

УДК 550.379:528.8

УСТАНОВЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ЮГЕ ВИТИМСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

¹Чимитдоржиева Г.Д., ²Хаптанов В.Б., ¹Цыбенков Ю.Б.¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, e-mail: galdorj@gmail.com;²Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

Приведены результаты георадарного зондирования бугров пучения в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья, на южной границе распространения многолетнемерзлых пород. Бугры пучения в районе исследования чаще всего приурочены к подгорным шлейфам и плоским водоразделам. Ширина бугров достигает десятков метров, а превышений над окружающей поверхностью – до 1,5–2 м. Проведено георадарное зондирование прибором «Око-2» двух групп бугров пучения, которые в географическом отношении можно отнести к западной и восточной частям Еравнинской котловины. По результатам зондирования первой группы получены радарограммы, характеризующие общее плоскостное строение грунта с небольшими дислокациями и деформациями криогенного происхождения. На глубине 2–3 м от поверхности наблюдается зона повышенного затухания сигнала георадара, что связано с нахождением здесь верхней кровли мерзлого грунта. Также по затуханию сигнала георадара, более выраженного на высоких частотах, прослеживается изменение влажности грунта. На радарограммах, полученных на восточной группе бугров пучения, более выражены нарушения плоскостной структуры грунта не только дислокациями, но и неравномерным проседанием при оттаивании льдосодержащего грунта в теле бугров, что приводит к образованию кратерообразного углубления на вершине. Проведенное георадарное исследование бугров пучения Еравнинской котловины позволило установить положение кровли мерзлоты на глубине 3,1 м в период измерений 09.08.2017 г. Надо полагать о том, что она могла быть обнаружена и глубже, чем 3,1 м, так как еще два месяца август и сентябрь были очень жаркими в этом году. Измерение надо проводить только после окончания периода с высокими атмосферными температурами. По выявленным различиям в строении западной и восточной групп бугров Еравнинской котловины можно сделать вывод о различной стадии их криогенеза.

Ключевые слова: георадар, зондирование, бугры пучения, многолетняя мерзлота

ESTABLISHMENT OF THE MELTING DEPTH OF MULTILATERAL FROZEN ROCKS ON THE SOUTH OF THE VITIM PLANE WITH THE USE OF GEO RADAR SENSING

¹Chimitdorzhieva G.D., ²Khaptanov V.B., ¹Tsybenov Yu.B.¹Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the RAS, Ulan-Ude, e-mail: galdorj@gmail.com;²Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, Ulan-Ude

The results of georadar sounding of the swelling beaks in the Eravninsky basin of the south of the Vitim plateau are presented, at the southern boundary of the distribution of permafrost. The tuberculosis in the study area is most often confined to submerged plumes and flat watersheds. The width of the hillocks reaches tens of meters, and the elevations above the surrounding surface are up to 1.5–2 m. Gyro-radar sounding with the «Oko-2» device was carried out by 2 groups of tubercle bumps, which geographically can be attributed to the western and eastern parts of the Erevan basin. Based on the results of sounding the first group, radargrams were obtained characterizing the general planar-layered structure of the soil with small dislocations and deformations of cryogenic origin. At a depth of 2–3 m from the surface, there is a zone of increased attenuation of the GPR signal, which is connected with the presence of the top roof of frozen ground here. Also, due to attenuation of the GPR signal, which is more pronounced at high frequencies, a change in the soil moisture can be traced. Radargrams obtained from the eastern group of swelling blasts show more pronounced disturbances in the planar layer structure of the ground, not only by dislocations, but also by uneven subsidence during the thawing of ice-containing soil in the body of the hillocks, which leads to the formation of a crater-like depression at the apex. The carried out georadar study of the Eravninsky depression basin allowed to determine the position of the permafrost at a depth of 3.1 m during the measurement period on August 9, 2017. It should be assumed that it could be detected and deeper than 3.1 m, since two more months August and September were very hot this year. The measurement should be carried out only after the end of the period with high atmospheric temperatures. According to the revealed differences in the structure of the western and eastern groups of the Eravninsky depression basins, it can be concluded that the stages of their cryogenesis are different.

