12. *Ivannikova P.A.* Application absorption method to determine the natural flow of CO_2 from the soil // Eurasian Soil Science. 1992. № 6. P. 113–139.

13. *Kätterer T., Reichstein M., Andren O. et. al.* Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different model // Biology and Fertility of Soils. 1998. № 7. P. 258–262.

14. *Kirschbaum M.U.F.* The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage // Soil Biology and Biochemistry. 1995. V. 27, № 6. P. 753–760.

15. *Kirschbaum M.U.F.* Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 21–51.

16. *Kurganova I.N., de Gerenyu V.O.L., Lancho J.F.G. et. al.* Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates // Eurasian Soil Science. 2012. № 1. P. 82–94.

17. *Raich J.W., Potter C.S., Bhagavatti D.* Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 // Global Change Biology. 2002. № 8. P. 800–812.

18. *Raich J.W., Schlesinger W.H.* The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // Tellus. 1992. V. 44B. P. 81–89.

19. *Sharkov I.N., Bukreeva S.L., Danilova A.A.* The role of easilymineralized organic matter carbon stocks stabilize in arable soils // Contemporary Problems of Ecology. 1997. № 4. P. 363–368.

20. *Singh J.S., Gupta S.R.* Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems // Botanical Review. 1977. V. 43, № 4. P. 449–528.

21. *Tulina A.S., Semenov V.M.* Evaluation of the sensitivity of the mineralizable pool of soil organic matter to changes in temperature and moisture // Soil Science. 2015. V. 48, № 8. P. 831–840.

22. *Winkler J.P., Cherry R.S., Schlesinger W.H.* The Q_{10} relationship of microbial respiration in a temperate forest soil // Soil Biology and Biochemistry. 1996. V. 28. P. 1067–1072.

Поступила в редакцию 22.12.2016

УДК 551.32:551.34

К методике исследований гидротермических деформаций на автомобильных дорогах криолитозоны

Д.М. Шестернев*, Т.В. Острельдина**

**Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*
***Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск*

Анализ ранее выполненных исследований выявил актуальность проблемы для разработки эффективных способов и мероприятий управления гидротермическими деформациями, численное значение которых определяется как разность между пучением при промерзании и осадок при оттаивании основания и земляного полотна автомобильных дорог в годовом климатическом ритме. В настоящее время для ее решения используются методики и оборудования, не учитывающие конструктивных особенностей (высоты насыпи, наличия или отсутствия в их основании мерзлых грунтов, обводненности и т.п.). В работе с учетом этих недостатков предложена усовершенствованная система оценки деформаций, состоящая из двух площадок в границах природно-технической системы и литотехнической системы. В первом случае измеряются гидротермические деформации за пределами проезжей части автомобильной дороги, во втором – в пределах проезжей части. Новизна методики заключается в том, что в ее структуре предусмотрены исследования неравномерности деформаций конструктивных элементов автомобильных дорог в пространстве и во времени (дорожной одежды,

ШЕСТЕРНЕВ Дмитрий Михайлович – д.т.н., зав. лаб., shesdm@mail.ru; ОСТРЕЛЬДИНА Тамара Владимировна – аспирант.

основания откосов земляного полотна, обочин, кюветов, придорожной полосы). Значения деформаций грунтов и конструкций автомобильных дорог по площади предложено определять как разность перемещений поверхностных марок в годовом климатическом ритме, по глубине – с использованием дифференциальных измерителей гидротермических деформаций в зависимости от длительности теплых и холодных его стадий.

Ключевые слова: гидротермические деформации, методика, земляное полотно, автомобильные дороги, природно-техническая система, литотехническая система.

