

УДК 631.417.2

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МИНЕРАЛИЗУЕМОГО ПУЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КРИОЗЕМАХ ТУНДР КОЛЫМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

© 2020 г. А. К. Ходжаева<sup>а</sup>, \*, А. В. Шатилович<sup>а</sup>, С. В. Губин<sup>а</sup>, А. В. Лупачев<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
ул. Институтская, 2, Пушино, 142290 Россия

\*e-mail: akho2@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.05.2019 г.

После доработки 04.07.2019 г.

Принята к публикации 20.09.2019 г.

Процессы криогенного массообмена влияют на содержание и распределение органического вещества в профилях криоземов, обогащая им минеральные горизонты. Показано, что минерализационная способность преобладающей части органического вещества криоземов, даже при оптимальных условиях температуры и влажности, низкая. Несмотря на значительное варьирование содержания микробной биомассы, сохраняется общая закономерность ее распределения по профилю, с максимумами в верхних органогенных горизонтах и резким уменьшением в минеральных. Доля углерода микробной биомассы от валового органического вещества по всему профилю криоземов не превышает 1%. Величина дыхательного коэффициента ( $Q_p$ ) варьирует в пределах от 0.1 до 0.3. Наиболее значимое влияние на содержание микробной биомассы и изменение ее дыхательной активности в профилях криоземов оказывают содержание  $C_{орг}$ ,  $N_{общ}$  и количество пор и пустот.

**Ключевые слова:** Cryosol, многолетняя мерзлота, потенциально-минерализуемое органическое вещество, микробная биомасса

DOI: 10.31857/S0032180X20020070

### ВВЕДЕНИЕ

Почвы тундровых экосистем — один из наиболее значимых наземных резервуаров углерода, длительное время аккумулирующих органическое вещество в своих профилях [22, 24]. По оценкам Шепаченко с соавт. [19] средние запасы органического углерода в подстилке и метровом слое тундровых почв России составляют 17.83 кг С/м<sup>2</sup> или 48.1 Пг С. Значительные запасы углерода в этих почвах обусловлены слабой биохимической трансформацией органических остатков из-за повышенной влажности, низких летних температур профилей, краткости периода их оттаивания, состава растительного опада. Все это создает условия для медленного разложения растительных остатков и накопления в почве слабогумифицированного органического вещества [23]. Наряду с трансформацией и аккумуляцией грубого органического вещества в поверхностных горизонтах почв тундр, часть его в ходе активного криомассообмена заносится в минеральные части профилей, где продолжает трансформироваться и может накапливаться в надмерзлотных горизонтах [3, 4, 11, 25, 26]. В поверхностных органогенных и органо-минеральных горизонтах профилей криоземов содержание  $C_{орг}$

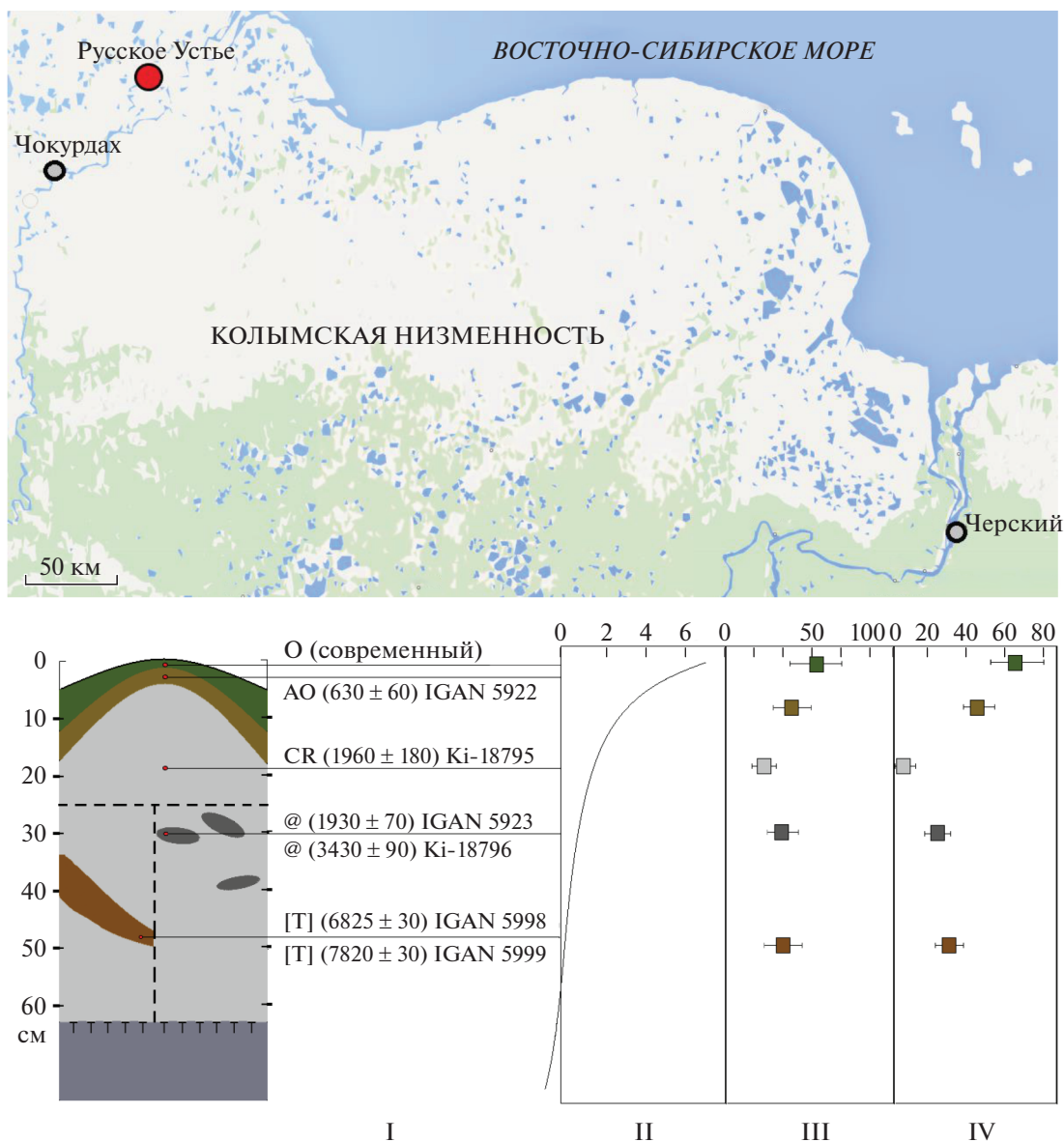
достигает 5–15%, а в криотурбированных минеральных горизонтах — 5–8% [3].