Keywords: georadar, sounding, drill holes, permafrost

Принцип действия георадара основан на зондировании электромагнитными импульсами земной поверхности на различную глубину и восстановлении картины раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью по отраженному сигналу [1, 2].

Этот подход можно рассматривать в качестве одного из направлений гносеологического познания природных объектов, в том числе и почвенного покрова, и формирования картины пространственной организации территории [3].

За последние десятилетия георадиолокация как неразрушающий метод успешно используется при изучении подповерхностных сред. Специалистами накоплен огромный положительный опыт как в проведении полевых работ, так и в приемах обработки и интерпретации георадиолокационных данных. Области применения георадарных обследований обширны – геология, строительство, археология, экология и др. [4, 5]. Наземная радиолокация с помощью георадара используется для определения глубины границ слоев с разными электрическими характеристиками. Георадар в условиях многолетней мерзлоты с успехом может использоваться как для решения геолого-геофизических, инженерных задач, так и в почвенных исследованиях [6, 7].

В настоящей статье приводятся предварительные результаты георадиолокационных работ, которые проводились в августе 2017 г. в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья. В ходе этих работ георадар использовался для изучения верхних слоев мерзлотного разреза (сезонно-талого и сезонноактивного) и криогенных процессов, таких как пучение.

Материалы и методы исследования

Район исследований расположен на южной границе распространения многолетней мерзлоты, что определяет ее пространственно близкое сочетание с участками немерзлых пород. Мощность многолетнемерзлых пород в южной части Витимского плоскогорья достигает 100 м, распространение большей частью сплошное. Температура пород на глубине 12–14 м составляет $-1,2...-1,7^{\circ}\text{C}$. Температура нижней части профиля почвы (290–300 см) в течение всего вегетационного периода $-0,1...-0,2^{\circ}\text{C}$. По мере оттаивания почвы температура ее нижних слоев повышается от $-5,8^{\circ}\text{C}$ (начало апреля) до $-0,1^{\circ}\text{C}$ (август) [8, 9]. Многолетняя мерзлота, контактирующая с почвой, оказывает охлаждающее влияние не только на ее нижнюю часть, но и на весь профиль. Поэтому в течение лета биологически активная температура опускается по профилю почвы только до 60–80 см от поверхности, а нижележащие слои на глубине 1,5–2,5 м при максимальной глубине протаивания 2,8–2,9 м, остаются постоянно холодными. Сумма биологически активных температур составляет 1330°C .

В Еравнинской котловине в связи с благоприятными условиями водного питания бугры пучения чаще всего приурочены к подгорным шлейфам и плоским водоразделам. Встречаются площадное и локаль-

ное 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 до 1,5–2 м.

Максимальная интенсивность пучения грунтов свойственна почвам с преобладанием в ее составе фракции пыли (0,05–0,005 мм). По гранулометрическому составу почвы исследуемых *бугров пучения* относятся к пылеватым тяжелосуглинистым. Физическое выветривание почвообразующей породы идет до мелкой пыли (15,3%), а при сильном промерзании в зимний период происходит коагуляция коллоидальной и илистой фракции с образованием микроагрегатов крупной пыли (22,7%) и мелкого песка (18,9%), что резко снижает миграционную активность ила.

Георадарное зондирование бугров пучения проводилось прибором «Око-2» с антенным блоком АБ-400 с центральной частотой зондирующего сигнала 400 МГц. Работа радиолокационного прибора подповерхностного зондирования (в общепринятой терминологии – георадара) основана на использовании классических принципов радиолокации. Передающей антенной прибора излучаются сверхкороткие электромагнитные импульсы (единицы и доли наносекунды), имеющие 1,0–1,5 периода квазигармонического сигнала и достаточно широкий спектр излучения. Центральная частота сигнала определяется типом антенны. Выбор длительности импульса определяется необходимой глубиной зондирования и разрешающей способностью прибора. Для формирования зондирующих импульсов используется возбуждение широкополосной передающей антенны перепадом напряжения (ударный метод возбуждения).

Излучаемый в исследуемую среду импульс отражается от находящихся в ней предметов или неоднородностей среды, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость, принимается приемной антенной, усиливается в широкополосном усилителе, преобразуется в цифровой вид при помощи аналого-цифрового преобразователя и запоминается для последующей обработки. После обработки полученная информация отображается на индикаторе.



