

УДК 631.46:631.445.152(571.54+.55)

МИКРОБИОЦЕНОЗ ПОЧВ КРИОМОРФОЗОВ ЮГА ВИТИМСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ¹

© 2023 г. Э. О. Чимитдоржиева^{1,*}, Ц. Д-Ц. Корсунова¹, Г. Д. Чимитдоржиева¹¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

*E-mail: erzhenach@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Исследованы микробные сообщества в почвах криоморфозов юга Витимского плоскогорья. Объектами исследования послужили черноземы глеевые криотурбированные и гумусово-квазиглеевые окарбоначенные почвы. В ходе исследования выбраны экспериментальные площадки с ярко выраженными криогенными явлениями. Определяли интенсивность микробиологической деятельности по содержанию углерода микробной биомассы, численности микроорганизмов в доминирующих группах микробных сообществ. Определение численности микроорганизмов в почвах проводили методом прямого микроскопирования, который дает возможность проводить более точный подсчет бактерий в почве с учетом адсорбированных клеток. Предварительно десорбировали клетки на ультразвуковом диспергаторе. Углерод микробной биомассы определяли регидратационным методом. Получены данные, характеризующие направленность и интенсивность микробиологических процессов в горизонтах профилей почв бугров пучений и термокарстовых понижений. Представлены численность микроорганизмов и доминирующие группы бактериальных сообществ почв, сформированных в условиях ультраконтинентального климата Бурятии и относительно близко залегающих многолетнемерзлых пород. Выявлено, что в почвах бугров пучения и термокарстовых понижений преобладала бактериальная микрофлора. Внутрипрофильная неоднородность в распределении почвенных микроорганизмов свидетельствовала о том, что как среда обитания почва сильно дифференцирована во всех направлениях. Отражением этой дифференциации по вертикали бугра пучения и термокарстового понижения явилась концепция о почвенных горизонтах как особых экологических нишах и возможности использования микробиологической индикации явлений, происходящих во время пучений и просадок.

Ключевые слова: криоморфозы, термокарстовые понижения, бугры пучения, углерод микробной биомассы, актиномицеты, грибы, бактерии, черноземы глеевые криотурбированные, гумусово-квазиглеевые окарбоначенные почвы, черноземы квазиглеевые.

DOI: 10.31857/S0002188123060078, EDN: QOWHHW

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия одним из ключевых факторов функционирования криогенных экосистем стало глобальное потепление [1–4], в частности, наблюдается увеличение толщины деятельного слоя, повышение температуры и сокращение распространения и слитности мерзлых толщ [5], активизация термокарста в некоторых регионах [6]. Таяние содержащегося в грунте льда сопровождается изменениями дневной поверхности и развитием опасных мерзлотных процес-

сов: пучений и просадок, что приводит к изменениям свойств почв. Усиление пространственной неоднородности накладывает отпечаток на количественный и качественный состав микробиоты.

На мерзлотной территории южной части Витимского плоскогорья широко распространен бугристо-западинный микрорельеф, начало его формирования относят к сартанскому времени [7]. При потеплении климата многолетняя мерзлота стала деградировать, возникли псевдоморфозы, преобразованные затем в понижения, которые долгое время были заполнены водой. На других полигонах в результате выпирания грунта и обрушения их бортов возникли бугры пучения. В работе [8] считали, что бугры пучения

¹ Экспедиционные исследования выполнены за счет средств бюджета по теме госзадания № 121030100228-4, аналитические работы выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-04-01297.

являются элементами термокарстовых форм рельефа, и их образование связано с промерзанием влагонасыщенных талых слоев под исчезающими озерами. Термин “криоморфозы” [9, 10] объединяет различные экзогенные проявления криогенеза: трещиноватость, просадки, пучения, высыхания карстовых озер и др.

Экстремальные природные условия криогенных экосистем определяют своеобразный состав и структуру микробиоценоза, усиливают уязвимость микробиоты, одновременно способствуя их приспособляемости к изменениям условий. Микробная биомасса, ее активность и разнообразие микробного сообщества является индикатором изменения почвенной среды [11, 12]. Биологические процессы в них проходят в короткий вегетационный период на фоне многолетней мерзлоты. Криогенный характер почв накладывает отпечаток на структуру микробных комплексов, определяет их динамику и активность, обуславливая тем самым специфику процесса трансформации веществ.

