

УДК 504.53:551.34:631.46

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ**Чимитдоржиева Э.О., Корсунова Ц.Д-Ц., Чимитдоржиева Г.Д.***Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, e-mail: erzhenach@mail.ru*

Индикатором экологического состояния природных экосистем является биологическая активность почв. Изменения в биологической активности почвы неизбежно оказывают влияние на круговорот веществ. В качестве характеристики биологической активности нами использован показатель углерода микробной биомассы. При исследовании пулов углерода микробной биомассы в почвах ее количественные характеристики являются основным показателем в экологических исследованиях. Биологическая активность мерзлотных почв юга Витимского плоскогорья изучена недостаточно полно, поэтому нуждается в дополнительных исследованиях. Отсюда целью работы было провести мониторинг накопления углерода микробной биомассы, а также определить его запасы в мерзлотных почвах для оценки общей биологической активности мерзлотных почв. Выявлена корреляционная зависимость между изменением температуры и содержанием углерода микробной биомассы в почвах. В отдельные периоды вегетации недостаток влаги в почвах ограничивал рост микроорганизмов. Изменение функциональной активности растительности и обеспечение микроорганизмов субстратом и биогенными элементами определялось в большей части параметром влажности почв. Содержание микробной биомассы в исследованных почвах было различным. Достоверно установлено, что микробиологическая активность гумусово-квасиглеевой окарбонированной почвы выше, чем черноземов глееватых криотурбированных. Низкий уровень энергетического обеспечения, глубокое промерзание почвенного профиля весной летнего периода отразились на почвенной биоте черноземов глееватых криотурбированных. Получены данные, характеризующие направленность и интенсивность микробиологических процессов почв бугров пучений и термокарстовых понижений. Накопление углерода микробной биомассы в исследуемых почвах значительно варьирует по сравнению с черноземами квазиглеевыми. Биологическая активность по всем изученным параметрам выше в гумусово-квасиглеевой окарбонированной почве.

Ключевые слова: углерод микробной биомассы, мерзлотные почвы, юг Витимского плоскогорья, черноземы глееватые криотурбированные, гумусово-квасиглеевые окарбонированные почвы

BIOLOGICAL ACTIVITY OF FROZEN SOILS**Chimtdorzhieva E.O., Korsunova Ts.D-Ts., Chimtdorzhieva G.D.***Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, e-mail: erzhenach@mail.ru*

Soil biological activity is an indicator of the ecological state of natural ecosystems. Changes in the biological activity of the soil inevitably affect the cycle of substances. As a characteristic of biological activity, we used the carbon index of microbial biomass. When studying carbon pools of microbial biomass in soils, its quantitative characteristics are the main indicator in ecological studies. The biological activity of permafrost soils in the south of the Vitim Plateau has not been fully studied, and therefore needs additional research. Hence, the aim of the work was to monitor the accumulation of carbon in microbial biomass, as well as to determine its reserves in permafrost soils to assess the overall biological activity of permafrost soils. A correlation dependence between temperature change and carbon content of microbial biomass in soils has been revealed. In some periods of vegetation, the lack of moisture in the soil limited the growth of microorganisms. Changes in the functional activity of vegetation and the provision of microorganisms with substrate and biogenic elements were determined for the most part by the soil moisture parameter. The content of microbial biomass in the studied soils was different. It has been reliably established that the microbiological activity of the humus-quasigley calcareous soil is higher than that of cryoturbated gleyic chernozems. The low level of energy supply, deep freezing of the soil profile in the spring of the summer period affected the soil biota of gleyic cryoturbated chernozems. Data have been obtained characterizing the direction and intensity of microbiological processes in soils of heaving mounds and thermokarst depressions. The accumulation of carbon in microbial biomass in the studied soils varies significantly compared to quasigley chernozems. Biological activity in all studied parameters is higher in humus-quasi-gley carbonated soil.