Рис. 1. Район исследований

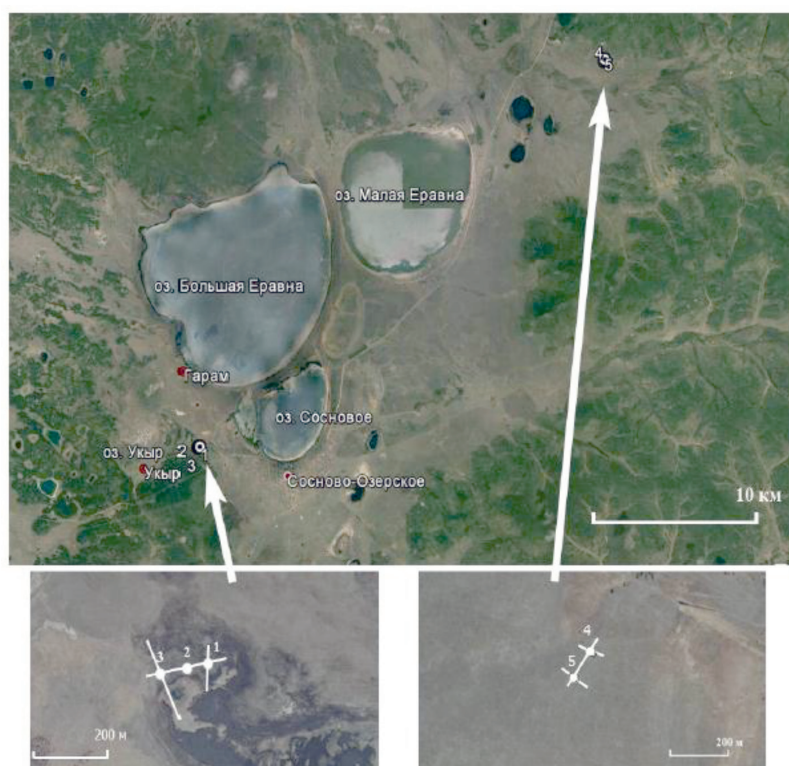


Рис. 2. Схема расположения исследованных бугров пучения

Результаты исследования и их обсуждение

Проведено георадарное исследование двух групп бугров пучения в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья (рис. 1). Три бугра пучения находятся на равном удалении между населенными пунктами Сосново-Озерский, Гарам и Укыр, схема георадарного профилирования приведена на рис. 2. Еще два бугра пучения находятся в 30 км на северо-восток вдоль автотрассы на Читу, схема профилей приведена на правой вкладке. Эти две группы бугров пучения в географическом отношении можно отнести к западной и восточной частям Еравнинской кот-

ловины. На рис. 3 представлен вид бугра пучения 1 с северной стороны.

На рис. 4 приведена радарограмма бугра 1 с нанесенным рельефом. Диаметр бугра 50 м, превышение над окружающим рельефом около 1,5 м. Радарограмма характеризует общее плоскостное строение грунта с небольшими дислокациями и деформациями криогенного происхождения. Визуально в диапазоне глубин 2–3 м от поверхности наблюдается зона повышенного затухания сигнала георадара. Она ограничивается кровлей мерзлого грунта (отмечена пунктирной линией). Это подтверждается видом спектров сигнала георадара на разных глубинах (рис. 5).