Климатические изменения последних десятилетий способны оказать существенное влияние на аккумуляцию углерода тундровыми почвами, а в случае реализации сценария масштабного потепления — существенно усилить микробиологическую деструкцию в них органического вещества [9]. Для количественного прогноза вклада тундровых почв в глобальную эмиссию диоксида углерода необходимо располагать данными, характеризующими способность к биодеградации органического вещества. В настоящее время имеются фрагментарные сведения о содержании потенциально-минерализуемого органического вещества в почвах тундровой зоны европейской части России [14, 15].

Цель работы — определение минерализационной способности органического вещества, содержания микробной биомассы и дыхательной активности криоземов с признаками активного заноса грубого органического материала в центральные части профилей.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучали криоземы типичные (Turbic Cryosols) и торфяно-криоземы (Turbic Histic Cryosols),



**Рис. 1.** Схема строения профилей криоземов и их гидротермические и физические свойства. I – возраст органического вещества криоземов; II – среднелетняя температура, °С; III – весовая влажность, %; IV – количество пор и пустот в материале, %.

сформированные на водораздельных пространствах в арктической тундре в низовьях р. Индигирки (71°13' N; 149°25' E) (рис. 1). Все они характеризовались полноразвитыми профилями и признаками криотурбационного заноса в центральные части профилей фрагментов материала органогенных горизонтов в виде отдельных темных морфонов (@). Кроме того, исследовали криоземы, сформированные на склонах пологих увалов. В условиях активного проявления солифлюкции, здесь происходит сползание почвенного материала и погребение в профилях вновь формирующихся почв материала бывших поверхностных органогенных и органо-минеральных горизонтов

с сохранением морфологических признаков их исходного залегания.

Для исследования отбирали органогенный и органо-минеральный материал поверхностных горизонтов (O, AO), пылевато-суглинистый минеральный материал криотурбированных горизонтов (CR), а также образцы отдельных, находящихся в них органосодержащих морфонов криотурбированного (@) и погребенного в ходе солифлюкции торфяного материала ([T]). Изучено 40 образцов из 7 профилей криоземов.

Аналитические исследования почвенных образцов выполняли в ЦКП ИФХиБПП РАН. Ва-

**Таблица 1.** Основные характеристики криозема

Горизонт	Глубина, см	C <sub>орг</sub> , %	N <sub>общ</sub> , %	C : N	ППП, %	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>
O	0–6	24.8 ± 4.5	2.1 ± 0.3	13	42.3 ± 5.8	Не опр.
AO	6–12	9.0 ± 1.2	0.7 ± 0.1	16	19.5 ± 1.9	4.4
CR	12–63	3.3 ± 0.5	0.1 ± 0.04	48	7.3 ± 0.5	4.9
@	12–36	6.3 ± 0.4	0.4 ± 0.1	18	14.6 ± 1.1	5.2
[T]	36–63	17.0 ± 5.5	2.0 ± 0.8	10	31.1 ± 9.0	5.0

ловое содержание органического углерода (C<sub>орг</sub>) и общего азота (N<sub>общ</sub>) в почвенных образцах определяли с помощью автоматического HCNS-анализатора Elementar Vario El III (Германия). Актуальную кислотность (pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) образцов измеряли потенциометрическим методом (pH-метр Sartorius Basic Meter PB-11, США). Потерю при прокаливании (ППП) определяли по разности массы до и после прокаливания навески почвы в муфельной печи при  $t = 900^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч [16].

