

Влияние криогенеза на биоту почв (на примере юга Витимского плоскогорья)

Г. Д. ЧИМИТДОРЖИЕВА¹, Ю. Б. ЦЫБЕНОВ¹, Э. О. ЧИМИТДОРЖИЕВА¹,
Е. Ю. МИЛЬХЕЕВ¹, Т. Н. ЧИМИТДОРЖИЕВ²

¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

²Институт физического материаловедения СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: galdorj@gmail.com

Статья поступила 18.05.2019

После доработки 28.05.2019

Принята к печати 12.07.2019

АННОТАЦИЯ

Своеобразие палеогеографической обстановки на юге Витимского плоскогорья Забайкалья привело к формированию ландшафтов с многочисленными буграми пучения и термокарстовыми понижениями. На потепление климата криолитозона среагировала сокращением ареала, повышением температуры и глубины сезонного протаивания мерзлоты. Выявлена дифференциация почвенного профиля в буграх пучения и термокарстовых понижениях, которая привела к изменению морфологических и физико-химических свойств, вызвавших, в свою очередь, отклик биоты.

Ключевые слова: бугры пучения, термокарстовые понижения, черноземы квазиглеевые, глобальное потепление, реакция почвенного покрова, отклик биоты, юг Витимского плоскогорья.

В последние десятилетия одним из ключевых факторов функционирования криогенных экосистем стало глобальное потепление [Climate Change, 2014], в частности, наблюдается увеличение толщины деятельного слоя, повышение температуры, сокращение пространства и слитности мерзлых толщ [Romanovsky et al., 2010], а также активизация термокарста в некоторых регионах [Grosse et al., 2011]. Прогнозируемые и наблюдаемые климатические изменения могут проявляться не только в снижении первичной продуктивности ценозов [Ciais et al., 2005], но и в возможном усилении минерализации почвенного

органического вещества и повышении объемов эмиссии парниковых газов [Карелин, Замолдчиков, 2008; Schaefer et al., 2014]. Таяние содержащегося в грунте льда сопровождается преобразованием дневной поверхности и развитием опасных мерзлотных процессов: пучений и просадок, что приводит к изменениям свойств почв [Ларионова и др., 2010; Unger et al., 2010]. В свою очередь, это может сказаться на структуре и функционировании растительных сообществ [Bazzaz, Sombroek, 1996], а также повлиять на внутрпочвенный баланс углерода [Billings, Zeigler, 2005; Kudayarov et al., 2006]. Усиление пространственной неоднородности

родности накладывает отпечаток на количественный и качественный состав биоты [Добровольский, Чернов, 2011].

На мерзлотной территории южной части Витимского плоскогорья широко распространен бугристо-западинный микрорельеф, начало его формирования относят к сартанскому времени [Козлова и др., 2013]. 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. Р. В. Десяткин [2008] считает, что бугры пучения являются элементами термокарстовых форм рельефа и их образование связано с промерзанием влагонасыщенных талых слоёв под исчезающими озерами.

Климат, определяя энергетический уровень и гидротермический режим, влияет на физические, химические и биологические процессы, происходящие в почвах. Отсюда цель работы – выявить реакцию почвенного покрова на изменения климата на южной границе распространения многолетней мерзлоты.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований служили: почвенный покров, биота и биологическая активность почв с бугров пучения, термокарстовых понижений в сравнении с фоновыми черноземами квазиглеевыми юга Витимского плоскогорья. В ходе работ выбраны экспериментальные площадки (ЭП) с ярко выраженными криогенными явлениями, где заложены разрезы на всю мощность сезонно-талого слоя и отобраны пробы с шагом 10 см (с понижений до появления воды (80 см) и с бугров пучения до 100 см).

Общий углерод почвы вычисляли микрохромовым методом Тюрина, CO_2 карбонатов – методом, описанным в работе [Агрохимические методы..., 1975], углерод микробной биомассы – регидратационным методом [Благодатский и др., 1987]. Структуру микробиоценоза определяли методом прямой люминесцентной микроскопии [Звягинцев, 1991]. Рекогносцировочно изучен отклик напочвенной фауны на изменения условий их обитания на буграх пучения и понижениях в сравнении с неко-

симым степным участком экспресс-методом в период наибольшего прогревания верхнего слоя почвы (начало августа). Материал собран в стандартные почвенные ловушки с 96%-м раствором этанола в качестве фиксатора, выставленные по 10 экземпляров на биотоп: на почвенном стационаре, в понижениях и на буграх пучения, с экспозицией 24 ч.

Поток $\text{C}-\text{CO}_2$ измеряли камерным методом с использованием инфракрасного газоанализатора ОПТОГАЗ 500.4 с четырех площадок, которые отличались положением в мезо- и микрорельефе, водным режимом, видовым разнообразием и продуктивностью растительного покрова. Одновременно с определением эмиссии углекислоты измеряли температуру и влажность почвы в слое толщиной 0–20 см.

Запасы растительности определяли по Н. А. Панковой [1965] с разделением на отдельные виды, подземную и надземную части.

Распространение криоморфозов оценивали с помощью спутниковой радарной интерферометрии, широко используемой для количественной оценки деформаций земной поверхности различной природы [Татюков и др., 2012; Zakharov et al., 2013; Chimitdorzhiiev et al., 2016]. Метод основан на анализе разности фаз радиолокационных сигналов, полученных радаром с близко расположенных спутниковых орбит.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения деформации поверхности Витимского тестового полигона использованы снимки, сделанные со спутника ALOS-2 PALSAR-2 (L-диапазон с длиной волны 23,6 см) 14 сентября 2014 г. и 1 февраля 2015 г., и снимки бистатической системы TanDEM-X (X-диапазон, длина волны 3,1 см) за 14 октября 2011 г. По интерферометрическим параметрам изображений ALOS-2 PALSAR-2 рассчитаны значения вертикальных деформаций подстилающей поверхности, а по данным TanDEM-X составлена высокоточная цифровая модель рельефа.