Keywords: microbial biomass carbon, permafrost soils, south of the Vitim Plateau, cryoturbated gleyic chernozems, humus-quasi-gley carbonated soils

Микробная биомасса, входящая в состав органического вещества почвы, является важным звеном в цикле углерода и может быть использована в качестве показателя биологической активности почвы. Общие резервуары углерода микробной биомассы имеют невысокие значения, как правило, они составляют не более 10% от общего содержания углерода почвы, только в некоторых случаях могут достигать 15% [1]. Микробная биомасса играет важную роль в минерализации отмершего растительного

опада, трансформации ряда элементов – C, N, P, S, иммобилизации тяжелых металлов и сохранении почвенной структуры [2].

Микроорганизмы являются важным компонентом экологической функций почв. По ряду физических и химических характеристик микроорганизмы являются ключевой частью поддержания жизнедеятельности равновесных экосистем. Это достигается вследствие высоких значений биомассы и благодаря их таксономическому разнообразию. Почвы всегда име-

ют запасной пул для обеспечения большей устойчивости, состоящий из разных микроорганизмов, представленный: наноформами, спорами, некультивируемыми и латентными формами. При нарушении саморегуляции системы они становятся функциональными [2].

В превращении всех биогенных макроэлементов экосистемы микробная биомасса играет исключительно важную роль. Деструкция и минерализация органического вещества почвы и поступление углерода в биосферу происходит благодаря почвенным микроорганизмам. Для определения состояния почв можно использовать показатель микробной биомассы [3]. Она является одним из индикаторов изменения биологической активности почв, характеризуя степень биогенности почвы. На основе количественной оценки микробной массы проводится оценка круговорота углерода в экосистемах и биосфере.

Потенциал микробного пула в способности почвы сохранять нормальное функционирование микробных сообществ под воздействием неблагоприятных климатических и антропогенных воздействий является важным эколого-физическим показателем [2; 4; 5]. Информация о пулах микробного углерода в разных типах почв важна для прогнозных сценариев и для экологических исследований.

Понимание фундаментальных основ этих процессов становится особенно важным с учетом глобальных изменений природной среды и климата, которые происходят с деятельностью человека. При исследовании запасов углерода микробной биомассы в разных типах почв, количество его накопления является основным показателем в исследованиях.

Биологическая активность почв является индикатором экологического состояния природных экосистем. Изменения в биологической активности почвы могут неизбежно оказывать влияние на круговорот веществ. Биологическая активность почв является одной из важных характеристик интенсивности микробиологических процессов. В качестве характеристики биологической активности нами использован показатель углерода микробной биомассы.

Биологическая активность черноземов квазиглеевых, черноземов глееватых криотурбированных и гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почв юга Витимского плоскогорья изучены недостаточно

полно, поэтому нуждаются в дополнительных исследованиях.

Цель работы – провести мониторинг накопления углерода микробной биомассы, а также определить его запасы в мерзлотно-почвах для оценки общей биологической активности мерзлотно-почв.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные участки находятся на юге Витимского плоскогорья, Еравнинская котловина. Многолетняя мерзлота достигает 130 метров, средний показатель равен 85 метрам [6]. На глубине 1,5–3,0 метра от поверхности почвы залегает верхняя граница мерзлоты.

Еравнинская котловина характеризуется резко континентальным климатом с холодной, малоснежной и продолжительной зимой. Последняя сменяется поздней засушливой ветреной весной. Лето в районе исследования жаркое и короткое. Данные метеостанции с. Сосново-Озерское свидетельствуют о том, что среднегодовая температура воздуха составляет – 4,1 °С при средней температуре наиболее теплого месяца (июль) +17,1 °С и самого холодного (январь) -25,4 °С. Сумма биологически активных температур составляет 1330 °С.