Цель работы – исследование микробного сообщества в почвах бугров пучения и термокарстовых понижений юга Витимского плоскогорья. Значимость исследования состоит в получении новых данных о микробиоценозе криогенных форм рельефа, что позволит выявить направленность и интенсивность микробиологических процессов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования расположен в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья, где многолетняя мерзлота достигает максимальной мощности 120–130 м, в среднем составляя 80–85 м. Верхняя граница мерзлоты залегает на глубине 1.5–3.0 м от дневной поверхности, местами – на глубине <1 м.

Климат Еравнинской котловины резко континентальный. Холодная, малоснежная и продолжительная зима сменяется поздней ветреной и засушливой весной. Лето жаркое, короткое. По данным Сосново-Озерской метеостанции, расположенной в районе исследования, среднегодовая температура воздуха составляет -4.1°C при средней температуре наиболее теплого месяца (июль) 17.1°C и самого холодного (январь) – -25.4°C . Сумма биологически активных температур составляет 1330°C .

Растительный покров района исследования разнообразен. Формируются злаково- и разнотравно-пижмовые, вострцовые и вострцово-ковыльные сообщества. В более увлажненных

экоотопах появляются овсяницы, тонконог стройный, ковыль-волосатик. Учет надземной, подземной и общей фитомассы показал, что биопродуктивность травостоя бугров пучения составляет 2.08 кг/м^2 и находится наравне с фоновым вариантом – 2.05 , но значительно меньше по сравнению с таковых понижений – 2.50 кг/м^2 [13, 14]. Почвообразующие породы: делювиально-карбонатные суглинистые отложения, слоистые озерные отложения.

Объектами исследования были почвы бугров пучения и термокарстовых понижений. Работа выполнена в 2018–2019 гг. В ходе исследования выбраны экспериментальные площадки с ярко выраженными криогенными явлениями. Были заложены разрезы на почвах бугров пучения ($n = 3$) и термокарстовых понижений ($n = 3$). Разрезы закладывали на всю мощность сезонно-талого слоя (СТС), пробы отобрали с шагом 10 см с термокарстовых понижений до глубины 80 см и бугров пучения – до 100 см. Мощность СТС на 2008 г., по данным А.И. Куликова для фоновых черноземов квазиглеевых, составляла 285 см [15]. Данные состояния микробиоценоза приводим до 50 см.

Интенсивность микробиологической деятельности определена по содержанию углерода микробной биомассы (при $n = 3$), численности микроорганизмов и по доминирующим группам микробных сообществ (при $n = 3$). Численность микроорганизмов в почвах определена методом прямого микроскопирования, что дало возможность произвести подсчет бактерий в почве с учетом адсорбированных клеток. Предварительно десорбировали клетки на ультразвуковом диспергаторе УЗДН-1. При количественном учете клеток почвенных бактерий и мицелия актиномицетов препараты окрашивали водным раствором акридина оранжевого, а для окраски мицелия и спор грибов применяли калькофлуор белый. Работа выполнена в лаборатории биохимии почв ИОЭБ СО РАН на люминесцентном микроскопе “Микромед 3 ЛЮМ”, углерод микробной биомассы определен регидратационным методом.

Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена в среде электронной таблицы Microsoft Excel 2010 пакета Microsoft Office.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для фоновых черноземов квазиглеевых характерны: небольшая мощность гумусово-аккумулятивного горизонта, среднесуглинистый гранулометрический состав. Содержание углерода $C_{\text{орг}}$ в верхнем горизонте было средним (рис. 1). Сумма поглощенных оснований в верхнем гумусовом

