенённой – о крайней заторможенности микробиологических процессов (рис. 7 ж, з).

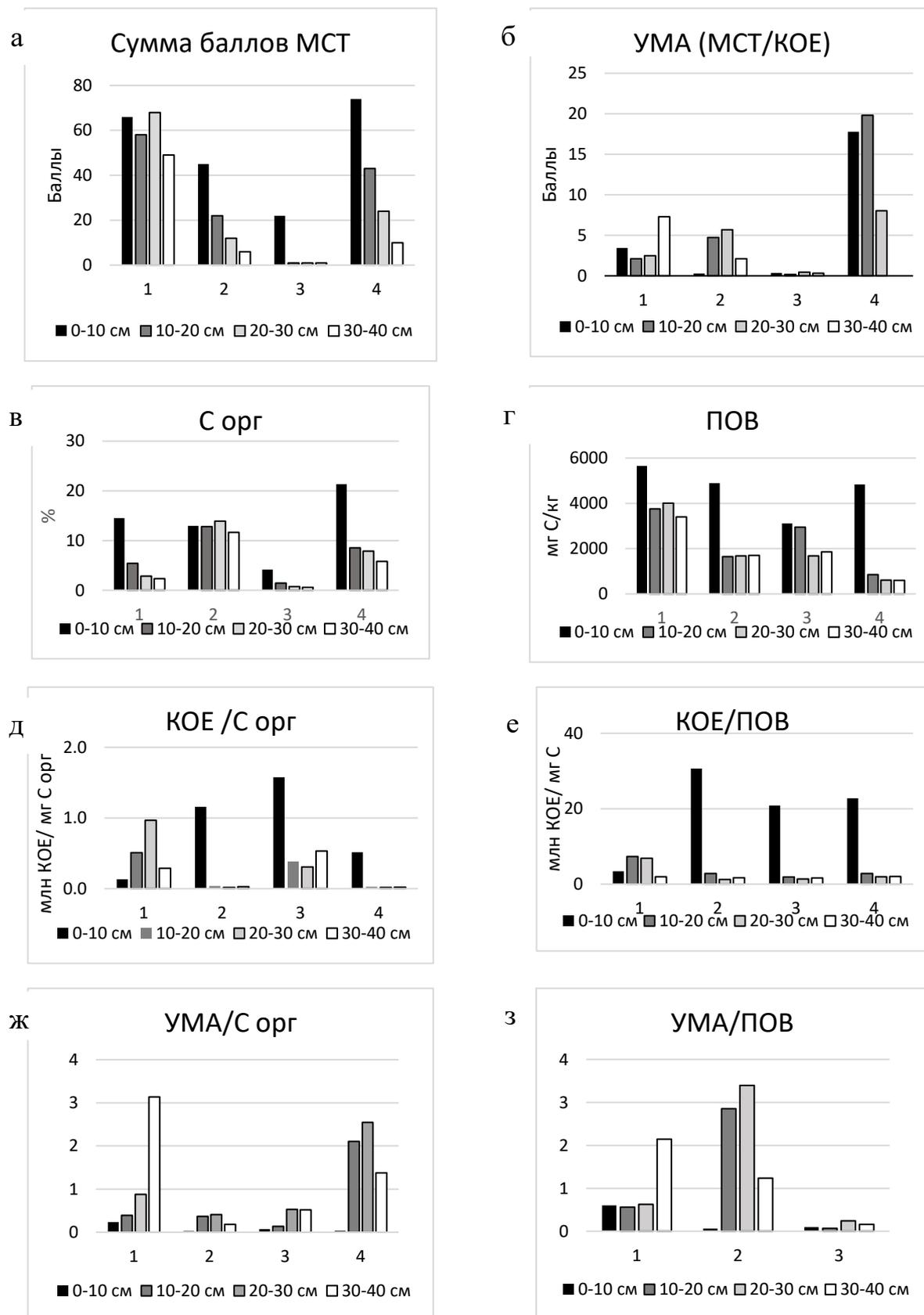


Рисунок 7. Число колониеобразующих единиц (КОЕ) и их активность, соответствующие единице органического вещества почвы. Обозначения: 1 – почва мерзлотная торфяная низинная (болото), 2 – мерзлотная аллювиальная дерновая (луг), 3 – мерзлотная каштановая (остепенённый луг), 4 – мерзлотный подбур (лес). УМА – удельная метаболическая активность: сумма баллов МСТ/число КОЕ, млн. МСТ – мультисубстратное тестирование. ПОВ – подвижное органическое вещество.

Следующей самостоятельной характеристикой биологической активности почвы является ферментативная активность, которая отражает, в том числе, вклад корневой системы высших растений в почвообразовательный процесс. По нашим результатам, величина показателя видимо определялась мощностью слоя распространения корневой системы растений и преимущественно ограничивалась слоем 0–10 см (табл. 5). В луговой почве показатель достигал наибольших значений. При этом при переходе в более нижний слой снижался в более чем в 500 раз.