Состав растительного покрова участков исследования многообразен. Встречаются злаково- и разнотравно-пижмовые, вострецовые и вострецово-ковыльные растительные ассоциации. На более влажных экотопах произрастают овсяницы, тонконог стройный, ковыльный волосатик. При учете надземной, подземной и общей фитомассы было выявлено, что биопродуктивность растительной биомассы черноземов глеевых криотурбированных составляет 2,08 кг/м² и находится наравне с черноземами квазиглеевыми – 2,05, что значительно ниже по сравнению с таковыми гумусово-квазиглеевыми окарбоначенными почвами – 2,50 кг/м². Почвообразующие породы: делювиально-карбонатные суглинистые отложения, слоистые озерные отложения.

Объектами исследования послужили черноземы квазиглеевые, черноземы глееватые криотурбированные и гумусово-квазиглеевые окарбоначенные почвы. Для проведения исследования выбраны экспериментальные площадки, где заложены разрезы, взяты образцы почв с шагом 10 см. Мощность сезонно-талого слоя для черноземов квазиглеевых составляет 285 см. Данные по микробиоценозу мы приводили в 0–20 см слое почвы.

Биологическая активность оценивалась по интенсивности накопления, динамике и запасам углерода микробной биомассы в почвах.

Классическим методом определения углерода микробной биомассы является регидратационный метод [7]. Метод основывается на высушивании почвы при температуре 65-70 °С, что ведет к деструкции цитоплазматической мембраны микроорганизмов. На органическое вещество, которое уже отмерло, фактор температуры практически не воздействует. Внутриклеточные компоненты микроорганизмов благодаря регидратации высвобождаются и переходят в раствор слабой нейтральной соли и в дальнейшем определяются по сумме органических соединений. В воздушно-сухих образцах углерод микробной биомассы имеет некорректные заниженные данные, поэтому анализировать нужно только свежие образцы почвы. Почвенные образцы отбирались при $n=3$ и глубине 0-20 см.

С подробной характеристикой разрезов можно ознакомиться в статье [8].

Основные характеристики черноземов квазиглеевых: мощность гумусового горизонта – небольшая, гранулометрический состав – средний суглинок, содержание углерода органического в верхнем горизонте – среднее, сумма поглощенных – высокая, реакция среды в верхней части профиля – слабокислая ($pH=6,52$) и близкая к нейтральной ($pH=7,15$), в нижней части – щелочная реакция ($pH=8,36$).

Морфологические характеристики исследованных черноземов глееватых криотурбированных и гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почв значительно отличаются от черноземов квазиглеевых, где первые в значительной степени затронуты криогенными процессами на уровне микро-рельефа. Реакция среды гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почв – щелочная (8,02–8,40), черноземов глееватых криотурбированных – слабощелочная (7,71–7,81). По гранулометрическому составу черноземы глееватые криотурбированные относятся к супесчаным и легкосуглинистым, гумусово-квазиглеевые окарбоначенные почвы – легкосуглинистые в 0–30 см слое, среднесуглинистые в слое 30–50 см. Содержание органического углерода (Сорг) в черноземах глееватых криотурбированных составило 11,11% в 0-10 см слое, 6,38% – в 10-20 см слое. Отмечено высокое

содержание Сорг в гумусово-квазиглеевых окарбоначенных почвах в слое 0–10 см – 17,56%, в слое 10-20 см – 15,85% ($n=3$).

Результаты исследования и их обсуждение

Микробиоценоз криогенных экосистем формируется под воздействием экстраконтинентальных природных условий. Изменения экологических условий способствуют формированию адаптационной реакции у микроорганизмов, поскольку суровый климат мерзлотной лесостепи повышает их уязвимость.

Энергетические и трофические факторы лимитируют накопление углерода микробной биомассы в период вегетации, при большом интервале температур и влажности. На накопление микроорганизмов и функциональную ее активность влияют экстремальные природные условия. Например, после долгой засухи при выпадении осадков мы можем наблюдать влияние влажности. При промерзании-оттаивании почв выражено влияние температуры. Микробная биомасса может в несколько раз уменьшаться, например при отмирании во время засухи, или увеличиваться при оптимизации гидротермических условий почв [9].