Микростроение почв изучали с помощью оптического микроскопа ЦКП ИФХиБПП РАН Аxiосcope A1 с камерой Аxiосcam MR5 (Германия). Подсчет площади, занимаемой пустотами в материале основных диагностических горизонтов криоземов и в отдельных морфонах, обогащенных грубым органическим материалом, выполняли в ходе микроморфологических исследований шлифов ( $n = 54$ ), изготовленных по общепринятой методике [2].

Радиоуглеродное датирование образцов органического вещества почв проводили в ЦКП “Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН (образцы с индексом IGAN) и Киевской радиоуглеродной лаборатории ГНЦ радиохимии окружающей среды (образцы с индексом Ki).

Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества (C<sub>пм</sub>) определяли биокинетическим методом [12]. Расчет содержания C<sub>пм</sub> проводили по кумулятивному количеству выделившегося C–CO<sub>2</sub> (мг/100 г) за 150 сут инкубирования (60% ППВ, 22°C), используя уравнение экспоненциальной регрессии, оценки которой находили методом, реализованным в программе Statistica 6.0 для нелинейной регрессии. Минерализационную способность почвенного органического вещества оценивали по отношению содержания потенциально-минерализуемого органического вещества к валовому органическому веществу. Рассчитывали углерод-минерализующую активность (УА = C<sub>пм</sub>  $k$ , мг/(100 г сутки), где C<sub>пм</sub> – содержание потенциально-минерализуемого органического вещества, мг/100 г;  $k$  – константа скорости минерализации в сутки) и индекс

стабильности ИС = (C<sub>орг</sub> – C<sub>пм</sub>)/C<sub>пм</sub> почвенного органического вещества [13].

Определяли скорости дыхания микроорганизмов в небогатенных (базальное дыхание,  $V_{\text{basal}}$ , мкг C–CO<sub>2</sub>/(г ч)) и обогащенных (субстрат-индуцированное дыхание,  $V_{\text{SIR}}$ , мкг C–CO<sub>2</sub>/(г ч)) доступным субстратом (модельный субстрат – глюкоза) почвенных образцах. Скорость почвенного дыхания измеряли на газовом хроматографе ЦКП ИФХиБПП РАН “Кристаллюкс 4000M” (Россия). Коэффициент микробного дыхания ( $Q_r$ ) рассчитывали по отношению  $V_{\text{basal}}$  к  $V_{\text{SIR}}$  [1]. Содержание углерода микробной биомассы (C<sub>мб</sub>) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), основанного на измерении дыхания почвы после ее обогащения глюкозой и последующем расчете величины C<sub>мб</sub> [21] по формуле: C<sub>мб</sub> (мкг/г) = 40.04  $V_{\text{SIR}}$  + 0.37. Измерения интенсивности почвенного дыхания выполняли в трех повторностях. Результаты измерений выражали как среднее ± стандартное отклонение. Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием методов множественного регрессионного анализа. Статистическую обработку данных проводили с помощью программ Statistica 6.0 и PAST 3.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Условия формирования и основные характеристики строения криоземов*

Формирование криоземов в тундрах протекает в условиях слабой теплообеспеченности и близкого залегания многолетнемерзлых пород (<1 м). Они развиваются в условиях мерзлотного нанорельефа на полигонах высотой 20–40 и 80–120 см в диаметре и относительно хорошей дренированности поверхности [4]. Строение профилей криоземов и их химические свойства в районе исследований, сложенном пылеватыми суглинками позднеллейстоценовых останцовых возвышенностей (едом), хорошо изучены [4, 6, 7, 11, 17]. Основные характеристики, исследуемых криоземов приведены в табл. 1. Важнейшей особенностью этих почв является активное участие в их формировании процессов криомассообмена, выраженное в пят-

нообразовании и перемещении материала органо-генных горизонтов в минеральные части профилей. При быстром осеннем промерзании нанополлигонов в их центральных частях резко возрастает криостатическое давление, и по образовавшимся трещинам на поверхность происходит излияние еще незамерзшего материала верхних частей минеральных горизонтов [4]. Перекрытый излившейся массой материал органо-генных горизонтов опускается до глубины 10–20 см, где гидротермические условия резко отличаются от поверхностных. Уже через 3–5 лет это приводит к заметным нарушениям исходного залегания криотурбированного органического материала, обособлению отдельных его зон в органосодержащие морфоны (@), частичной деструкции в них органических остатков, смешиванию их с минеральным материалом, перераспределению и постепенному перемещению морфонов в центральные и нижние части профилей, где они, в ряде случаев, достигнув границы многолетней мерзлоты, постепенно накапливаются, образуя горизонты надмерзлотной аккумуляции грубого органического вещества (CRO) [3]. Краткость летнего периода и медленное оттаивание почв определяют различную длительность нахождения тех или иных частей профилей в режиме положительных температур, при этом большая их часть даже в периоды максимального оттаивания имеет температуру ниже 3°C. Влажность органо-генных горизонтов и верхних частей горизонтов CR в период максимального оттаивания в значительной степени определяется погодными условиями летнего периода и превышает 25%, возрастая в надмерзлотной части профиля. Важно отметить, что в процессе оттаивания почв фронт увлажнения постепенно опускается вслед за границей оттаивания вниз и пополняет дефицит влаги в слое зимнего иссушения в средних частях профилей. В период максимального оттаивания влажность морфонов криотурбированного органо-минерального материала @ может на 5–15% превышать влажность вмещающего их минерального материала.