Рис. 3. Вид бугра пучения 1 с северной стороны

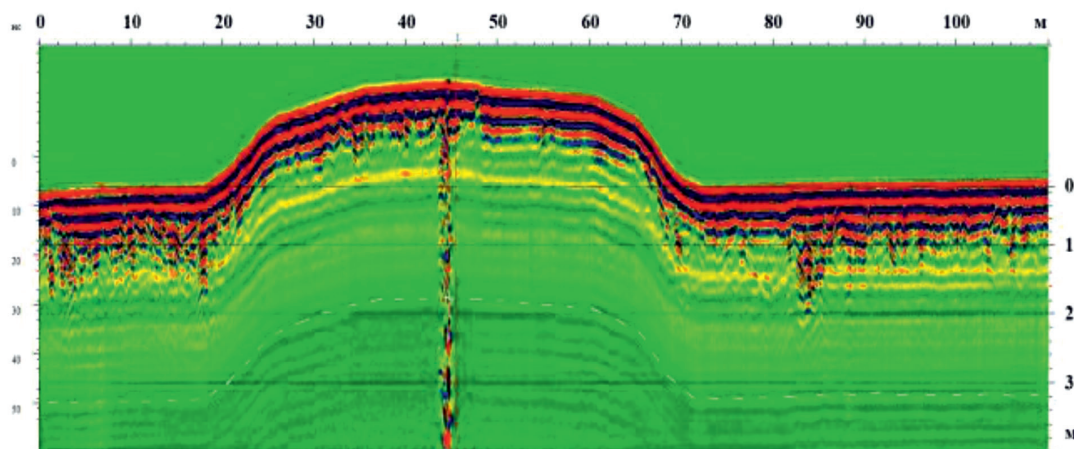


Рис. 4. Радарограмма бугра 1. Георадар «Око-2» с антенным блоком АБ400 (центральная частота 400 МГц). Пунктирной линией отмечена кровля мерзлоты

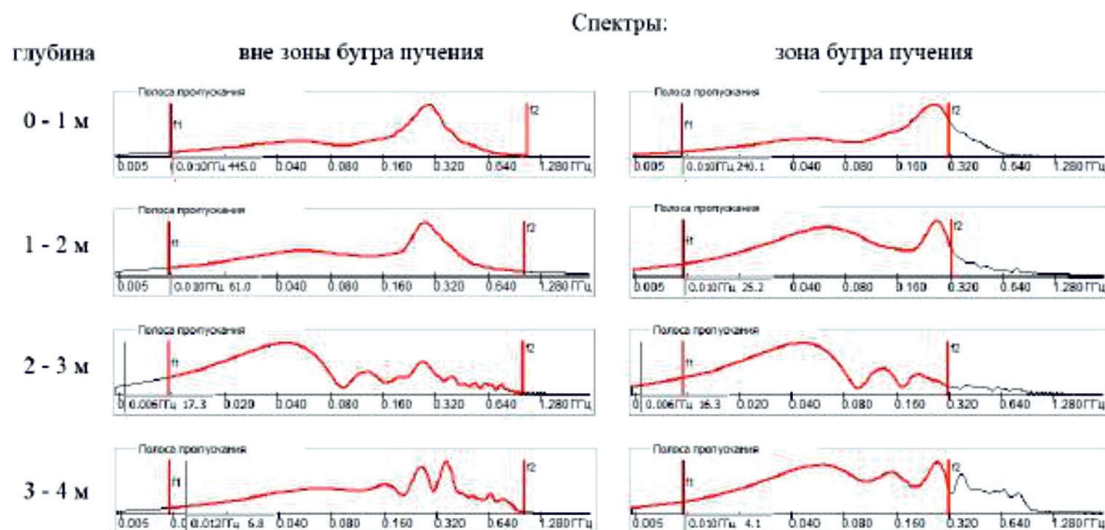


Рис. 5. Спектры сигнала георадара в зоне бугра 1 и за его пределами в интервалах глубин 0–1 м, 1–2 м, 2–3 м и 3–4 м