Сукцессия микроорганизмов в изменяющихся условиях среды определяет процесс роста микробной биомассы. За источники питания усиливается конкуренция между растительными и микробными сообществами. На замедление роста содержания микроорганизмов влияют изменения трофических факторов и повышение температуры почвы в сочетании с недостатком влаги. Благодаря активному поступлению корневых выделений складываются благоприятные условия для роста и развития г-стратегов только в ризосфере и ризоплане. Активность роста ризосферных микроорганизмов практически не оказывает влияния на общее накопление углерода микробной биомассы в почвах, что обусловлено низкими границами микрон, не превышающими 250-1000 мкм. При таких условиях возможно доминирование К-стратегов, которые более устойчивы к неблагоприятным факторам среды и способны быстро расти [9].

Среднее накопление углерода микробной биомассы в верхнем 0-20 см слое черноземов глееватых криотурбированных равен 44,2 мг/100 г почвы (рис. 1).

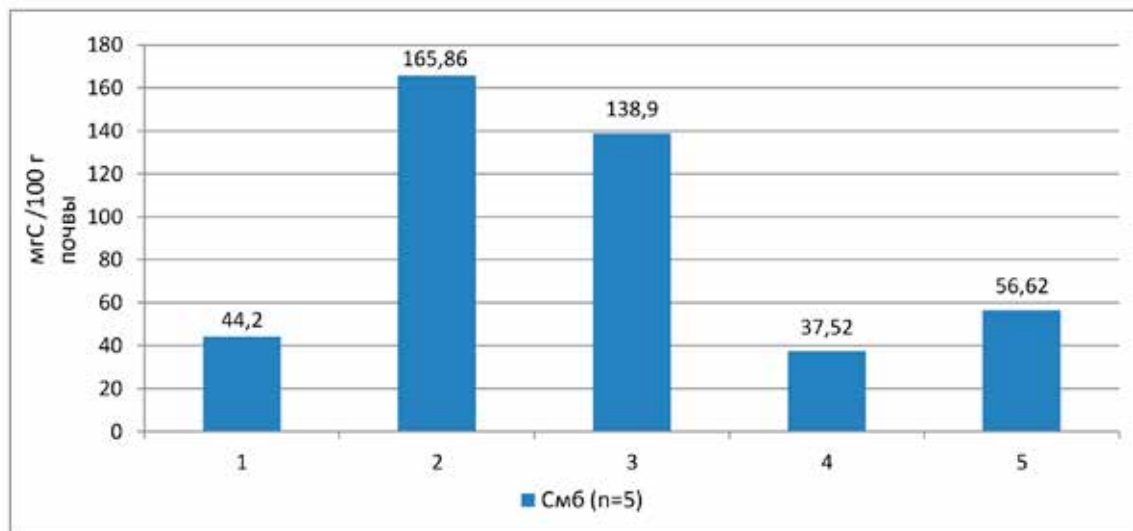


Рис. 1. Накопление углерода микробной биомассы в холодных и мерзлотных почвах.
Условные обозначения: 1 – чернозем глееватый криотурбированный,
2 – гумусово-квизиглеевая окарбоначенная почва, 3 – чернозем квазиглеевый,
4 – каштановая почва [10], 5 – чернозем дисперсно-карбонатный [11]

Максимальное количество углерода микробной массы обнаружено в гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почве – 165,86 мг/100 г почвы, что объясняется обилием ризосферной микрофлоры и высоким содержанием органического углерода. В черноземах квазиглеевых среднее значение углерода микробной биомассы в верхнем слое почвы 138,9 мг/100 г почвы. При усилении степени аридизации показатель уменьшается до 37,52 в каштановых почвах [10; 11].

Накопление углерода микробной биомассы в черноземе глееватом криотурбированном меньше, несмотря на то что в нем больше углерода, чем в черноземах квазиглеевых. Вероятно, этот углерод представлен большей частью недоступной для микробиоты формой.