Другим исследуемым объектом являлся материал погребенных в ходе солифлюкции торфяных горизонтов ([Т]). На склонах различной крутизны, формирующиеся криоземы часто перекрываются сползающим по склону материалом. Мощность перекрывающей толщи может достигать 0.5–0.7 м. Таким образом, погребенные процессами солифлюкции горизонты почв находятся в зоне современного сезонного оттаивания в режиме центральных и надмерзлотных частей профилей современных почв. Погребенные горизонты часто сохраняют свою целостность, исходное залегание, основные морфологические показатели, включая хорошую сохранность растительных остатков. Они несколько уплотнены и практиче-

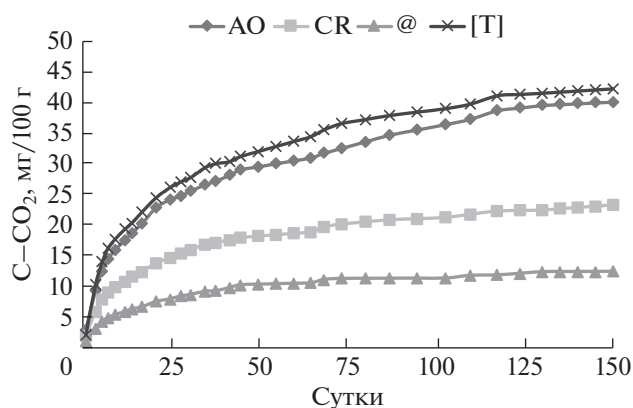
ски не содержат примесей перекрывающего их минерального материала.

*Содержание валового  
и потенциально-минерализуемого  
органического вещества в криоземах*

По содержанию валового органического углерода ( $C_{орг}$ ) исследуемые горизонты, погребенные торфяные горизонты и криотурбированные морфоны криоземов образовали убывающий ряд: О (25%) > [Т] (17%) > АО (9%) > @ (6%) > CR (до 3%). Высокое содержание  $C_{орг}$  не только в верхних органо-генных горизонтах криоземов, но и в минеральной толще, связано с процессами криогенного массообмена и солифлюкции. Поступающий с поверхности органический материал в ходе постепенного разрушения измельчается и в виде частично разложившегося детрита перераспределяется в составе горизонта CR. Это хорошо диагностируется при анализе его микроморфологического строения. Одновременно с этим, следует учитывать изначальную обогащенность мелкими растительными остатками позднеплейстоценовых пылеватого-суглинистых отложений, которые являются почвообразующими породами исследуемых почв [5]. Наличие детрита определяет относительно высокое содержание  $C_{орг}$  в минеральных частях криоземов по сравнению с формирующимися на этой же территории глееземами, в которых процессы криотурбации отсутствуют или выражены намного слабее. В то же время процессы гумусообразования, идущие в верхних органо-генных горизонтах, продуцируют подвижные органические вещества, способные к нисходящей миграции, обогащающей минеральные горизонты профилей [8, 11].

Определенный радиоуглеродным методом калиброванный возраст органического вещества в профилях криоземов показал, что наиболее древним является материал погребенного торфяного горизонта [Т]. Полученные для него две даты имеют разброс около 1 тыс. лет и соответствуют материалу нижней и верхней его частей, что позволяет считать этот отрезок времени периодом формирования горизонта, а время нахождения его в погребенном состоянии оценивать в 5–6 тыс. лет. Калиброванный возраст органического вещества криотурбированных морфонов из центральных частей профилей составлял 1930–3430 лет, а вмещающего морфоны минерального горизонта CR – 1960 лет. Наиболее молодым является органическое вещество современного горизонта АО – 630 лет.

Содержание  $N_{общ}$  в профилях криоземов варьировало в пределах от 0.1 до 2.1%, резко уменьшаясь с глубиной. Отношение C : N в горизонтах с высоким содержанием  $C_{орг}$  (О, АО, [Т]) в сред-



**Рис. 2.** Динамика кумулятивного продуцирования C–CO<sub>2</sub> при инкубировании в постоянных условиях температуры и влажности.

нем составляло 10–16. В криотурбированных морфонах (@) и в горизонтах CR отношение C : N составляло 18 и 48 соответственно. Отношение C : N > 30 свидетельствует о значительном дефиците азота в минеральной толще криоземов и замедлении процессов минерализации по сравнению с верхними органогенными горизонтами, погребенным торфяным горизонтом и криотурбированными органосодержащими морфонами.