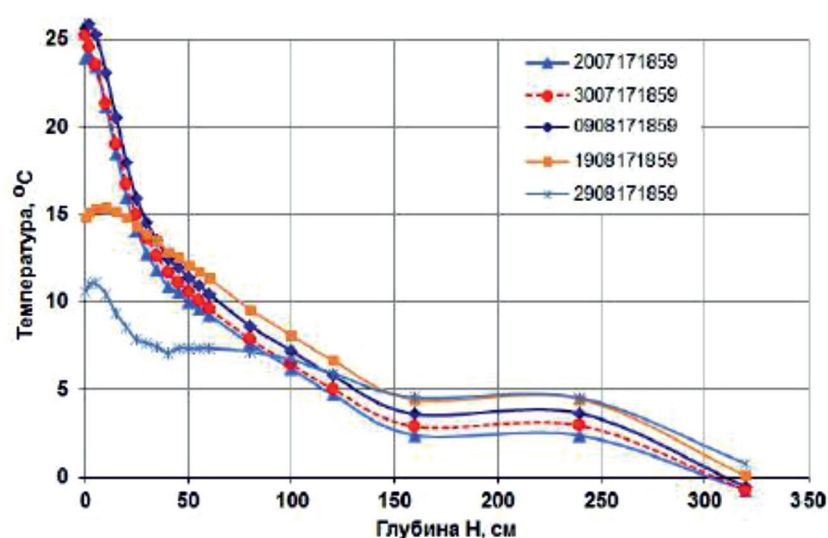


Рис. 6. Температурные профили бугра пучения 1

Увеличение влажности грунта приводит к увеличению затухания сигнала георадара, более выраженного на высоких частотах. Это приводит к изменению соотношения содержания низких и высоких частот в спектре сигнала георадара в сторону преобладания первых. Таким образом, можно качественно проследить изменение влажности грунта с глубиной и по простиранию. В данном случае на примере бугра пучения 1 мы наблюдаем повышенную

и нарастающую влажность грунта в метровом интервале от поверхности до границы мерзлоты по сравнению с окружающей местностью. В центральной части бугра 1 установлен измеритель температурного профиля грунта до глубины 3,2 м. На рис. 6 представлены 5 профилей температуры июля – августа 2017 г., разделенные декадным периодом. 9 августа, в период измерений, глубина до кровли мерзлоты составила 310 см.

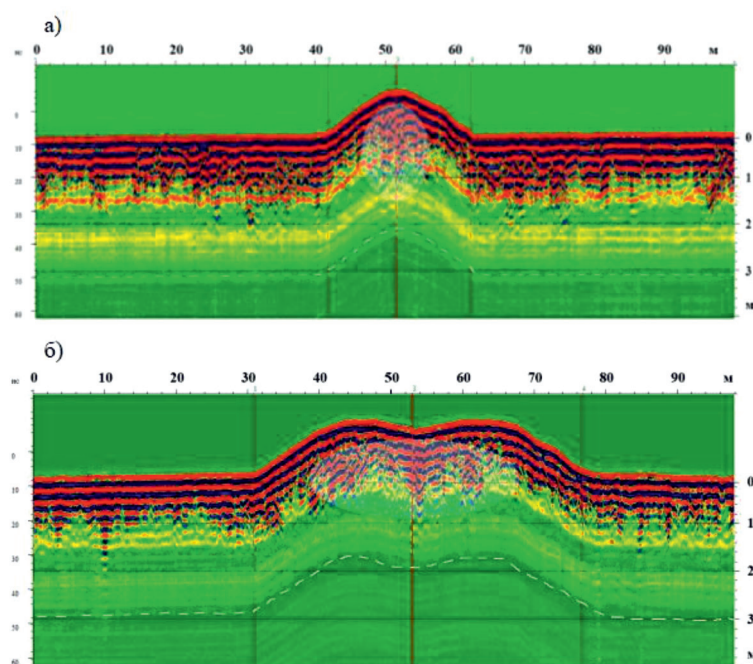


Рис. 7. Радарограмма бугров пучения 4 (а) и 5 (б). Георадар «Око-2» с антенным блоком АБ-400. Пунктирной линией отмечена кровля мерзлоты. Светлым фоном в центральной части бугров отмечена зона интенсивных нарушений плоскостной структуры грунта



Рис. 8. Спектры сигнала георадара в зоне бугра 4 и за его пределами в интервалах глубин 0–1 м, 1–2 м, 2–3 м и 3–4 м

Несколько иная картина наблюдается на восточной группе бугров пучения. Радарограммы бугров 4 и 5 показывают более выраженные нарушения плоскостной структуры грунта не только дислокациями, но и неравномерным проседанием при от-

таивании льдосодержащего грунта в теле бугров (рис. 7). На бугре пучения 5 это привело к образованию кратерообразного углубления на вершине.

В поле спектров отличие восточной группы бугров 4 и 5 от западных 1–3 заклю-

чается в пониженной влажности в интервале 1–2 м тела бугров от окружающей местности (рис. 8).