Следует отметить, что видовая структура и разнообразие почвенных микроорганизмов может обедняться вследствие использования почвенными микробами легких органических соединений, которые содержатся в растительных остатках и корнях растений. Химический состав ризовыделений различен у растительности разных типов землепользования из-за различий в видовом составе растений. Корневой углерод является основным ресурсом питания микробных сообществ. Высвобождение органических соединений через корни (ризоотложения) и последующее их использование микробными сообщества-

ми является ключевым процессом, связывающим атмосферный и почвенный углерод и круговорот питательных веществ [12].

Динамика углерода микробной биомассы имеет односторонний характер с максимумом в летний период. Так, в начале вегетационного сезона показатель варьирует от 40,3 мг С/100 г почвы в черноземах глееватых криотурбированных до 173,0 мг С/100 г почвы в гумусово-квизиглеевых окарбоначенных почвах, в черноземах квазиглеевых до 148,8 мг С/100 г почвы.

Летнее увеличение количества углерода микробной биомассы может быть связано с благоприятными гидротермическими условиями и бурным ростом г-стратегов [9]. Показатель варьирует от 78,8 мг С/100 г почвы в черноземах глееватых криотурбированных до 247,7 мг С/100 г почвы в гумусово-квизиглеевых окарбоначенных почвах, черноземах квазиглеевых – 168,8 мг С/100 г почвы (рис. 2).

Спад содержания углерода микробной биомассы в конце вегетации связан с торможением биологических процессов в почве в связи с понижением внутрисуточных температур почвы. Было отмечено понижение показателей углерода микробной биомассы до 48,8 в черноземах глееватых криотурбированных, до 204,5 мг С/100 г почвы в гумусово-квизиглеевых окарбоначенных почвах, до 143,0 мг С/100 г почвы в черноземах квазиглеевых – 148,8 мг С/100 г почвы.

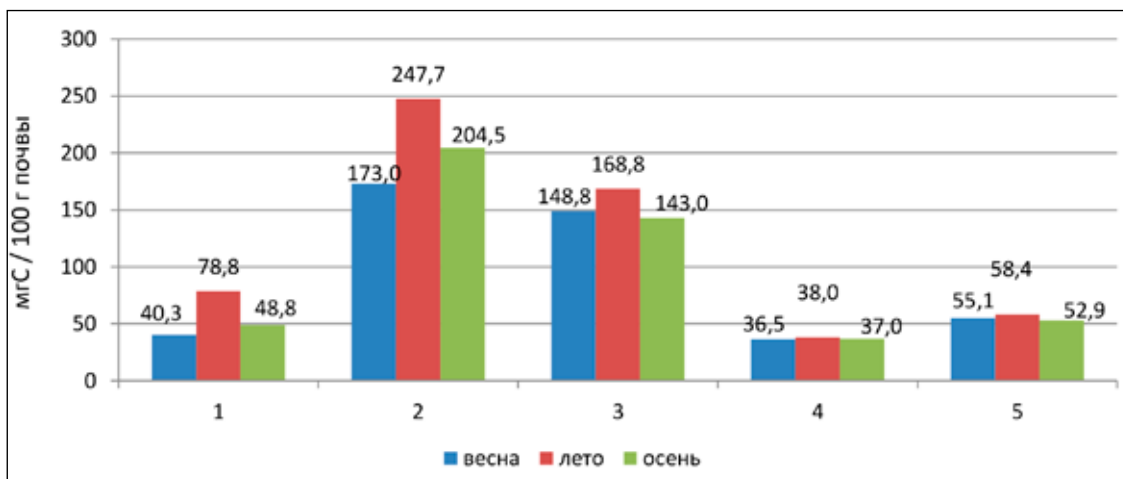


Рис. 2. Динамика углерода микробной биомассы в холодных и мерзлотных почвах.
Условные обозначения: 1 – чернозем глееватый криотурбированный,
2 – гумусово-квизиглеевая окаربоначенная почва, 3 – чернозем квизиглеевый,
4 – каштановая почва [10], 5 – чернозем дисперсно-карбонатный [11]