По кумулятивным кривым продуцирования C–CO<sub>2</sub> (рис. 2) с использованием однокомпонентного уравнения кинетики первого порядка, были рассчитаны исходные содержания C<sub>пм</sub> в профилях криоземов (табл. 2). В верхних органо-минеральных горизонтах (АО) содержание C<sub>пм</sub> было наибольшим и в среднем составляло 86 мг/100 г. Вниз по профилю содержание C<sub>пм</sub> уменьшалось и в горизонтах CR в среднем было в 2 раза ниже, чем в горизонте АО. Для сравнения: содержание валового органического углерода в горизонтах CR было в 5 раз ниже, чем в АО. В погребенном горизонте [Т] и криотурбированных морфонах @ содержание C<sub>пм</sub> не отличалось от такового в минеральных горизонтах CR. Доля C<sub>пм</sub> в C<sub>орг</sub> в профилях криоземов составила 0.3–1.4%. Было проведено сравнение полученных величин C<sub>пм</sub> с обобщенными данными для 200 почвенных образцов разных природных зон европейской части России, в которых

содержание C<sub>пм</sub> варьировало от 7 до 557 мг/100 г, что составило 0.5–13.4% от C<sub>орг</sub> [15]. Авторы приведенной работы предлагают разделить полученный диапазон величин C<sub>пм</sub> (мг/100 г) на пять групп: с очень высоким содержанием (600–300), высоким (300–150), средним (150–75), низким (75–35) и очень низким (<35). Исходя из этого, минерализационная способность преобладающей части органического вещества минеральных горизонтов CR, погребенных торфяных горизонтов [Т] и криотурбированных морфонов @, даже при оптимальных условиях температуры и влажности, созданных в лабораторных условиях, является низкой, а в верхних органо-минеральных горизонтах АО — средней. Низкая интенсивность минерализации преобладающей части органического вещества криоземов может быть связана с его устойчивостью к разложению. В работе Ларионовой с соавт. [10] вероятной причиной устойчивости органического вещества тундровых почв к разложению рассматривается высокое содержание алкилов, наряду с ароматическими функциональными группами, способствующими низкой интенсивности деструкции органического вещества микроорганизмами.

Низкую минерализационную способность преобладающей части органического вещества криоземов подтверждают также полученные значения углерод-минерализующей активности (УА) и индексов стабильности (ИС). Значения УА варьировали от 1.1 до 4.3 мг/100 г с максимумом в АО и минимумом в CR. Несмотря на высокое содержание C<sub>орг</sub> в [Т] и @, значения УА не отличались от таковых для CR, где содержание C<sub>орг</sub> было в несколько раз ниже. Величины ИС органического вещества криоземов варьировали от 49 до 93. Самое высокое значение ИС получено для погребенных торфяных горизонтов, самое низкое — для минеральных. Аккумуляция органического вещества в почвенном профиле во многом зависит от условий его стабилизации [18]. Органический материал верхних органогенных горизонтов, в ходе процессов криогенного массообмена попавший в нижележащие слои, т.е. в условия, отличные от его формирования (большая длительность мерзлого состояния и краткость периода оттаивания по сравнению с верхними органогенными го-

**Таблица 2.** Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества (C<sub>пм</sub>), углерод-минерализующая активность (УА) и индекс стабильности (ИС) органического вещества криозема

Горизонт	Глубина, см	C <sub>пм</sub> , мг/100 г	C <sub>пм</sub> , % от C <sub>орг</sub>	УА, мг/100 г в сутки	ИС
АО	6–12	86 ± 7	1.0	4.3	86
CR	12–63	41 ± 9	1.4	1.1	49
@	12–36	42 ± 7	0.7	1.6	79
[Т]	36–63	42 ± 2	0.3	1.2	93

ризонтами, а также недостаток кислорода при повышенной влажности и близость к слою многолетней мерзлоты), сохраняется в почвенном профиле длительное время (1.9–7.8 тыс. лет) и медленно трансформируется. По данным Абакумова с соавт. [20] состав гуминовых кислот, экстрагированных из поверхностных органических горизонтов, характеризовался повышенным содержанием алкильных компонентов, а в погребенных торфяных горизонтах и в криотурбированных морфонах – повышенным содержанием ароматических компонентов и, в целом, более высокой степенью окисленности. Содержание свободных радикалов было выше в органическом веществе поверхностных органических и органо-минеральных горизонтов, чем в погребенных торфяных горизонтах и криотурбированных морфонах. Поэтому органическое вещество [Т] и @ центральных и надмерзлотных частей профилей криоземов имеет более высокую степень стабилизации, чем органическое вещество поверхностных органических горизонтов.