Таблица 5

Уреазная активность исследуемых почв, мг N-NH₄/г за 18 ч

Слой, см	Позиция катены, фитоценоз			
	Нижняя, заболоченный луг	Средняя, настоящий луг	Средняя, остепненный луг	Верхняя, лес
0–10	15,6 ± 0,9	227 ± 38	6,6 ± 0,25	41,8 ± 3,9
10–20	2,5 ± 0,3	0,4 ± 0,2	0,6 ± 0,2	2 ± 0,2
20–30	0	0	0	0,5 ± 0,1
30–40	0	0,4 ± 0,2	0	0,2 ± 0,1

Для сравнения приводим соответствующие данные для аласных почв, из которых видно, что верхний 0–10 см почв из Оймьякона более активен, чем у аласных почв. При этом различия между слоями 0–10 и 10–20 см в последних более сглажены (табл. 6).

Таблица 6

Уреазная активность почв аласной катены (Лено-Амгинское междуречье) (Данилова и др., 2017)

Слой, см	Гидротермический пояс аласа, фитоценоз			Межаласье, лес
	Нижний, заболоченный луг	Средний, настоящий луг	Верхний, остепненный луг	
0–10	23 ± 1	25 ± 1	15 ± 2	10 ± 2,5
10–20	1 ± 1	9 ± 1	7 ± 1	25 ± 1
20–30	4 ± 1	10 ± 1	0	10 ± 1
30–40	1 ± 1	5 ± 1	0	2 ± 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены новые сведения о свойствах малоизученных почв северо-востока Евразии. Общая картина распределения показателей биологической активности почв в исследуемой катене вполне соответствует известным закономерностям, обнаруженным в катенах других регионов. Основная отличительная черта изученных почв заключается в крайней укороченности микробиологического профиля: все основные микробиологические процессы локализованы в пределах слоя 0–10 см.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья посвящается светлой памяти нашего учителя, выдающегося исследователя мерзлотных почв профессора Дмитрия Дмитриевича Саввина.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 5.3638.2011 и проекта РФ FSRG-2020-0018).

ЛИТЕРАТУРА

Бронникова М.А., Герасимова М.И., Конопляникова Ю.В., Гуркова Е.А., Черноусенко Г.И., Голубцов В.А., Ефимов О. Е. Кривоаридные почвы как генетический тип в классификации почв России: география, морфология, диагностика // Почвоведение. 2022. № 3. С. 263–280. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22030030>.

Винокуров А.А. Антропогенное воздействие на почвы пастбищ Оймьяконского нагорья северо-востока Якутии. Диссертация ... канд. биол. наук. Якутск, 2012. 124 с.

Волковинцер В.И. Степные кривоаридные почвы. Новосибирск: Наука, 1978. 207 с.

Горленко М.В., Кожевин П.А. Мультистратное тестирование природных микробных сообществ. Москва: Макс Пресс, 2005. 288 с.

Данилова А.А., Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Петров А.А. Способ оценки устойчивости сапротрофного микробного сообщества почвы методом мультисубстратного теста // Патент № 2678876. 2019. Бюл. № 2.

Данилова А.А., Петров А.А. Изучение техногенно нарушенных почв Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022а. Том 27. № 4. С. 547–560. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>.

Данилова А.А., Петров А.А. Опыт визуализации почвенно-микробиологических процессов в световом микроскопе. Сообщение 2. Наблюдение за участием грибов в образовании нового органического вещества почвы // Почвы и окружающая среда. 2022б. Том 5. № 3. е185. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.185>.

Данилова А.А., Саввинов Г.Н., Гаврильева Л.Д., Данилов П.П., Ксенофонтова М.И., Петров А.А. Кратковременная изоляция деградированного пастбища в криолитозоне: почвенно-микробиологические аспекты // Аридные экосистемы. 2017. Том 23. № 3 (72). С. 66–74.

Еловская Е.Г. Классификация и диагностика мерзлотных почв Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 172 с.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. Москва: Колос, 1977. 224 с.

Методы почвенной микробиологии и биохимии. Москва: МГУ, 1980. 200 с.

Макаров В.С., Саввинов Г.Н., Гололобова А.Г. Температурный режим мерзлотных почв Куйдусунской впадины Оймяконского нагорья // Проблемы региональной экологии. 2022. № 5. С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-71-77>.

Мишустин Е.Н. Ассоциации почвенных микроорганизмов. Москва: Наука, 1975. 106 с.

Оконешникова М.В., Иванова А.З., Десяткин Р.В., Николин Е.Г. Почвы высотных поясов хребта Сунтар-Хаята: морфология, свойства, классификация // Почвоведение. 2021. № 5. С. 558–567 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050142>.