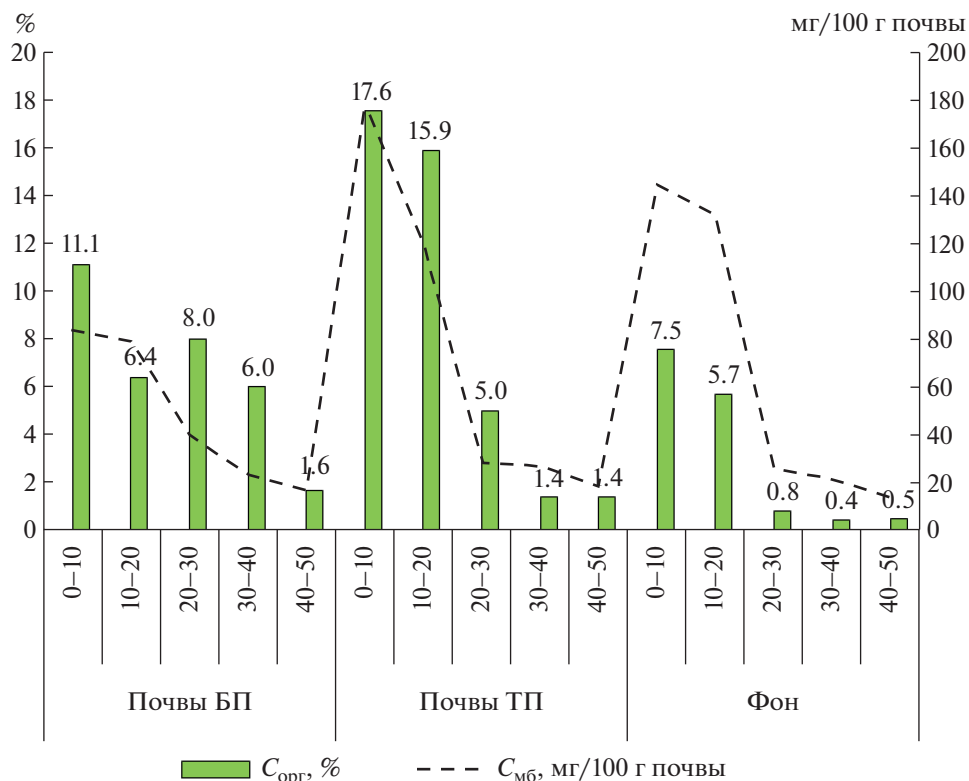


Рис. 1. Содержание углерода органического и углерода микробной биомассы в почвах бугров пучений (БП) и термокарстовых понижений (ТП) ($n = 3$).

горизонте – высокая. Реакция среды в верхней части профиля – слабокислая (рН 6.52) и близкая к нейтральной (рН 7.15), в нижней – щелочная (рН до 8.36).

Исследованные черноземы глееватые криотурбированные и гумусово-квизиглеевые окарбоначенные почвы по морфологическим признакам отличались от фоновых почв. Реакция среды почв термокарстовых понижений – щелочная (рН 8.02–8.40), бугров пучения – слабощелочная (рН 7.71–7.81). По гранулометрическому составу исследованные почвы бугров пучения относятся к супесчаным и легкосуглинистым, термокарстовых понижений – легкосуглинистым в 0–30 слое, среднесуглинистым – в слое 30–50 см. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в черноземах глееватых криотурбированных составило 11.1 в слое 0–10 см, 6.38% – в 10–20 см слое. В гумусово-квизиглеевых окарбоначенных почвах отмечено высокое содержание $C_{орг}$ в слое 0–10 см – 17,6%, в слое 10–210 см – 15.9% ($n = 3$). Подробная характеристика разрезов описана в работе [16].

Углерод микробной биомассы ($C_{мб}$). В черноземе глееватом криотурбированном среднее содержание $C_{мб}$ в верхнем слое почвы составило $83.7 \pm$

± 9.3 мг/100 г почвы ($V = 11.1\%$). Максимальное количество углерода микробной массы обнаружено в гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве на глубине 0–10 см – 178 ± 32 мг/100 г почвы, что объясняется обилием ризосферной микрофлоры и высоким содержанием $C_{орг}$. В фоновых черноземах квизиглеевых среднее содержание $C_{мб}$ в верхнем слое почвы было равно 144 ± 25 ($V = 17.6\%$). Профильное распределение $C_{мб}$ было неравномерным, с глубиной выражена тенденция к снижению содержания углерода биомассы.

Накопление $C_{мб}$ в черноземе глееватом криотурбированном было меньше, несмотря на то, что в них больше углерода, чем в фоновых черноземах квизиглеевых. Предположительно, что этот углерод был представлен большей частью труднодоступной для микробиоты формой.

Расчет коэффициентов вариации показал, что совокупность данных однородна, т.е. значима. Данные содержания углерода микробной биомассы имели сильную корреляционную связь с данными содержания органического углерода ($r = 0.73–0.99$).