На рис. 1 показано расположение тестового полигона и представлено радиолокационное изображение, спроецированное в географическую систему координат. Изображения в исходном разрешении продублированы на веб-странице: <http://omdoki.nextgis.com/>

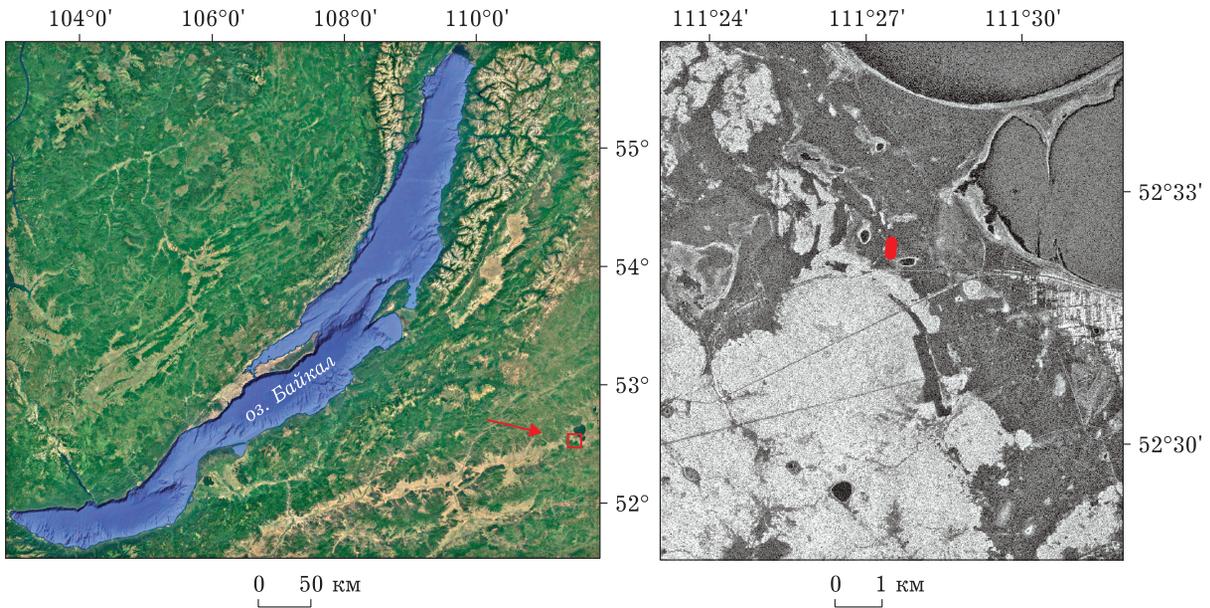


Рис. 1. Местоположение тестового полигона на мозаике спутниковых снимков Google и радиолокационном изображении ALOS-2 PALSAR-2.

Пояснения в тексте

resource/168/display?panel=layers, где можно также ознакомиться с другими иллюстрациями. Показаны участки с различными значениями обратного радарного рассеяния: яркие тона соответствуют объемным неоднородностям (лес, кустарник и т. д.), темные – ровным участкам (водная поверхность и т. д.). Пространственное разрешение радарного изображения составляет 10 м. Наземные исследования подтвердили хорошее разрешение радиолокационной интерферометрии при оценке

масштабов проявления криогенных деформаций поверхности.

Изменение гидротермических условий.

Отличительной чертой температурного режима почвы термокарстового понижения (рис. 2) является ее невысокая прогреваемость в летнее время. Активная температура в профиле почв понижений удерживается недолго (до 120 дней), проникая в глубь только до 30 см, тогда как в почвах бугров пучения – до 80 см (рис. 3).