Для сравнения приведем данные не с мерзлотных почв. Так, в каштановых почвах и черноземах дисперсно-карбонатных Тугнуйской котловины [10] динамика углерода микробной биомассы количественно меньше исследуемых мерзлотных почв. Кривая динамики углерода микробной биомассы имеет пологий одновершинный характер (рис. 2).

Изменения накопления углерода микробной биомассы связаны с воздействием трофических и климатологических факторов. Особенности суточных колебаний роста микроорганизмов в разных типах почвы показывают наличие единого эндогенного и экзогенного устройства сукцессионных сдвигов микробного сообщества.

Расчёты статистических параметров показали, что на различных типах почв накопление углерода микробной биомассы достоверно отличается. Установлена достоверная связь между температурой почвы и углеродом микробной биомассы в почвах. В отдельные периоды вегетации дефицит влажности в почвах сдерживал рост микроорганизмов. Корреляционная связь между углеродом микробной биомассы и влажностью почвы составляет 0,6-0,9.

Средние значения углерода микробной биомассы за весь период мониторинга имеют вариацию в широком диапазоне, что показывает способность микроорганизмов откликаться на изменение окружающей среды.

Запасы углерода микробной биомассы распределены в следующем ряду по убыванию: черноземы квизиглеевые – 0,22 кг С/м²,

гумусово-квизиглеевые окаربоначенные почвы – 0,18 кг С/м², черноземы глееватые криотурбированные – 0,08 кг С/м² (рис. 3). Для сравнения в немерзлотных почвах: 0,07 кг С/м² в каштановых [10] и 0,13 кг С/м² в черноземах дисперсно-карбонатных [11].

Значительное накопление углерода микробной биомассы в условиях в засушливые периоды объясняется адаптационной реакцией микроорганизмов к условиям окружающей среды. По-видимому, в этом случае температура для их существования не играет значительной роли. Отмечено, что при очень низких значениях влажности почвы могут функционировать такие микроорганизмы, как ряд грибов и актиномицеты. Таким образом, внутри пула органического углерода микроорганизмами осуществляется трансформация углерода из углерода гумуса в углерод биомассы.

Абиотические условия каждого сезона определяют значительную трансформацию структуры микробиоценоза, пропорции отдельных микроорганизмов и их количества. Климатические условия в течение вегетационных периодов определяют различия в численности микроорганизмов. Условия формирования микроорганизмов обусловлены их физическими качествами и определяют сукцессию сообщества микроорганизмов. Периоды всплесков накопления микроорганизмов обусловлены абиотическими факторами (влажность, температура, осадки). При этом ограничительным фактором является низкий процент почвенного гумуса.