Структура микробиоценоза в почвах. В черноземе глееватом криотурбированном и гумусово-

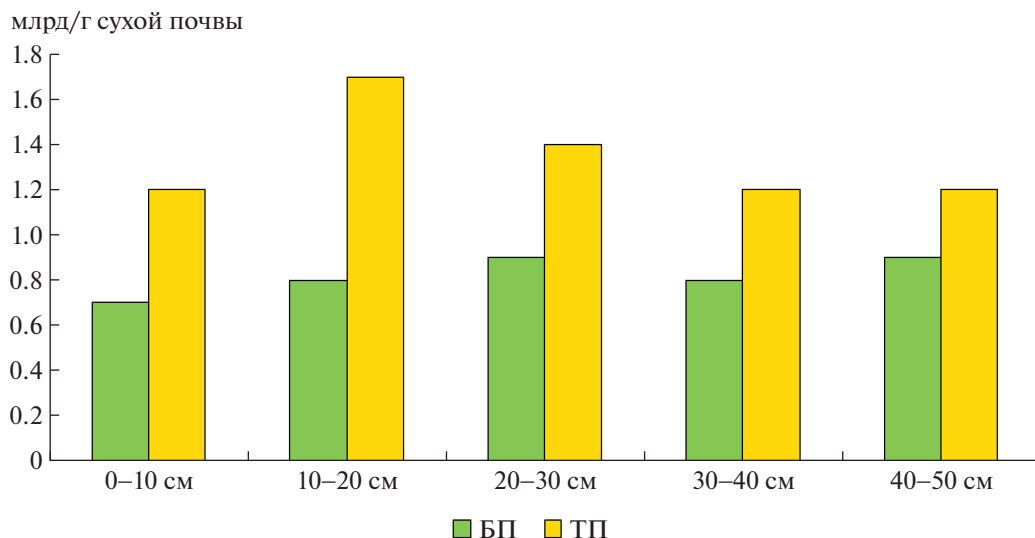


Рис. 2. Численность бактерий в почвах бугров пучений и термокарстовых понижений: БП – чернозем глееватый криотурбированный ($n = 3$), ТП – гумусово-квизиглеевая окарбоначенная почва ($n = 3$). То же на рис. 3, 4.

квизиглеевой окарбоначенной почве неравномерное распределение биогенных элементов (С, Н, О, N) и органического вещества обусловило изменение количества бактерий в профилях (рис. 2). Если же в природных условиях в почвах микроорганизмы бывают приурочены, как правило, к верхним гумусированным и хорошо прогреваемым горизонтам, то в черноземе глееватом криотурбированном в слое 0–10 см они присутствовали в основном в низких количествах. Это объяснимо тем, что этот слой почвы быстро подвергается высыханию, а в периоды значительного иссушения почвы активная деятельность микроорганизмов в ней практически прекращается. В гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве численность бактерий достигала почти 1.5 млрд/г сухой почвы.

Характерной особенностью микробного населения исследованных почв является его отчетливая внутривертикальная дифференциация. Богатство почвы органическим веществом существенно влияет на состав и глубину распространения почвенной микрофлоры. Распределение по профилю численности бактерий имело разный характер. В гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве максимум приходился на слой 10–20 см почвы, тогда как в черноземе глееватом криотурбированном показатель увеличивался вниз по профилю. Следует отметить, что полученные данные коррелируют с данными содержания $C_{орг}$ ($r = 0.60–0.90$).

Количество бактерий было больше в увлажненной и богатой питательными веществами гу-

мусово-квизиглеевой окарбоначенной почве. В последней почве к нижней части профиля показатель снижался, что объясняется тем, что по мере углубления в почву уменьшалось содержание органических веществ, а также кислорода, необходимого для жизнедеятельности аэробных бактерий. В черноземе глееватом криотурбированном низкая численность бактерий объяснялась тем, что верхний слой почвы быстро подвергался высыханию, а в периоды значительного иссушения почвы активная деятельность микроорганизмов в ней практически прекращалась.