Скрябин С.З., Коновровский А.К. Растительность и почвы степей среднего течения Индигирки // Ботанические материалы по Якутии. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1975. С. 38–47.

Щелчкова М.В., Давыдов С.П., Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдова А.И., Боескоров Г.Г., Соломонов Н.Г. Первые данные о биологической активности таежно-степных почв низовьев Колымы // Доклады академии наук. 2017. Том 477. № 1. С. 118–122. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217310255>.

Banning N.C., Lalor B.M., Cookson W.R., Grigg A.H., Murphy D.V. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and postmining rehabilitation forest: Which substrates discriminate? // Applied Soil Ecology. 2012. Vol. 56. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.009>.

Kaneda S., Křišťufek V., Baldrian P., Malý S., Frouz J. Changes in functional response of soil microbial community along chronosequence of spontaneous succession on post mining forest sites evaluated by Biolog and SIR methods // Forests. 2019. Vol. 10. No. 11. P. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10111005>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Поступила в редакцию 12.01.2024

Принята 26.02.2024

Опубликована 07.03.2024

Сведения об авторах:

Данилова Альбина Афанасьевна – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории плодородия почв СФНЦА РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская область, Россия); Danilova7alb@yandex.ru

Данилов Петр Петрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ им. М.К. Аммосова (Якутск, Россия); DanPP@mail.ru

Макаров Виктор Семенович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ им. М.К. Аммосова; старший научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, Россия); mvs379@yandex.ru

Винокуров Андрей Андреевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ им. М.К. Аммосова (Якутск, Россия); andvin80@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Some biological properties of the Kuidusun depression soils of Oymyakon

© 2024 A. A. Danilova ¹, P. P. Danilov ², V. S. Makarov ^{2,3}, A. A. Vinokurov ²

¹*Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russia.
E-mail: Danilova7alb@yandex.ru*

²*D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia. E-mail: DanPP@mail.ru*

³*P.I. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia.
E-mail: mvs379@yandex.ru*

The aim of the study. To investigate some microbiological properties of the catenal series of soils in the Kuidusun depression of the Oymyakon Highlands.

Location and time of the study. The study area is located in the vicinity of the Tomtor village (N63°15'41.94"; E143°10'26.91") of the Oymyakonsky district of the Republic of Sakha (Yakutia, Russia). Soil samples were collected in the fall of 2011 at the main positions of the catena. The length of the catena is 38 km, the altitude a.s.l. is 727–821m. Soils are classified as Cambic Cryosols (fragic, murshic), (forest); Skeletic Cryosols (aridic), (steppe meadow), Cambic Cryosols (fluvic), (typical meadow); Follic Cryosols (swampy meadow).

Methods. The content of labile soil organic matter (LOC) was determined photocalorimetrically in soil extracts with phosphate buffer (1/15 M, pH 6,8). The number of colony-forming units (CFU) was determined using standard MPA, KAA, and Czapek media. The functional spectrum of the soil microbiota was assessed using the community level physiological profile (CLPP) method. All properties were studied in 10 cm thick layers to a depth of 40 cm. Soil urease activity was assessed by ammonium production from urea.

Results. At the time of sampling moisture content of soil samples down the catena increased from 5 to 20%, whereas the LOC content increased from 2 to 6 g C/kg. In the 0–10 cm layer, the greatest accumulation of LOC was observed in the soil under a typical meadow. The highest number of CFU (150 million/g soil) in a dilute MPA medium was also found there. An increase in the proportion of CFU in the dormant state was revealed in the soil series from the lower position of the catena to the upper one. In the same series, an increase in the oligotrophic index of the community was noted. The highest metabolic activity was observed in the soil under a swampy meadow, whereas the lowest was shown by the soil under a forest. The enrichment of soil organic matter with microbiota cells increased in the series of soils *f* in the following order: a swampy meadow – a typical meadow – a steppe meadow, whereas the specific activity of the microbiota decreased. Urease activity of the soil was detected mainly in the 0–10 cm layer; in the underlying layers the activity was more than 500 times lower.

Conclusions. The biological properties of the studied soils corresponded to the known patterns established for the catenal series of soils in other soil and climatic conditions. The peculiarity of the studied soils was related to the extremely sharp differentiation of the microbiological profile. The absolute predominance of actinomycetes CFU in the soil under the steppe meadow was the major characteristic feature of the culturable part of the soil microbial community.

Keywords: Oymyakon; catenal soil series; labile organic carbon; CFU; enzymatic activity; CLPP.