*Содержание микробной биомассы и дыхательная активность почв*

В профилях криоземов содержание  $C_{мб}$  составляло 36–1804 мкг/г (табл. 3). Несмотря на значительное варьирование содержания микробной биомассы, сохранялась общая закономерность ее распределения по профилю, с максимумами в верхних органических горизонтах и резким сокращением в минеральных. Содержание  $C_{мб}$  было в 16 (АО) и 50 (О) раз выше, чем в CR. В погребенном горизонте [Т], несмотря на высокие показатели  $C_{орг}$  и  $N_{общ}$  содержание  $C_{мб}$  было низким и в среднем составляло 183 мкг/г. Криотурбированные морфоны незначительно отличались от CR по содержанию  $C_{мб}$ . Доля  $C_{мб}$  в  $C_{орг}$  по всему профилю криоземов не превышала 1%. Таким образом, низкая минерализационная способность преобладающей части органического вещества криоземов, может быть связана не только с его химической устойчивостью, но и с малым содержанием микробной биомассы, сформировавшейся в условиях преобладания низких температур и повышенной влажности, как было показано для

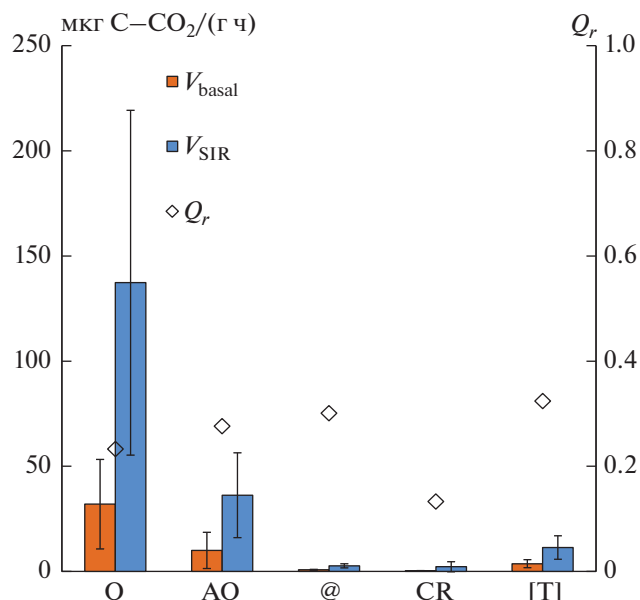


Рис. 3. Изменения показателей дыхательной активности микробного сообщества по профилю криозема.

торфяно-поверхностноглеевой почвы тундровой зоны Ларионовой с соавт. [10]. Доля  $C_{мб}$  в  $C_{пм}$  варьировала в пределах от 8.8 до 67.7%. Чем выше было содержание валового органического вещества в горизонтах и морфонах криоземов, тем большую долю в  $C_{пм}$  составлял  $C_{мб}$ . Таким образом, значительную часть потенциально-минерализуемого органического вещества верхних органо-минеральных горизонтов криоземов составляла микробная биомасса.

Состояние микробоценоза в профилях криоземов оценивали по скорости базального ( $V_{basal}$ ), субстрат-индуцированного дыхания ( $V_{SIR}$ ) и коэффициенту микробного дыхания ( $Q_r$ ), величина которого позволяет судить о подверженности почвенного микробного сообщества стрессовым воздействиям (рис. 3). Скорость базального дыхания так же, как содержание  $C_{орг}$  и  $C_{мб}$ , была значительно выше в верхних органических горизонтах криоземов по сравнению с CR и @. В образцах погребенного торфяного горизонта [Т]  $V_{basal}$  незначительно возростала по сравнению с горизон-

Таблица 3. Содержание углерода микробной биомассы ( $C_{мб}$ ) в профиле криозема

Горизонт	Глубина, см	$C_{мб}$ , мкг/г	$C_{мб}$ , % от $C_{орг}$	$C_{мб}$ , % от $C_{пм}$
O	0–6	1804 ± 270	0.7	н.о.
АО	6–12	582 ± 149	0.6	67.7
CR	12–63	36 ± 15	0.1	8.8
@	12–36	43 ± 8	0.1	10.4
[Т]	36–63	183 ± 91	0.1	43.7

**Таблица 4.** Регрессионные зависимости содержания микробной биомассы и ее дыхательной активности в профиле криозема от статистически значимых величин почвенных параметров

Горизонт	Y	Модель	P	R <sup>2</sup>
Весь профиль	C <sub>мб</sub>	$Y = -492.2 + 24.9a + 22b$	<0.001	0.67
	V <sub>basal</sub>	$Y = -7.9 + 1.4a + 0.2b - 6.2c$	<0.001	0.78
	V <sub>SIR</sub>	$Y = -30.6 + 1.5a + 1.4b$	<0.001	0.67
O, AO	C <sub>мб</sub>	$Y = -1192.4 + 31.1b + 557c$	<0.001	0.83
	Q <sub>r</sub>	$Y = 0.004 + 0.0001d$	0.05	0.25
CR	C <sub>мб</sub>	$Y = -79.8 + 24.2a + 0.74e$	<0.001	0.88
	Q <sub>r</sub>	$Y = 0.09 - 0.008b$	0.05	0.54

Примечание. Y: C<sub>мб</sub> – содержание углерода микробной биомассы, мкг/г; V<sub>basal</sub> – скорость базального дыхания, мкг С–СО<sub>2</sub>/(г ч); V<sub>SIR</sub> – скорость субстрат-индуцированного дыхания, мкг С–СО<sub>2</sub>/(г ч); Q<sub>r</sub> – коэффициент микробного дыхания; P – уровень точности; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации. Почвенные параметры: a – содержание C<sub>орг</sub>, %; b – количество пор и пустот, %; c – содержание N<sub>общ</sub>, %; d – влажность, %; e – отношение C : N.