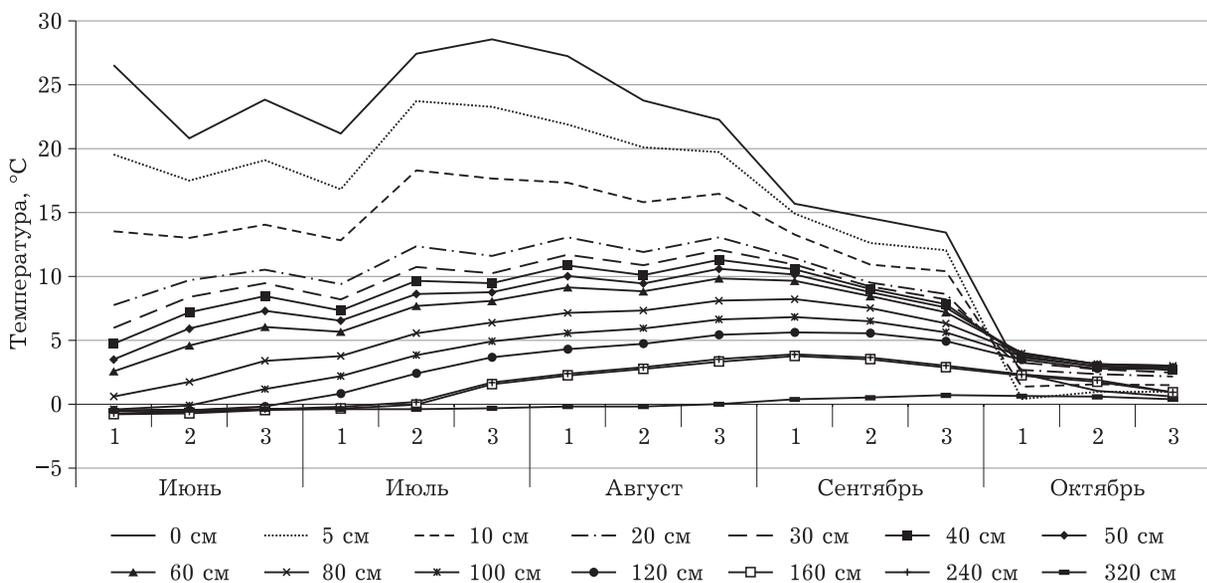


Рис. 2. Температурный режим термокарстового понижения. 1, 2, 3 – декады месяца

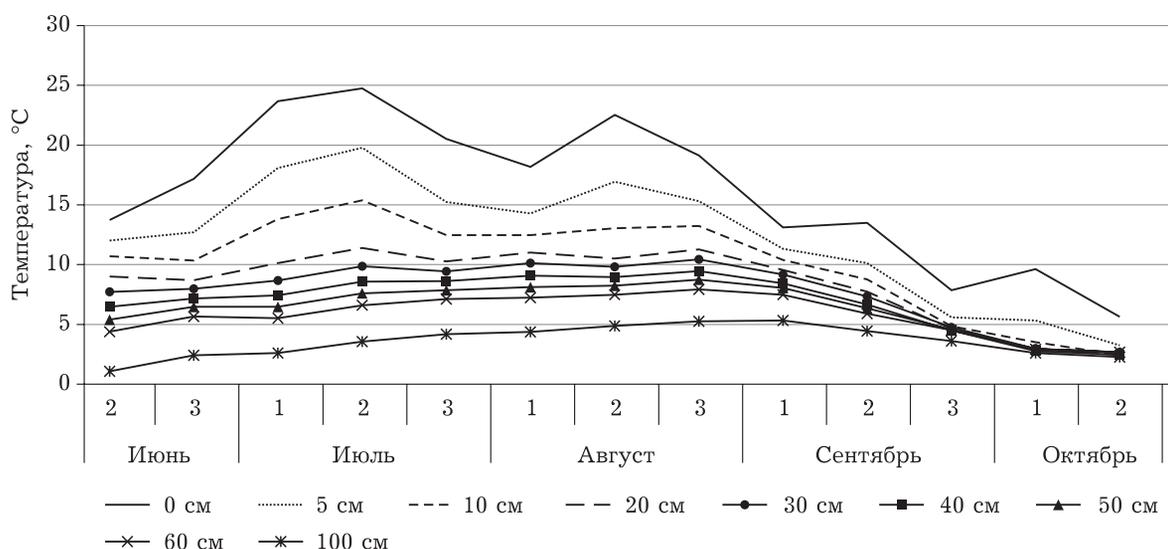


Рис. 3. Температурный режим бугра пучения. 1, 2, 3 – декады месяца

Продолжительность теплого и влажного сезонов составляет всего 2,5–3 месяца. В сентябре количество осадков значительно снижается, температура воздуха резко падает, наблюдаются заморозки. Максимальная влажность почв отмечается в мае (35–37 %), среднее ее значение за январь – октябрь составляет $21,97 \pm 6,14$ %.

Изменения в морфологии почвенного покрова. Морфологически микрорельеф исследуемых территорий представляет собой чередование бугров и западин округлой и овальной форм различных размеров. Диаметр бугров составляет 5–20 м, превышение над понижениями достигает 0,5–3,0 м.

Мощность гумусового горизонта фоновых почв составляет в среднем $24,5 \pm 4,0$ см ($n = 25$; $V = 16$ %), в повышениях – до 30 см, понижениях – 25 см.

В буграх пучения плотность почв варьирует от $1,25$ г/см³ в слое 0–10 см до $1,14$ г/см³ на глубине 10–20 см по сравнению с фоновыми почвами, где показатель составляет 1,05 и $1,12$ г/см³ соответственно. В почвах западин увеличение плотности по сравнению с контрольными почвами не отмечено (таблица).

В буграх пучения вследствие подъема глубинных растворов реакция среды приобретает слабощелочной характер, в слое 0–10 см – $7,71 \pm 0,66$ ($n = 3$), и самая высокая щелочность отмечена на глубине 110–120 см – $8,72 \pm 0,56$ ($n = 3$). Почвенный раствор в верхней части профиля окружающих почв ней-

тральный – pH 6,52–7,15, который становится слабощелочным и щелочным (pH 7,81–8,36) только с глубиной [Чимитдоржиева и др., 2015; Цыбенков и др., 2016; Чимитдоржиева, 2016]. Реакция среды почв из понижений более щелочная – 8,02–8,40 по сравнению с таковой из бугров пучения (см. таблицу).

Содержание углерода общего ($C_{\text{общ}}$) в верхнем горизонте фоновых почв составляет 7,54 %, в почвах бугров пучения в слое 0–10 см возрастает до 11,10 %, в 10–20 см – 6,38 %. Почвы понижений отличаются более высоким содержанием $C_{\text{общ}}$: 17,56 % в слое 0–10 см, 15,85 % – на глубине 10–20 см.

Запасы общего углерода в слое 0–20 см термокарстовых понижений составляют $33,6$ кг С/м², на глубине 0–50 см – 43,6, а в буграх пучения – соответственно 21,1 и 42,8 кг С/м², которые превышают таковые фоновых почв (14,3 и 16,7 кг) в 2,35 и 1,47 раза.