В почве, как в гетерогенной микроразнообразной системе, были распространены мицелиальные формы (грибы и актиномицеты), которые благодаря верхушечному росту преодолевают неблагоприятные микроразнообразия и лучше осваивают пространство [17]. Актиномицеты эволюционно имеют более богатый ферментативный аппарат, обладают высоким уровнем приспособления и встречаются в различных типах почв. Некоторые их виды являются аэробами, а часть актиномицетов относится к анаэробам. Количество актиномицетов, характеризующих глубину процессов минерализации органического вещества, в черноземе глееватом криотурбированном было равно 0.004 м/г сухой почвы, в слое 40–50 см этот показатель уменьшился до 0.002 м/г сухой почвы (рис. 3). В гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве показатель достигал 0.014 м/г сухой почвы. Корреляционная связь между длиной мицелия актиномицетов и содержанием $C_{орг}$ составила $r = 0.51–0.52$.

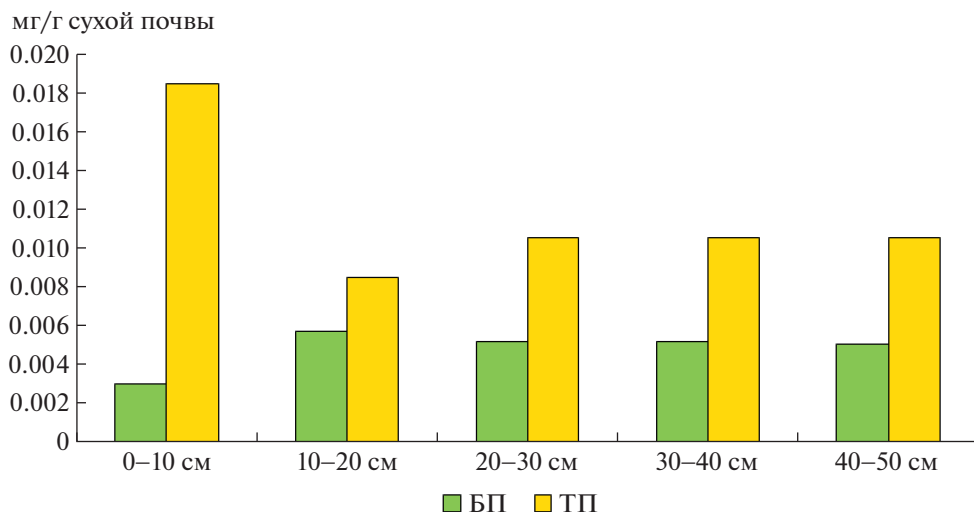


Рис. 3. Мицелий актиномицетов в почвах бугров пучений и термокарстовых понижений.

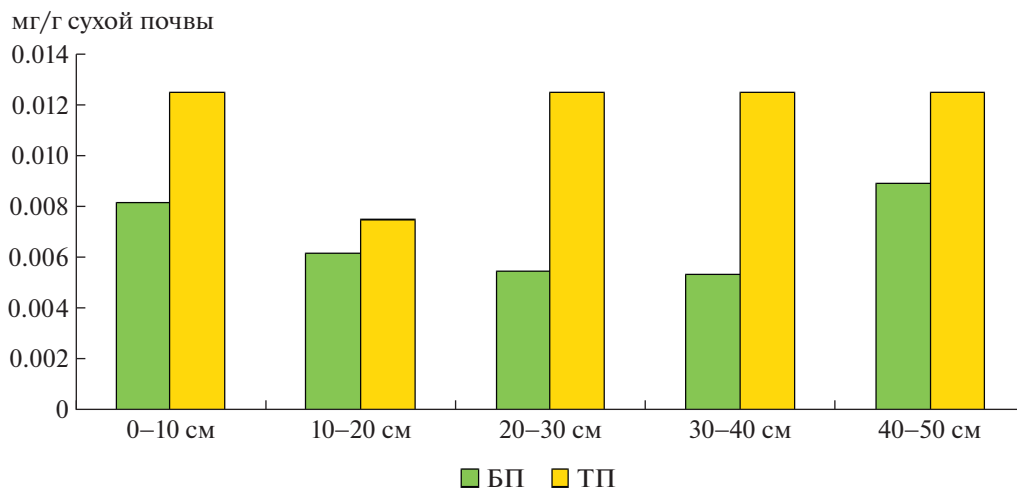


Рис. 4. Мицелий грибов в почвах бугров пучений и термокарстовых понижений.