том CR. Внесение легкодоступного органического субстрата в значительной степени увеличило дыхательную активность микробного сообщества криоземов. В горизонтах O и AO скорость дыхания увеличилась в 4, в @ и [T] в 3, а в CR в 8 раз, что указывает на низкое качество органического вещества криоземов, сильно обедненных доступным для микроорганизмов субстратом. Величина Q<sub>r</sub> в профилях криоземов варьировала от <0.1 до 0.3. Коэффициенты <0.1, полученные для горизонтов CR, подтверждают, что микробное сообщество здесь, помимо неблагоприятных гидротермических условий, испытывает недостаток в доступном для питания органическом веществе. Величины Q<sub>r</sub> в интервале 0.1–0.2, характерные для почв естественных ценозов [1], получены для верхних горизонтов (O) и свидетельствуют о том, что микробное сообщество находится в относительно благоприятных для жизнедеятельности условиях. Величины Q<sub>r</sub> выше 0.2–0.3, полученные для AO, [T] и @, могут указывать на то, что на микроорганизмы здесь больше влияют неблагоприятные гидротермические условия, чем недостаток питательного субстрата.

Для определения степени влияния различных показателей на дыхательную активность микробного сообщества (V<sub>basal</sub>, V<sub>SIR</sub> и Q<sub>r</sub>) и содержание C<sub>мб</sub> в профилях криоземов был проведен множественный регрессионный анализ (табл. 4). Расчеты выполняли как для всего массива данных, так и отдельно для органогенных и минеральных горизонтов, а также для криотурбированных и погребенных фрагментов органогенного материала. В качестве независимых переменных в уравнениях регрессии использовали показатели: C<sub>орг</sub>, C<sub>пм</sub>, N<sub>общ</sub>, C : N, ППП, весовую влажность почв, а также количество пор и пустот в почвенных горизонтах.

Наиболее значимыми показателями вариативности значений V<sub>SIR</sub> и C<sub>мб</sub> в профиле было из-

менение содержания C<sub>орг</sub> и количество пор и пустот (R<sup>2</sup> = 0.67; P < 0.001), а величина V<sub>basal</sub> положительно коррелировала с величинами C<sub>орг</sub>, N<sub>общ</sub> и количеством пор и пустот (R<sup>2</sup> = 0.78; P < 0.001). Для верхних органогенных горизонтов выявлена значимая положительная зависимость величины C<sub>мб</sub> от содержания N<sub>общ</sub> и количеством пор и пустот (R<sup>2</sup> = 0.83; P < 0.001), а для минеральных горизонтов – от содержания C<sub>орг</sub> и отношения C : N (R<sup>2</sup> = 0.88; P < 0.001). Показатели влажности и количество пор и пустот объясняют 25 и 54% дисперсии коэффициента микробного дыхания (Q<sub>r</sub>) в органогенных и минеральных горизонтах соответственно. Для криотурбированных явтен и горизонта [T] статистически значимой зависимости содержания микробной биомассы и ее дыхательной активности от исследуемых почвенных показателей не выявлено.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процессы криогенного массообмена влияют на содержание и распределение C<sub>орг</sub> в профилях криоземов. Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества в профилях криоземов варьирует в пределах от 41 до 86 мг/100 г, что составляет 0.3–1.4% от валового органического вещества. Даже при оптимальных условиях температуры и влажности, созданных в лабораторных условиях, минерализационная способность преобладающей части органического вещества криоземов остается низкой. Криоземы характеризуются значительным варьированием содержания микробной биомассы, но при этом сохраняется общая закономерность ее распределения по профилю, с максимумами в верхних органогенных горизонтах и резким уменьшением в минеральных. Доля C<sub>мб</sub> в C<sub>орг</sub> по всему профилю криоземов не превышает 1%. В солифлюкцион-

но-погребенном торфяном горизонте содержалось больше  $C_{\text{мб}}$ , чем в минеральных горизонтах, но значительно меньше, чем в верхних органо-генных, при высоком содержании  $C_{\text{орг}}$  и  $N_{\text{общ}}$ . Доля  $C_{\text{мб}}$  в  $C_{\text{пм}}$  варьировала в пределах от 9 до 68%. Наибольшей долей микробной биомассы в минерализуемом пуле почвенного органического вещества характеризовались органо-минеральные горизонты АО, а наименьшей – СR.