Растительность. По ботанико-географическому районированию исследуемая территория относится к Витимско-Байкальской провинции, где преобладают лиственничники (98 %) при незначительной примеси сосны. На изучаемых черноземах распространено злаково-разнотравно-полынное сообщество с проективным покрытием (ПП) 90 %, трехъярусным травостоем с общим количеством видов – 22, из них: мезофитов – 28 %, ксерофитов – 72 % [Пигарева и др., 2017]. Первый ярус представлен содоминантом вейником наземным *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth с ПП

Характеристика почв бугров пучения и термокарстовых понижений

Почвенный профиль	Глубина, см	Мощность, см	Плотность, г/см ³	pH	C _{общ.} , %	C _{мб.} , мг/100 г почвы	C-CO ₂ , кг/м ² /ч	Частицы размером < 0,01 мм
Бугры пучения	0-10	30,0 ± 11,15 37	$\frac{1,25 \pm 0,26}{20,42}$	$\frac{7,71 \pm 0,66}{8,50}$	$\frac{11,10 \pm 2,69}{24,2}$	$\frac{83,70 \pm 9,30}{11,11}$	103,7 ± 9,6 9,27	$\frac{12,4 \pm 9,9}{79,3}$
	10-20		$\frac{1,14 \pm 0,09}{7,60}$	$\frac{7,35 \pm 0,31}{4,18}$	$\frac{6,38 \pm 1,88}{29,48}$	$\frac{78,61 \pm 6,01}{7,65}$		$\frac{19,9 \pm 12,8}{64,2}$
	20-30		$\frac{1,39 \pm 0,16}{11,24}$	$\frac{7,65 \pm 0,57}{7,38}$	$\frac{7,97 \pm 1,51}{19,01}$	$\frac{39,52 \pm 8,48}{21,47}$		$\frac{22,7 \pm 9,7}{42,6}$
	30-40		$\frac{1,39 \pm 0,16}{11,24}$	$\frac{7,75 \pm 0,60}{7,75}$	$\frac{6,00 \pm 2,08}{34,68}$	$\frac{23,05 \pm 7,15}{31,03}$		$\frac{19,7 \pm 7,6}{38,7}$
	40-50		$\frac{1,33 \pm 0,25}{19,07}$	$\frac{7,81 \pm 0,63}{8,11}$	$\frac{1,64 \pm 0,38}{23,41}$	$\frac{16,5 \pm 5,16}{31,21}$		$\frac{20,1 \pm 8,4}{41,9}$
Термокарстовые понижения	0-10	25,25 ± 5,5 22	$\frac{0,93 \pm 0,15}{16,13}$	$\frac{8,02 \pm 0,09}{1,06}$	$\frac{17,56 \pm 2,26}{12,87}$	$\frac{178,1 \pm 32,30}{18,14}$	185,7 ± 24,9 13,38	$\frac{23,6 \pm 14,7}{62,4}$
	10-20		$\frac{1,09 \pm 0,01}{0,92}$	$\frac{8,05 \pm 0,06}{0,68}$	$\frac{15,85 \pm 0,55}{3,44}$	$\frac{120,85 \pm 10,45}{8,65}$		$\frac{21,6 \pm 12,5}{57,8}$
	20-30		$\frac{1,24 \pm 0,04}{3,23}$	$\frac{8,26 \pm 0,12}{1,45}$	$\frac{4,96 \pm 0,65}{13,11}$	$\frac{28,4 \pm 0,80}{2,82}$		$\frac{28,6 \pm 14,6}{50,9}$
	30-40		$\frac{1,37 \pm 0,10}{6,92}$	$\frac{8,4 \pm 0,02}{0,18}$	$\frac{1,39 \pm 0,09}{6,47}$	$\frac{26,95 \pm 6,95}{25,79}$		$\frac{34,3 \pm 4,9}{14,21}$
	40-50		$\frac{1,37 \pm 0,01}{0,73}$	$\frac{8,4 \pm 0,07}{1,19}$	$\frac{1,39 \pm 0,01}{0,72}$	$\frac{17,87 \pm 3,70}{29,31}$		$\frac{33,5 \pm 3,4}{10,3}$
Чернозем квази-глеевый	0-10	24,5 ± 4,0 16	$\frac{1,05 \pm 0,02}{1,90}$	$\frac{6,52 \pm 0,25}{3,83}$	$\frac{7,54 \pm 0,35}{4,57}$	$\frac{144,22 \pm 25,44}{17,64}$	115,0 ± 35 30,43	$\frac{42,56 \pm 7,83}{18,41}$
	10-20		$\frac{1,12 \pm 0,03}{2,68}$	$\frac{7,15 \pm 0,24}{3,36}$	$\frac{5,66 \pm 2,10}{37,03}$	$\frac{131,69 \pm 22,41}{17,02}$		$\frac{42,10 \pm 8,11}{19,26}$
	20-30		$\frac{1,43 \pm 0,01}{0,69}$	$\frac{7,81 \pm 0,22}{2,82}$	$\frac{0,83 \pm 0,31}{37,49}$	$\frac{25,41 \pm 4,63}{18,23}$		$\frac{39,5 \pm 1,32}{3,35}$
	30-40		$\frac{1,52 \pm 0,02}{1,32}$	$\frac{8,26 \pm 0,13}{1,63}$	$\frac{0,42 \pm 0,02}{4,76}$	$\frac{21,47 \pm 2,76}{12,86}$		$\frac{40,77 \pm 1,66}{4,08}$
	40-50		$\frac{1,56 \pm 0,01}{0,64}$	$\frac{8,36 \pm 0,31}{3,71}$	$\frac{0,46 \pm 0,03}{6,69}$	$\frac{13,8 \pm 1,67}{12,10}$		$\frac{36,77 \pm 6,93}{18,84}$

Примечание. Над чертой – средняя арифметическая ± средняя ошибка средней арифметической ($M \pm m$), под чертой – коэффициент вариации ($V, \%$).

(19 %), второй – доминантом польнью замещающей *Artemisia commutata* Bess. с ПП (65 %), третий – гетеропапрусом алтайским *Heteropappus altaicus* (Willd.) и астрагалом южно-сибирским *Astragalus austrosibiricus* Schischkin (ПП по 7 %). Продуктивность этого фитоценоза на 73 % формируется разнотравьем.