Различное внутрипрофильное распределение мицелия актиномицетов объясняется тем, что актиномицеты разлагают многие вещества и являются более активными при высоких показателях рН, а также тем, что карбонатсодержащие горизонты являются одним из характерных местообитаний актиномицетов [18]. Поскольку они принимают активное участие в процессах минерализации, наибольшее их количество встречается в почвах, богатых растительными остатками [14], в нашем случае – в гумусово-квасиглеевой окарбонированной почве термокарстовых понижений.

Известно, что почвы содержат очень большой запас спор грибов, преимущественно находящихся в состоянии покоя. Мицелий грибов был обнаружен по всей глубине исследованного профиля

черноземов глееватых криотурбированных в количестве 0.008–0.012 м/г почвы (рис. 4) с биомассой мицелия $0.12–0.35 \times 10^{-6}$ г/г почвы. В гумусово-квасиглеевой окарбонированной почве этот показатель был равен 0.006–0.01 м/г почвы.

Распределение грибной микрофлоры по профилю почв имело общую тенденцию к уменьшению в слоях 10–20 и 20–30 см с дальнейшим увеличением показателя. Максимальное содержание грибов обнаружено в слое 40–50 см в черноземах глееватых криотурбированных.

Для грибов также было характерно очень широкое варьирование численности, но уже в почвах бугров. Это связано с тем, что при низкой величине рН более активными в деградации органических соединений являются грибы. В черноземах

глеватых квазиглеевых показатель рН был ниже, чем в гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почвах. Резкое увеличение количества грибов в нижней части профиля, возможно, было связано с высокой устойчивостью грибов и особенностями водного режима почв. В нижних слоях почвы, даже когда бактерии погибают, грибы выживают и продолжают деструкцию растительной органики. В периоды временного избыточного увлажнения в почвах термокарстовых понижений развитие грибов может быть до некоторой степени подавлено.

Поэтому более оптимальные условия для жизнедеятельности микроорганизмов создаются в гумусово-квазиглеевой окарбоначенной почве, что связано с лучшими условиями увлажнения и содержания питательных веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изученные почвы отличались содержанием микробной биомассы, соотношением разных групп микроорганизмов (грибов, бактерий и актиномицетов) и их распределением. В ходе исследования достоверно определено, что микробиологическая активность гумусово-квазиглеевой окарбоначенной почвы была выше, чем чернозема глееватого криотурбированного. Невысокий уровень энергетического обеспечения, глубокое промерзание почвенного профиля и значительное их иссушение в весенне-летний период отразились на почвенной биоте почв бугров пучений.

В исследованных почвах преобладала бактериальная микрофлора. Распределение мицелия актиномицетов и мицелия грибов было неравномерным по профилю почв. Внутрипрофильная неоднородность в распределении почвенных микроорганизмов свидетельствовала о том, что почва как среда обитания сильно дифференцирована по профилю. Отмечена корреляционная связь микробиологических показателей с содержанием $C_{орг}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kislov A.V., Surkova G.V.* Climatology: textbook. 4th edit. M.: INFRA-M, 2020. P. 324.
2. *Ataev Z.V.* Climate change alleviation for sustainable progression global warming or global cooling: Challenges and future prospects. 2022. P. 13–32.
3. *Атаев З.В., Братков В.В.* Региональные ландшафтные особенности создания карбонового полигона в Республике Дагестан // Изв. Дагестан. ГПУ. Естеств. и точные науки. 2022. Т. 16. № 1. С. 25–36.
4. The Second assessment report on climate change and their impact on the territory of the Russian Federation 2014 // Climate Change. M.: Roshydromet, V. 1. P. 61.
5. *Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A.* Thermal state of permafrost in Russia permafrost and periglacial processes. 2010. V. 21. № 2. P. 136–155. DOI:org/https://doi.org/10.1002/ppp.683
6. *Grosse G., Harden J., Turetsky M., McGuire A.D., Camill Ph., Tarnocai Ch., Froking S., Schuur E. A.-G., Jorgenson T., Marchenko S., Romanovsky V., Wickland K.P., French N., Waldrop M., Chavez L., Strieg R.G.* Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance // J. Geophys. 2011. V. 116. G00K06. https://doi.org/10.1029/2010JG001507
7. *Козлова А.А., Кузьмин В.А., Заговская Э.П.* Почвы палеокриогенных бугристо-западных ландшафтов Южного Предбайкалья // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1181–1192.
8. *Десяткин Р.В.* Почвообразование в термокарстовых котловинах-аласах криолитозоны. Новосибирск: Наука, 2008. С. 324.
9. *Соколов И.А., Чигир В.Г., Алифанов В.М., Худяков О.И., Гугалинская Л.А., Фоминых Л.А., Гиличинский Д.А., Максимович С.В.* Понятия, терминология и классификационные вопросы изучения промерзающих почв // Почвоведение. 1980. № 2. С. 118–125.
10. *Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н.* Современные криоморфозы в ландшафтах южной тайги Западной Сибири // Географ. и природн. ресурсы. 2007. № 1. С. 96–100.
11. *Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., Васнев В.И.* Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
12. *Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудряков В.Н.* Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
13. *Чимитдоржиева Г.Д., Чимитдоржиева Э.О., Мильхеев Е.Ю., Цыбенков Ю.Б., Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Егорова Р.А., Солдатова З.А., Андреева Д.Б., Корсунова Ц.Д.Ц., Давыдова Т.В.* Почвы криогенных форм рельефа на юге Витимского плоскогорья: распространение и роль в распределении пулов почвенного углерода // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1029–1038.
14. *Чимитдоржиева Г.Д., Цыбенков Ю.Б., Чимитдоржиева Э.О., Мильхеев Е.Ю., Чимитдоржиев Т.Н.* Влияние криогенеза на биоту почв (на примере