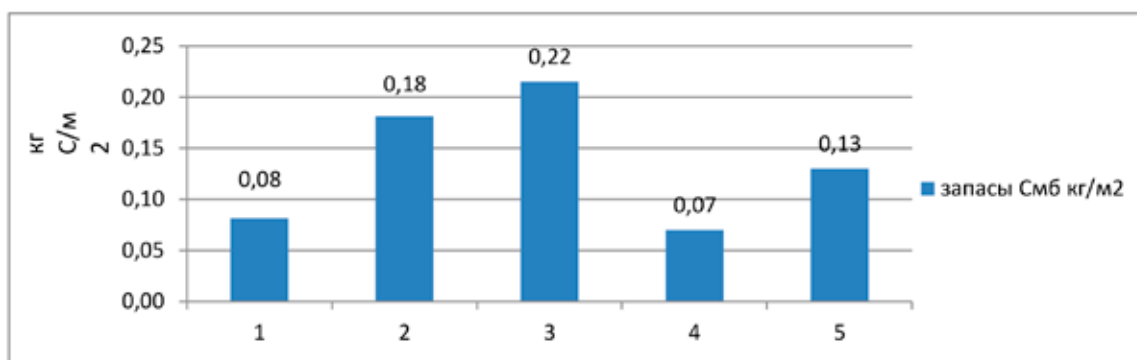


Рис. 3. Запасы углерода микробной биомассы в холодных и мерзлотных почвах.
Условные обозначения: 1 – чернозем глееватый криотурбированный,
2 – гумусово-квизиглеевая окарбоначенная почва, 3 – чернозем квазиглеевый,
4 – каштановая почва [10], 5 – чернозем дисперсно-карбонатный [11]

Отличия в источнике питания и интенсивности влияния на почвы мерзлоты обуславливают разный запас питания, отсюда и различия содержания и динамики углерода биомассы.

Заключение

В ходе исследования достоверно определено, что биологическая активность гумусово-квизиглеевой окарбоначенной почвы выше, чем чернозема глееватого криотурбированного. Все изученные почвы отличаются по содержанию микробной биомассы. Невысокий уровень энергетического обеспечения, глубокое промерзание почвенного профиля и значительное их иссушение в весенне-летний период отразились на почвенной биоте черноземов глееватых криотурбированных.

Изменения содержания углерода микробной биомассы в течение вегетационного периода определяются гидротермическими условиями почв и общим ресурсом энергии. Углерод микробной биомассы исследуемых почв занимает невысокую процентную долю в общем пуле органического углерода. Несмотря на низкое процентное содержание в общем пуле органического углерода, микробная биомасса представляет собой высокофункциональную ее часть, способную значительно усилить темп круговорота почвенного органического вещества.

Экспедиционные исследования выполнены за счет средств бюджета по теме госзадания № 121030100228–4; аналитические работы при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ №16–04–01297.

Список литературы

1. Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С. Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация

в дерново-подзолистой почве Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2020. №3. С. 372–378. DOI: 10.31857/S0032180X20030120.

2. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. DOI: 10.7868/S0032180X15090038.

3. Гавриленко Е.Г., Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Оценка качества почв различных экосистем (на примере Серпуховского и Подольского районов Московской области) // Почвоведение. 2013. №12. С. 1505–1515. DOI: 10.7868/S0032180X13120058.

4. Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудяров В.Н., Валентини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. №9. С. 1077–1088. DOI: 10.7868/S0032180X14090056.

5. Якутин М.В., Анопченко Л.Ю., Андриевский В.С. Влияние засоления на биомассу микроорганизмов в разновозрастных почвах в лесостепной зоне Западной Сибири // Почвоведение. 2016. №12. С. 1500–1505. DOI: 10.7868/S0032180X16100154.

6. Мельничук Н.Л. Подземные воды Еравнинского и Верхне-Удинского артезианского бассейнов. Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1966. С.217–227.

7. Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.Ю., Паников Н.С. Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве // Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.

8. Chimitdorzhieva G.D., Chimitdorzhieva E.O., Milkheev E.Y., Tsybenov Y.B., Egorova R.A., Soldatova Z.A., Andreeva D.B., Korsunova T.D.-Ts., 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. Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. No. 9. P. 1019–1027.

9. Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 256 с.

10. Chimitdorzhieva E.O., Chimitdorzhieva G.D. Accumulation and dynamics of carbon-biomass in the krioarid soils of Transbaikalia. Arid Ecosystems. 2014. Vol. 4. No. 2. P. 69–74.

11. Чимитдоржиева Э.О. Запасы углерода в черноземах и каштановых почвах Западного Забайкалья и эмиссия CO₂: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Улан-Удэ, 2011. 20 с.

12. Zhou J., Li Zh., Shipeng L., Kuzyakov Y., Pausch J. Microbial utilization of photosynthesized carbon depends on land-use. Geoderma. 2022. V. 428. No. 12. P. 116160.