Addition to the Road Hydrothermal Deformations Research Method on Cryolithozone

D.M. Shesternev*, T.V. Ostreldina**

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk
**M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

The analysis of previous studies revealed the urgency of problem of development of effective methods and measures of control of hydrothermal deformations, the numerical value of which is determined as the difference between the heave during freezing and subsidence during thawing at the base and subgrade of highways in the annual climatic rhythm. At the present time for this task some methods and equipment are used which do not take into account structural features of roads (height of embankment, presence or absence of frozen ground in road base, water-cut, etc.). In this work we have proposed improved system for deformations assessment using two sites within boundaries of a natural and technical system and a lithotechnical system. In the first case hydrothermal deformations is measured outside carriageway of the road, in the second case - within the carriageway. The originality of the method is that it provides investigation of the road structural elements deformation in space and time (pavement, subgrade base and slopes, roadsides, ditches, off-the-road shore). Determination of deformation values of soils and construction of roads by area is proposed to be defined as the difference between the movement of surface marks in the annual climatic rhythm, by depth - with the use of hydrothermal deformation differential gauges depending on the duration of warm and cold stages.

Key words: hydrothermal deformation, method, subgrade, roads, natural and technical system, lithotechnical system.

Введение

Согласно «Схеме комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года», приоритетной задачей в Якутии является развитие железных и автомобильных дорог местного и федерального значения [1]. Это обеспечит благоприятные условия для развития экономики и социальной сферы республики, эффективное функционирование производства и рынка, снижение транспортных издержек, создание необходимых предпосылок для интеграции Якутии в единое экономическое пространство страны и в Азиатско-Тихоокеанский регион. В связи с тем, что развитие железных дорог в Якутии находится пока на начальной стадии, основу опорной транспортной сети республики составляют строящиеся федеральные автомобильные дороги с твердым покрытием –«Вилюй», «Лена» и «Колыма». Завершение их строительства создаст условия для полноценной интеграции в межрегиональные транспортные потоки с Магаданской, Иркутской, Амурской областями и Хабаровским краем. Строительство и эксплуатация этих дорог сопряжены со значительными трудностями, обусловленными широким распространением многолетнемерзлых пород. Кинетика их развития и активизация криогенных процессов в условиях глобального изменения климата представляют большую опасность для эффективной эксплуатации автомобильных дорог.

Эксплуатационными службами, научно-исследовательскими ведомственными и академическими институтами (Росавтодор, ИркутскГипродорНИИ, ИМЗ СО РАН и др.) установлено, что наиболее опасными криогенными процессами для эксплуатации автомобильных дорог являются осадки и просадки грунтов при оттаивании и пучение при промерзании [2]. Каждый из этих процессов хорошо изучен, что позволяет прогнозировать отрицательное воз-

действие на автомобильные дороги и, следовательно, разрабатывать управляющие мероприятия по их предотвращению [3, 4]. В то же время развитие циклических знакопеременных деформаций в годовом климатическом ритме (гидротермические деформации) находится на начальной стадии исследования. Результаты обследования автомобильных дорог «Амур», «Вилюй» и «Лена», выполненные сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, показали, что половина аварийно-опасных участков на этих автомобильных дорог связана с развитием именно гидротермических деформаций.

Архив библиографии исследований этих деформаций находится практически в стадии формирования. Единственной фундаментальной работой в этом направлении является монография Б.С. Русанова [5], в которой, в значительной мере, разработаны методические и методологические аспекты исследования гидротермических деформаций земной поверхности. В данной работе впервые рассмотрена ритмичность гидротермических деформаций в условиях криолитозоны. Внутри ритма выделены две стадии и четыре фазы, по две для каждой стадии, начало и завершение которых не совпадают друг с другом в годовых и многолетних климатических ритмах [5]. Решению этих задач были посвящены эпизодические исследования на грунтовой автомобильной дороге Бодайбо–Кропоткин в Иркутской области в конце 90-х гг. прошлого века.

В связи со слабой методической базой исследований гидротермических деформаций и незначительной информационной базой результатов исследований их воздействия на автомобильные дороги целью исследований авторов была разработка методики исследований подобных деформаций оснований и насыпей автомобильных дорог в криолитозоне.