Это фитосообщество трансформируется на почвах северных склонов бугров на разнотравно-злаково-полынную растительность с 95%-м ПП с доминантами из плотнокустовых

ксерофитов и мезофитов: мятлик оттянутый (*Poa attenuata* Trin.), вострец китайский (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvelev), щавель обыкновенный (*Rumex acetosa* L.), полынь замещающая (*Artemisia commutata* Bess.), а на южных склонах – эта же растительность с ПП 80 % и теми же доминантами, однако здесь появляется осока твердоватая (*Carex duriuscula* Meyer). Из фитоценоза исчезает разнотравье корневищное: тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), подмаренник настоя-

щий (*Galium verum* L.), кустовые: василек луговой (*Centaurea jacea* L.), лютик (*Ranunculus*), лилии (*Lilium pulchellum*).

Растительное сообщество на почвах понижений меняется на злаковое разнотравье с покрытием 70–80 %, где господствуют пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), лапчатка сжатая (*Potentilla conferta* Bunge), млечник приморский (*Glaux maritima* L.). А на понижениях с заросшим озером наибольшее развитие получили хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), встречаются осока Редовского (*Carex parallela* subsp. *redowskiana* Meyer), лапчатка сжатая (*Potentilla conferta* Bunge) и редко – подорожник прижатый (*Plantago depressa* Schlecht L.). На западинах с пересыхающим озером с кустарниками по краям местами преобладают осоки остистая (*C. atherodes* Sprengel) и Редовского (*Carex parallela* subsp. *redowskiana* Meyer), подорожник прижатый (*Plantago depressa* Schlecht L.), хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.).

Напочвенная мезофауна. Наши рекогносцировочные исследования показали, что на буграх пучения отмечено до 22 семейств беспозвоночных, тогда как на фоновой почве встречены представители лишь 11 семейств. Численность беспозвоночных в почвах бугров возрастает втрое, а биомасса почти в 6 раз, что объясняется лучшим прогреванием и преобладанием злакового разнотравья. Линифиды, сенокосцы и пилюльщики практически исчезают. В число доминирующих групп входят чернотелки и муравьи. Субдоминантами являются настоящие саранчовые, жужелицы. Среди жужелиц массово встречаются *Poecilus fortipes*, *Amara infuscata*, обычны *Harpalus*. Следует отметить наличие в сборах значительного количества пауков из родов *Pardosa* и *Alopecosa* (пауки-волки), бродячих пауков (*Gnaphosidae*), представителей рода *Dorcadion* (Cerambycidae), настоящих мух (*Muscidae*). Появляются характерные представители степей – настоящие кузнечики (*Tettigonidae*), нарывники (*Meloidae*), осы-немки (*Mutillidae*). Численность коллембол ожидаемо невелика – около 7500 экз. Условия обитания этих беспозвоночных оказываются здесь пессимальными.

На термокарстовых понижениях наблюдается обеднение таксономического состава беспозвоночных по сравнению с буграми пучения,

где число семейств сокращается до 13. В мезофауне появляются моллюски, паукообразные, насекомые. Из истинно напочвенных беспозвоночных обычны пауки из родов *Pardosa* (Lycosidae), *Erigone* (Linyphiidae), сенокосцы (Opiliones), наземные клопы (Lygaeidae), имаго и личинки жужелиц (Carabidae), среди которых отмечены представители родов *Amara*, *Curtonotus*, *Harpalus*, муравьи (Formicidae). Также нередкими в сборах оказались пилюльщики (*Byrrhidae*). Среди растительноядных насекомых лидируют настоящие саранчовые (Acrididae), чернотелки (Tenebrionidae), цикадовые (Cicadinea). В понижениях рельефа, как и в пределах почвенного разреза, в небольшом количестве обнаружены катушки (Planorbidae), представители моллюсков. Ногохвостки (Collembola, Entognatha) определены в количестве от 7500 до 480000 экз. Наличие линифид, сенокосцев, коллембол свидетельствует о значительном увлажнении субстрата.

Углерод микробной массы. Максимальное содержание $C_{мб}$ в почвах бугров пучения составляет 83,7 мг/100 г на глубине 0–10 см, 78,6 мг – 10–20 см, с глубиной уменьшается до 16,5. В почвах термокарстовых понижений в верхнем слое 0–10 см содержание $C_{мб}$ составляет 178,1 мг/100 г, на глубине 10–20 см – 120,8 мг, объяснимое обилием ризосферной микрофлоры, а на глубине 20–30 и 30–40 см отмечено его снижение до 28 мг в соответствии с убыванием общего углерода. Содержание $C_{мб}$ в фоновых мерзлотных почвах в верхнем слое (0–10 см) составляет $144,2 \pm 25,4$ мг на 100 г почвы ($V = 17,6 \%$), вниз по профилю (в 10–20 см) снижается до $131,7 \pm 22,4$ мг ($V = 17,0 \%$), а на глубине 40–50 см – всего 13,8 мг.

Расчет коэффициентов вариации показал, что совокупность данных однородна, т. е. значима. Данные углерода микробной биомассы имеют сильную корреляционную связь с данными органического углерода ($r = 0,73-0,99$), влажностью ($r = 0,76-0,94$) и температурой ($r = -0,97-0,99$) почвы.

Структура микробиоценоза. Во всех почвах наибольшая численность микроорганизмов приходится на верхние гумусированные горизонты, тогда как на буграх пучения в слое 0–10 см она минимальна – $0,52 \cdot 10^9$ кл/г почвы. С глубиной этот показатель увеличивается до $1,64 \cdot 10^9$ (глубина 20–30 см) и $3,49 \cdot 10^9$ (глубина 30–40 см). Однако, начиная с глубины

40 см, наблюдается заметное снижение численности бактерий.