- юга Витимского плоскогорья) // Сибир. экол. журн. 2020. Т. 27. № 1. С. 3–12.
15. Куликов А.И., Куликов М.А., Смирнова И.И. О глубине протаивания почв при изменениях климата // Вестн. Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова. 2009. Т. 1 (14). С. 121–126.
16. Chimitdorzhieva G.D., Chimitdorzhieva E.O., Milkheev E.Y., Tsybenov Y.B., Egorova R.A., Soldatova Z.A., Andreeva D.B., Korsunova T.D-T., Davydova T.V., Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N. Soils of cryogenic landforms in the south of the Vitim plateau: distribution and role in the allocation of soil carbon pools // Euras. Soil Sci. 2019. V. 52. № 9. P. 1019–1027.
17. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. С. 304.
18. Паников Н.С. Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве // Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.

Microbiocenosis of Cryofrost Soils in the South of the Vitim Plateau

E. O. Chimitdorzhieva^{a,#}, Ts. D-Ts. Korsunova^a, and G. D. Chimitdorzhieva^a

^a*Institute of General and Experimental Biology SB RAS
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

[#]*E-mail: erzhen_ch@mail.ru*

The microbial communities in soils of cryomorphoses in the south of the Vitim Plateau have been studied. The objects of study were gley cryoturbated chernozems and humus-quasi-gley carbonated soils. In the course of the study, experimental sites with pronounced cryogenic phenomena were selected. The intensity of microbiological activity was determined by the carbon content of microbial biomass, the number of microorganisms in the dominant groups of microbial communities. Determination of the number of microorganisms in soils was carried out by direct microscopy, which makes it possible to carry out a more accurate count of bacteria in the soil, taking into account adsorbed cells. Cells were preliminarily desorbed on an ultrasonic disperser. The carbon of microbial biomass was determined by the rehydration method. Data were obtained characterizing the direction and intensity of microbiological processes along the horizons of soil profiles of heaving mounds and thermokarst depressions. The number of microorganisms and the dominant groups of bacterial communities of soils formed under the conditions of the ultracontinental climate of Buryatia and relatively close-lying permafrost are presented. It was revealed that bacterial microflora predominates in the soils of heaving mounds and thermokarst depressions. The intra-profile heterogeneity in the distribution of soil microorganisms indicates that, as a habitat, the soil is strongly differentiated in all directions. This differentiation along the vertical of heaving mound and thermokarst depression was reflected in the concept of soil horizons as special ecological niches and the possibility of using microbiological indications of heaving and subsidence occurring during heaving.

Key words: cryomorphoses, thermokarst depressions, heaving mounds, microbial biomass carbon, actinomycetes, fungi, bacteria, cryoturbated gley chernozems, humus-quasi-gley carbonated soils, quasi-gley chernozems.