Величина дыхательного коэффициента ( $Q_r$ ) в профилях криоземов варьировала от  $<0.1$  до  $0.3$ . Значения  $Q_r < 0.1$  получены для минеральных горизонтов,  $0.1-0.2$  – для верхних горизонтов (О), а  $>0.2$  – для горизонтов АО, [Т] и @. Множественный регрессионный анализ полученных данных показал, что наиболее значимое влияние на содержание микробной биомассы и ее дыхательную активность в органогенных и минеральных горизонтах криоземов оказывают содержание  $C_{\text{орг}}$ ,  $N_{\text{общ}}$  и количество пор и пустот в почве.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания АААА-А18-118013190181-6 (0191-2019-0044), ПП АААА-А18-118013190182-3 и при поддержке грантов РФФИ № 17-04-01397, 19-04-00125.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д., Мякшина Т.Н.* Характеристика состояния микробного сообщества почв по величине метаболического коэффициента // Почвоведение. 1995. № 2. С. 205–210.
2. *Гагарина Э.И.* Микроморфологический метод исследования почв. СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2004. 155 с.
3. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Надмерзлотные горизонты аккумуляции грубого органического вещества в криоземах тундр Севера Якутии: генезис, диагностические признаки и свойства, проблемы классификации. // Почвоведение. 2018. № 7. С. 1–11. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18070043>
4. *Губин С.В., Лупачев А.В.* Роль пятнообразования в формировании и развитии криоземов приморских низменностей севера Якутии // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1283–1295. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17110077>
5. *Губин С.В.* Динамика формирования тундровых неглеевых почв // Почвоведение. 1993. № 10. С. 62–70.
6. *Еловская Л.Г., Петрова Е.И., Тетерина Л.В.* Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979. 303 с.
7. *Караваева Н.А.* Тундровые почвы Северной Якутии. М.: Наука, 1969. 208 с.
8. *Караваева Н.А., Таргульян В.О.* Об особенностях распределения гумуса в тундровых почвах Северной Якутии // Почвоведение. 1960. № 12. С. 36–45.
9. *Кудеяров В.Н.* Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор) // Почвоведение. 2018. № 6. С. 643–658. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18060011>
10. *Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н.* Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества в почвах зонального ряда // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1232–1241. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15100068>
11. *Мергелов Н.С., Таргульян В.О.* Процессы накопления органического вещества в минеральной толще мерзлотных почв приморских низменностей Восточной Сибири // Почвоведение. 2011. № 3. С. 275–287.
12. *Семенов В.М., Кравченко И.К., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Гисперт М., Пардини Дж.* Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2006. № 3. С. 282–292.
13. *Семенов В.М., Тулина А.С.* Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрехимия. 2011. № 12. С. 53–63.
14. *Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С.* Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
15. *Семенов В.М., Козут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472.
16. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
17. *Фоминых Л.А.* Особенности почвообразования в Колымских тундрах // Почвоведение. 1997. № 8. С. 917–925.
18. *Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496–1504.
19. *Щепаченко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. <https://doi.org/10/7868/S0032180X13020123>
20. *Abakumov E.V., Lupachev A.V., Andreev M.* Trace elements content in soils of the King-George and Elephant islands, Maritime Antarctica // Chemistry and Ecology. 2017. <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1384821>
21. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. P. 215–221.



22. *Bockheim J.G., Tarnocai C.* Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soil // *Geoderma*. 1998. V. 81. P. 281–293.
23. *Hobbie S.E., Schimel J.P., Trumbore S.E., Randerson J.R.* Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils // *Global Change Biology*. 2000. № 6. P. 196–210.
24. *Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E.A.G., Ping C.L., Schirmermeister L., Grosse G., Michaelson G.J., Koven C.D., O'Donnell J.A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu.Z., Palmtag J., Kuhry P.* Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeosciences*. 2014. № 11. P. 6573–6593.
25. *Michaelson G.J., Dai X.Y., Ping C.L.* Organic matter and bioactivity in Cryosols of Arctic Alaska // *Cryosols*. Ed. Kimble J.M. 2004. P. 463–477.
26. *Ping C.L., Bockheim J.G., Kimble J.M., Michaelson G.J.* Characteristics of cryogenic soil along a latitudinal transect in Arctic Alaska // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 917–928.

## Quantification of Mineralizable Pool of Organic Matter in Tundra Cryosols of Kolyma Lowland

A. K. Khodzhaeva<sup>1, \*</sup>, A. V. Shatilovich<sup>1</sup>, S. V. Gubin<sup>1</sup>, and A. V. Lupachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, 142290 Russia*

*\*e-mail: akho2@rambler.ru*

The cryogenic mass-exchange processes affect the content and distribution of organic matter in Cryosol profiles enriching the mineral subsoil with organic matter. It is shown that the mineralization ability of most organic materials in Cryosols is low, even under optimum conditions of temperature and moisture. Despite the significant variation of microbial biomass content, the general pattern of its distribution in the profile is preserved, with maximum in organic horizons and a minimum in the mineral ones. The part of the microbial biomass carbon ( $C_{mb}$ ) in the total organic carbon is less than 1%. The microbial respiration coefficient ( $Q_r$ ) varies from less than 0.1 to 0.3. The most significant influence on the microbial biomass and changes in its respiratory activity in the profiles of Cryosols has the content of TOC, TN and soil porosity.

*Keywords:* tundra, Cryosol, cryoturbation, permafrost, potentially mineralizable organic matter, microbial biomass