Распределение бактерий по почвенному профилю термокарстового понижения отличалось довольно равномерной дисперсией. В верхнем слое (0–10 см) численность бактерий составила $1,64 \cdot 10^9$ кл/г почвы, наибольшая плотность этой группы микроорганизмов сосредоточена в слое 10–20 см – $2,78 \cdot 10^9$, вниз по профилю численность убывает.

Наибольшее содержание актиномицетного мицелия наблюдалось в почвах бугров пучений (0,04 м/г почвы). Максимальная концентрация приурочена к карбонатному горизонту (слой 60–70 см). В почвах термокарстовых понижений длина мицелия была существенно ниже и вниз по профилю убывала слабо.

Наибольшая численность спор грибов отмечена в почвах бугров пучений – 0,09 м/г почвы. Низкие значения данного показателя характерны для почв термокарстовых понижений – менее 0,02 м/г почвы.

В ходе исследований установлено, что эмиссия диоксида углерода из изучаемых экосистем в целом невысока и составляла в среднем за вегетационный сезон $103,7 \pm 55,3$ мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}^{-1})$ с трех участков бугров, $185,3 \pm 58,7$ мг – с поверхности термокарстовых понижений и $115,0 \pm 35,0$ мг – из чернозема квазиглеевого.

Вариабельность потоков CO_2 из бугров и понижений составила 9–13 %, тогда как эта цифра из фоновых почв значительна – 31 %. Повышенную вариабельность эмиссии CO_2 обусловили: тип растительности, реакция среды, плотность почвы, накопление микробиоты, гидротермические условия, корневое дыхание, а также качество и количество питательного субстрата.

Расчет парных коэффициентов корреляции между среднесуточными потоками диоксида углерода и температурой почвы показал относительно идентичную положительную связь как для термокарстовых понижений ($r = 0,75–0,85$), бугров пучения ($r = 0,78–0,80$), так и для чернозема квазиглеевого ($r = 0,73–0,77$). А таковая между выделением CO_2 и влажностью почвы составила $r = 0,53–0,92$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных космического мониторинга показал, что в Еравнинской котловине на юге

Витимского плоскогорья в связи с благоприятными условиями водного питания бугры пучения чаще всего приурочены к подгорным шлейфам и плоским водоразделам. Встречается площадное и локальное пучение, которое может возникать вследствие неоднородности условий промерзания, обводненности, состава пород и других факторов. В результате формируются различные по форме и размерам бугры пучения. Заметнее всего в рельефе проявление локального пучения (бугры, полосы пучения). Ширина бугров достигает десятков метров, а превышений над окружающей поверхностью – 1,5–2 м.

Термокарст на дневной поверхности выражен в виде локальных провально-просадочных форм. Вследствие дифференциации льдистости почвогрунтов по элементам рельефа термокарстовые воронки, нередко заполненные водой, в основном формируются в днищах котловин, а также на широких выровненных суглинистых водоразделах. Термокарстовые озерки, занимавшие 50–60 лет назад значительные площади, в связи с потеплением климата в настоящее время высыхают, а бугры пучения оседают.

Особенностью температурного режима почвы термокарстового понижения является ее невысокая прогреваемость, обусловленная затеняющим действием напочвенного покрова трав. Это приводит к позднему началу протаивания – середина апреля. Максимальная глубина до кровли мерзлоты составила 310 см. В конце вегетационного сезона по мере уменьшения интенсивности приходящей радиации начинается выхолаживание почвы, и в конце сентября температура опускается ниже порога биологически активных температур, а в третьей декаде октября по всему профилю наблюдаются отрицательные значения. В зимний период происходит смыкание сезонной мерзлоты с многолетней и образуется сплошная криолитозона с большим «запасом холода».

Следует отметить, что изменения в морфологии почвенного покрова значительны, поскольку при формировании бугров пучения и термокарстовых понижений образуется специфический мерзлотный бугристо-западинный рельеф, где последний является универсальным перераспределителем тепла и влаги. В буграх пучения отмечается ва-

рыирование мощности горизонта А1, увеличение плотности почв, меняется реакция среды. Криогенные процессы, обусловившие коагуляцию и дегидратацию органоминеральных соединений, приводят к накоплению в почвах бугров пучения легких фракций, отсюда в верхних горизонтах почва супесчаная и легкосуглинистая, а в понижениях – легко- и среднесуглинистая при тяжелосуглинистой фоновой почве.

Содержание углерода общего ($C_{\text{общ}}$) в верхнем горизонте бугров пучения выше по сравнению с фоновыми почвами вследствие подтягивания из глубины, возможно, фракций углерода литогенного и пирогенного происхождения. Высокое количество общего углерода в понижениях объяснимо длительной аккумуляцией органического вещества в водной стадии. В почвах термокарстовых понижений запасы $C_{\text{общ}}$ выше за счет многолетнего накопления органического вещества водной растительностью, а при последующем длительном периоде высыхания озер активизировалась микробиологическая деятельность, последняя усилила минерализационные процессы, этим самым увеличила эмиссионный поток диоксида углерода в атмосферу.

Анализ фитоценоза показал, что из сообщества исчезает много ценных видов растений, свидетельствуя об их угнетении и деградации, связанные с изменениями в морфологии и свойствах почв, которые произошли в результате пучений и просадок. Взамен им появляются непродуктивные осоковые, хвощи, подорожник. При учете надземной, подземной и общей фитомассы выявлено, что биопродуктивность травостоя с бугров пучения составляет $2,08 \text{ кг/м}^2$ и находится наравне с пастбищным вариантом – $2,05$, но значительно ниже по сравнению с таковым понижений – $2,50 \text{ кг/м}^2$.

Анализ напочвенной мезофауны показал, что на буграх пучения в условиях более разнообразного состава растительности, с элементами остепнения, и более значительного прогревания почвы насекомые достигают наибольшего таксономического разнообразия, самых высоких значений численности и биомассы в общем ряду исследованных биотопов.