How to cite: Danilova A.A., Danilov P.P., Makarov V.S., Vinokurov A.A. Some biological properties of the Kuidusun depression soils of Oymyakon. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(1). e245 (in Russian with English abstract). DOI: [10.31251/pos.v7i1.245](https://doi.org/10.31251/pos.v7i1.245)

ACKNOWLEDGEMENT

The article is written in memory of our teacher Dmitry Dmitrievich Savvinov, a prominent researcher of permafrost soils.

FINANCIAL SUPPORT

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects No. 5.3638.2011 and ПФ FSRG-2020-0018).

REFERENCES

- Bronnikova M.A., Gerasimova M.I., Konopliyanikova Yu.V., Gurkova E.A., Chernousenko G.I., Golubtsov V.A., Ephimov O.E. Cryoaridic Soils as a Genetic Type in Soil Classification System of Russia: Geography, Morphology, Diagnostics. *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 3. P. 283–298. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229322030036>.
- Vinokurov A.A. Anthropogenic impact on the soils of pastures of the Oymyakon Highlands in northeastern Yakutia. Dissertation ... Cand. of Biol. Sci. Yakutsk, 2012. 124 p. (in Russian).
- Volkovincer V.I. Steppe cryoarid soils. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 207 p. (in Russian).
- Gorlenko M.V., Kozhevnikov P.A. Multisubstrate testing of natural microbial communities. Moscow: Maks Press, 2005. 288 p. (in Russian).
- Danilova A.A., Legostaeva Ya.B., Sivtseva N.E., Petrov A.A. A method for assessing the stability of the saprotrophic microbial community of soil using the multisubstrate test method. Patent No. 2678876. 2019. Bull. No. 2. (in Russian).
- Danilova A.A., Petrov A.A. Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022a. Vol. 27. No. 4. P. 547–560. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>. (in Russian).
- Danilova A.A., Petrov A.A. Visualization of soil microbiological processes using a light microscope. Part 2. Observing the fungi participation in the formation of new soil organic matter. *The Journal of Soils and Environment*. 2022b. Vol. 5. No. 3. e185. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i3.185>. (in Russian).
- Danilova A.A., Savvinov G.N., Gavril'eva L.D., Danilov P.P., Ksenofontova M.I., Petrov A.A. Short-term exclusion of degraded pasture in the permafrost zone: aspects of soil microbial community. *Arid Ecosystems*. 2017. Vol. 7. No 3. P. 184–190. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079096117030039>.
- Elovskaya E.G. Classification and diagnostics of permafrost soils in Yakutia. Yakutsk: YaF SB AN USSR, 1987. 172 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Frieve. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian).
- Makarov V.S., Savvinov G.N., Gololobova A.G. Temperature regime of the frozen soils of the Kuidusun depression of the Oymyakon highland. *Regional environmental issues*. 2022. No. 5. P. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-5-71-77>. (in Russian).
- Methods of soil microbiology and biochemistry. Moscow: MSU, 1980. 200 p. (in Russian).
- Mishustin E.N. Associations of soil microorganisms. Moscow: Nauka Publ., 1975. 106 p. (in Russian).
- Okoneshnicova M.V., Ivanova A.Z., Desyatkin R.V., Nikolin E.G. Soils of High-Altitude Belts of the Suntar-Khayata Ridge: Morphology, Properties, Classification. *Eurasian Soil Science* 2021. Vol. 54. No. 5. P. 680–688. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321050148>.
- Skryabin S.Z., Konorovsky A.K. Vegetation and soils of the steppes of the middle reaches of the Indigirka. Botanical materials for Yakutia. Yakutsk: Publishing house YaF SB AN USSR, 1975. P. 38–47. (in Russian).
- Schelchkova M.V., Solomonov N.G., Davydov S.P., Davydova A.I., Fyodorov-Davydov D.G., Boeskorov G.G. Initial data on biological activity of taiga-steppe soils in the lower reaches of the Kolyma River. *Doklady Biological Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 1. P. 214–218. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217310255>.
- Banning N.C., Lalor B.M., Cookson W.R., Grigg A.H., Murphy D.V. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and postmining rehabilitation forest: Which substrates discriminate? *Applied Soil Ecology*. 2012. Vol. 56. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.009>.
- Kaneda S., Křišťufek V., Baldrian P., Malý S., Frouz J. Changes in functional response of soil microbial community along chronosequence of spontaneous succession on post mining forest sites evaluated by Biolog and SIR methods. *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 11. P. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10111005>.

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.

Received 12 January 2024
Accepted 26 February 2024
Published 07 March 2024

About the authors:

Albina A. Danilova – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher in the Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russia); Danilova7alb@yandex.ru

Petr P. Danilov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); DanPP@mail.ru

Viktor S. Makarov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russia); mvs379@yandex.ru

Andrey A. Vinokurov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the D.D. Savvinov Research Institute of Applied Ecology of the North, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University (Yakutsk, Russia); andvin80@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



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