Выводы

Проведенное георадарное исследование бугров пучения Еравнинской котловины позволило установить положение кровли мерзлоты на глубине 3,1 м в период измерений 09.08.2017 г. Надо полагать о том, что она могла быть обнаружена и глубже, чем 3,1 м, так как еще два месяца, август и сентябрь, были очень жаркими в этом году. Измерение надо проводить только после окончания периода с высокими атмосферными температурами. По выявленным различиям в строении западной и восточной групп бугров Еравнинской котловины можно сделать вывод о различной стадии их криогенеза.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Эволюция, функционирование и эколого-биогеохимическая роль почв Байкальского региона в условиях аридизации и опустынивания, разработка методов управления их продукционными процессами (№ АААА-А 17-117011810038-7) при финансовой поддержке полевых исследований из средств гранта РФФИ № 16-04-01297 «Криоморфозы в почвах на южной границе распространения мерзлоты: тенденции развития; запасы, состав, свойства, строение органического вещества».

Список литературы / References

1. Любушкин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
1. Lyubushkin A.A. Analysis of these systems of geophysical and environmental monitoring. M.: Science, 2007. 228 p. (in Russian).
2. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М., 2008. 192 с.
2. Starovoytov A.V. Interpretation of georadar data. M., 2008. 192 p. (in Russian).
3. Воронин А.Я. Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара «Ложа-В» // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 106–126.
3. Voronin A. Ya. Criteria for identification of the form and functional properties of the soil profile in georadiolocated studies by using georadar «Loza-B» // Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2015. Vy'p. 80. P. 106–126 (in Russian).
4. Золотая Л.А., Калищева М.В., Хмелевской В.К. Возможности геофизических методов при изучении состава и структуры почвенного покрова // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 47–50.
4. Gold L.A., Kalishcheva M.V., Hmelevskoy V.K. Possibilities of geophysical methods when studying structure and structure of a soil cover // Razvedka i ohrana neдр. 2004. № 5. P. 47–50 (in Russian).
5. Калинин А.А., Крылова М.С., Масюк В.М., Марчук В.Н. Использование георадара для исследования неоднородностей верхнего слоя почвы хвойного леса // Радиотехника. 2009. № 3. С. 98–103.
5. Kalinkevich A.A., Krylova M.S., Masyuk V.M., Marchuk V.N. Use of the georadar for a research of not uniformity of the top layer of earth of the coniferous forest // Radio engineering. 2009. № 3. P. 98–103 (in Russian).
6. Пягай Э.Т., Белобров В.П., Молчанов Э.Н., Сео Мунг Чул, Сон Йон Кун. Использование георадара в почвенных исследованиях // Бюллетень Почв. института им. В.В. Докучаева. 2009. Вып. 64. С. 34–40.
6. Pyagaj E.T., Belobrov V.P., Molchanov E.N., Seo Mung Chul, Son Jon Kyi. Use of the georadar in soil researches // Byulleten' Pochv. Instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2009. V. 64. P. 34–40 (in Russian).
7. Fisher M. Ground-penetrating radar used to uncover mysteries beneath our feet. Soil Horizons. 2013. Vol. 54. No. 6. P. 54. DOI:10.2136/sh2013-54-6-f.
8. 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. DOI: 10.7868/S0032180X16080153.
8. Tsybenov Y.B., Chimitdorzhieva G.D., Chimitdorzhieva E.O., Egorova R.A., Mil'kheev E.Y., Davydova T.V., Korsunova T.D.T. Morphology and physical properties of soil material in cryogenic cracks of permafrost-affected meadow-chernozemic soils of the Trans-Baikal Region // Eurasian Soil Science. 2016. T. 49. № 8. P. 908–914. DOI: 10.1134/S1064229316080159.
9. Цыбенков Ю.Б., Чимитдоржиева Г.Д., Егорова Р.А., Гонгальский К.Б. Запасы органического углерода и его изотопный состав в криоморфных квазиглеевых черноземах Забайкалья // Почвоведение. 2016. № 1. С. 11–18. DOI: 10.7868/S0032180X15070126.
9. Tsybenov Y.B., Chimitdorzhieva G.D., Egorova R.A., Gongal'skii K.B. The pool of organic carbon and its isotopic composition in cryomorphic quasi-gley chernozems of the Trans-Baikal region. // Eurasian Soil Science. 2016. T. 49. № 1. C. 8–14. DOI: 10.1134/S106422931507011X.