Выявлено, что накопление $C_{\text{мб}}$ в почвах бугров пучения меньше, несмотря на то что в них больше общего углерода, чем в окру-

жающих почвах. По-видимому, этот углерод представлен большей частью труднодоступной для микрофлоры формой. В термокарстовых понижениях в соответствии с количеством общего углерода много микробной биомассы – $178,1 \text{ мг}$, объясняемой обилием питательного углеродистого субстрата.

Следует отметить, что все изученные почвы отличаются по запасам микробной биомассы, соотношению разных групп (грибы, бактерии и актиномицеты) и их распределению, причем в соотношении численности различных групп микроорганизмов по профилю наблюдаются существенные вариации.

Очевидно, невысокий уровень энергетического обеспечения, глубокое промерзание почвенного профиля и значительное их иссушение в весенне-летний период (май – июль) отразились на почвенной биоте возвышений. В термокарстовых понижениях наблюдается та же тенденция снижения численности вниз по профилю при общей низкой численности клеток, чем на бугре пучения. Отмечено, что в тех почвах, где складывается более благоприятный водно-воздушный режим, численность бактерий значительно выше. В более засушливых условиях преобладают актиномицеты.

Продуцирование CO_2 почвами является чувствительным и информативным показателем биологического состояния экосистемы в целом и в каждый конкретный момент времени. Наблюдения за интенсивностью продуцирования углекислоты почвой показали значительную изменчивость процесса дыхания почвы. Выявлено, что преимущество вклада в парниковый эффект сохраняется за почвами понижений, объясняемое оптимальным увлажнением, обилием общей фитомассы и, соответственно, бурной микробиологической деятельностью. В условиях экстроконтинентального климата весной и осенью наибольшее влияние на выделение CO_2 из почв оказывает температура, а в летний период – влажность. Определяющим фактором величины потока CO_2 для криогенных экосистем являлась в первую очередь температура почвы.

ВЫВОДЫ

1. Дистанционное зондирование позволяет оценить ареалы распространения бугров пучения и термокарстовых просадок. Наземная

заверка ареалов деформаций поверхности рельефа подтвердила хорошее разрешение радиолокационной интерферометрии при оценке интенсивности и картировании областей распространения криогенных процессов, в частности зон пучения и термокарстовых понижений.

2. Появившиеся во время похолодания в сарганский период большие площади пучения и просадок в почвенном покрове на юге мерзлотного Витимского плоскогорья в настоящее время при потеплении климата испытывают значительные изменения в морфологии, физико-химических свойствах квазиглеевых черноземов, что приводит к смене фитоценоза, микробиоты с мезофауной.

3. Из термокарстовых понижений исчезает ценный травостой, как следствие, происходит обеднение разнообразия напочвенных беспозвоночных, где их численность по сравнению с буграми пучения уменьшилась втрое, биомасса – в 2,5 раза, таксономическое разнообразие – вдвое. Обратная картина наблюдается в отношении гигрофильных микроартропод (ногихвостки) – их численность уменьшается значительно.

4. В почвах понижений отмечается большее накопление углерода, отсюда выше в них общая биологическая активность и интенсивность эмиссии C–CO₂, т. е. вклад криогенных ландшафтов в глобальный парниковый эффект возрастает.

5. Изменение климата приводит к возрастанию сезонно-талого слоя в мерзлотном квазиглеевом черноземе, т. е. мерзлота уходит в глубину, и, следовательно, ее граница отодвигается на север.

Работа авторов Г. Д. Чимитдоржиевой, Ю. Б. Цыбенкова, Э. О. Чимитдоржиевой, Е. Ю. Мильхеева выполнена в рамках темы госзадания № АААА-А 17-117011810038-7 «Эволюция, функционирование и эколого-биогеохимическая роль почв Байкальского региона в условиях аридизации и опустынивания, разработка методов управления их продукционными процессами», Т. Н. Чимитдоржиева – в рамках темы госзадания № 0336-2019-0005 «Микроволновая интерферометрия и поляриметрия в дистанционном зондировании земной поверхности». Авторы признательны японскому агентству аэрокосмических исследований JAXA за данные ALOS PALSAR и ALOS-2 PALSAR-2, предоставленные по проекту RA6 (PI 3402), и немецкому аэрокосмическому центру DLR за данные TanDEM-X, предоставленные по проекту XTI_HYDR 0485. Аналитические работы выполнены

при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ № 16-04-01297.

Авторы выражают огромную благодарность сотрудникам лаборатории экологии и систематики животных ИОЭБ СО РАН н. с. С. Г. Рудых и с. н. с. Л. Ц. Хобраковой за определение напочвенной мезофауны.

ЛИТЕРАТУРА

- Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
- Благодатский С. А., Благодатский Е. В., Горбенко А. Ю., Паников Н. С. Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве // Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.
- Десяткин Р. В. Почвообразование в термокарстовых котловинах-аласах криолитозоны. Новосибирск, 2008. 319 с.
- Добровольский Г. В., Чернов И. Ю. (ред.) Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2011. 273 с.
- Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 304 с.
- Карелин Д. В., Замолотчиков Д. Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
- Козлова А. А., Кузьмин В. А., Зазовская Э. П. Почвы палеокриогенных бугристо-западинных ландшафтов Южного Предбайкалья // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1181–1192.
- Ларионова А. А., Курганова И. Н., Лопес де Геренно В. О., Золотарева Б. Н., Евдокимов И. В., Кудеяров В. Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата // Почвоведение. 2010. № 2. С. 186–195.
- Панкова Н. А. Учет надземной массы и корней растений в процессе роста // Агрохимические методы исследований почв. М.: Наука, 1965. С. 60–62.
- Пигарева Н. Н., Убугунов Л. Л., Кожевников Н. М. Продуктивность лугово-пастбищных ценозов в криолитозоне Западного Забайкалья при внесении редкоземельных и минеральных удобрений. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2017. 198 с.
- Татьяков Г. И., Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Хаптанов В. Б., Захаров А. И., Балданов Н. Д., Мухорин Е. А., Цыбенков Ю. Б. Применение спутниковой радарной интерферометрии Alos Palsar для картирования ареалов распространения и измерения интенсивности криогенного пучения грунтов // Инженерные изыскания. 2012. № 9. С. 40–46
- Цыбенков Ю. Б., Чимитдоржиева Г. Д., Чимитдоржиева Э. О., Егорова Р. А., Мильхеев Е. Ю., Давыдова Т. В., Корсунова Ц. Д.-Ц. Морфологические и физические свойства почвенной массы из криогенных трещин мерзлотных лугово-черноземных почв Забайкалья // Почвоведение. 2016. № 8. С. 975–981. [Tsybenov Yu. B., Chimitdorzhieva G. D., Chimitdorzhieva E. O., Egorova R. A., Milkheev E. Yu., Davydova T. V., Korsunova Ts. D.-Ts. Morphology and physical properties of soil material in cryogenic cracks of permafrost-affected meadow-chnozemic soils of the Trans-Baikal region // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49, N 8. С. 908–914.]

- Чимитдоржиева Г. Д. Органическое вещество холодных почв. Улан-Удэ, 2016. 386 с.
- Чимитдоржиева Э. О., Цыбенков Ю. Б., Чимитдоржиева Г. Д. Углерод гумуснесущих криогенных “морфонов” гидротермоморфизированных черноземов Забайкалья // *Агрохимия*. 2015. № 9. С. 14–19.
- Bazzaz F., Sombroek W. Global climate change and agricultural production. In *FAO, Ed., Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological Pedological and Plant Physiol. Proc. Wiley / FAO. Rome, 1996. P. 66–80.*
- Billings S. A., Ziegler S. E. Linking microbial activity and soil organic matter transformations in forest soils under elevated CO₂ // *Global Change Biol.* 2005. Vol. 11. P. 203–212. DOI:10.1111/j.1365-2486.2005.00909.x
- Chimitdorzhiev T. N., Dagurov P. N., Bykov M. E., Dmitriev A. V., Kirbizhekova I. I. Comparison of AlosPalsar interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal lake region, Russia // *J. Appl. Remote Sensing*. 2016. Vol. 10, N 1. C. 016006.
- Ciais Ph., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Oge'e J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer Chr., Carrara A., Chevallier F., de Noblet N., Friend A. D., Friedlingstein P., Gruenwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J. M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J. F., Sanz M. J., Schulze E. D., Vesala T., Valentini R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 // *Nature*. 2005. Vol. 437, N 22 September 200. DOI:10.1038/nature03972
- Climate Change, 2014. Synthesis Report. [Электронный ресурс]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR_5_FINAL_full_wcover.pdf
- Grosse G., Harden J., Turetsky M., McGuire A., Camill P., Tarnocai C., Froking S., Schuur E., Jorgenson T., Marchenko S., Romanovsky V., Kimberley P. Wickland, French N., Waldrop M., Bourgeau-Chavez L., Striegl R. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance // *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. G00K06. DOI:10.1029/2010JG001507
- Kudeyarov V. N., Biel K., Blagodatsky S. A., Semenov V. M., Dem'yanova E. G., Dorodnikov M. V. Fertilizer effect of the increasing CO₂ concentration // *Eur. Soil Sci.* 2006. Vol. 39. Suppl. 1. P. 6–14.
- 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 Proc.* 2010. Vol. 21 (2). P. 136–155, <https://doi.org/10.1002/ppp.683>
- Schaefer K., Lantuit H., Romanovsky V., Schuur E., Witt R. The impact of the permafrost carbon feedback on global climate // *Environ. Res. Lett.* 2014. Vol. 9, N 8. 085003. P. 9. DOI:10.1088/1748-9326/9/8/085003.
- Unger M., Bond T. C., Wang J. S., Koch D. M., Menon S., Shindell D. T., Bauer S. Attribution of climate forcing to economic sectors // *PNAS*. 2010. Vol. 107, N 8. P. 3382–3387.
- Zakharov A. I., Epov M. I., Mironov V. L., Chymitdorzhiev T. N., Bykov M. E., Seleznev V. S., Emanov A. F., Cherepenin V. A. Earth surface subsidence in the Kuznetsk coal basin caused by manmade and natural seismic activity according to AlosPalsar interferometry // *IEEE J. Selected Top. in Appl. Earth Observations and Remote Sensing*. 2013. Vol. 6, N 3. P. 1578–1583.

Influence of cryogenesis on soil biota (by the example of the south of the Vitim Plateau)

G. D. CHIMITDORZHIEVA¹, Yu. B. TSYBENOV¹, E. O. CHIMITDORZHIEVA¹,
E. Yu. MILKHEEV¹, T. N. CHIMITDORZHIEV²

¹*Institute of General and Experimental Biology of SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6*

²*Institute of Physical Materials of SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6
E-mail: galdorj@gmail.com*

The peculiarity of the paleogeographic situation in the south of the Vitim Plateau of the Transbaikalia led to the formation of landscapes with numerous heaving mounds and thermokarst depressions. The cryolithozone responded to the climate warming by reducing the area, increasing the temperature and depth of seasonal thawing of permafrost. The differentiation of the soil profile in the helix mounds and thermokarst depressions, which led to changes in the morphological, physicochemical properties, which in turn caused the response of the biota, was revealed.

Key words: heaving hillocks, thermokarst depressions, quasigleic chernozems, global warming, soil cover reaction, biota response, south of the Vitim Plateau.