Анализ существующих методик исследований

Методика исследований гидротермических деформаций, предложенная ранее, носила географическую направленность и базировалась на систематической регистрации изменения высоты положения точек дневного пространства по отношению к реперу. Скорость и неравномерность поднятия или опускания этих точек по площади требовали для их оценок достаточно точных инструментальных методов. В качестве таких методов Б.С. Русанов [5] использовал пучиномеры и пучинографы. Он также указывал на необходимость применения аналитических методов исследований гидротермических деформаций, однако считал, что физическая сторона развития гидротермических процессов на то время недостаточно изучена для их разработки.

Для выполнения натурных исследований гидротермических деформаций, выполненных в 1970–1990 гг. и в начале XXI столетия, были модифицированы ранее разработанные методики МГУ и ВСЕГИНГЕО [6, 7]. Модификация натурных исследований заключалась в изменении конструкции дифференциальной пучиномерной установки, размещении наблюдательных пунктов по измерению скорости промерзания пород (мерзлотомера) и термометрических наблюдений (рис.1).

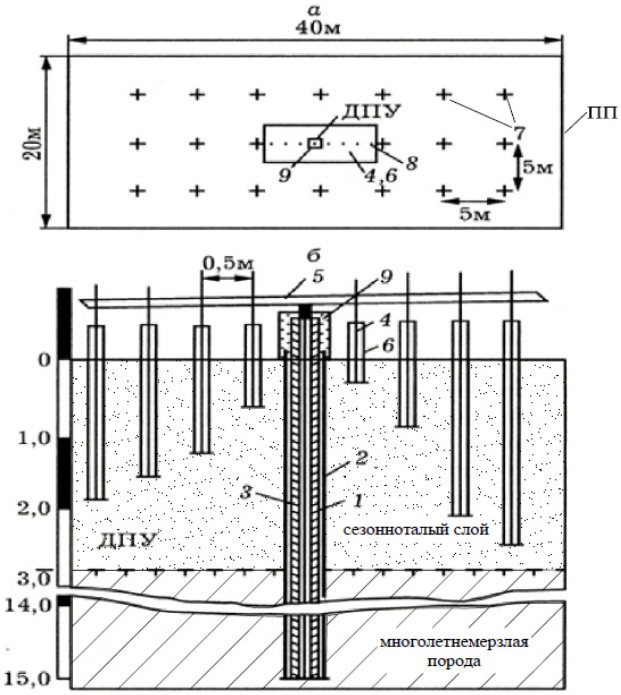

Рис. 1. Схема оборудования пучиномерной площадки, состоящей из пучиномерного полигона – ПП (а) и дифференциальной пучиномерной установки – ДПУ (б) для изучения деформаций промерзающих массивов крупнообломочных пород [7] (все размеры даны в метрах):
1 – опорная обсадная труба реперной базы; 2 – обсадная труба, предохраняющая от выпучивания реперную базу; 3 – термогирлянда; 4, 6 – подвижный репер (пучиномер); 5 – измерительная база; 7 – пучиномерная марка; 8 – мерзлотомер; 9 – термоизоляционный короб

Стационарные площадки по изучению деформаций пучения массивов пород представляли собой участки размером 50–60 м в длину и 30–40 м в ширину, в пределах которых располагалась грунтовая автомобильная дорога Вачинск–Кропоткин. В связи с тем, что при строительстве автомобильной дороги природные условия нарушаются, на поверхности экспериментальных площадок почвенно-раститель-

ный покров снимался. Здесь же был оборудован пучиномерный полигон (рис. 1, а), в пределах которого были оборудованы 3 профиля поверхностных марок для изучения изменения неравномерности гидротермических деформаций по площади. Пучиномерная марка представляла собой квадратную металлическую пластину 10×10 см толщиной 4 мм, с металлическим стержнем длиной до 30 см в нижней части марки и до 10 см в верхней. Профили располагались на расстоянии 5 м и включали 7–8 пучиномерных марок. Наблюдения за изменением положения марок осуществлялись техническим нивелированием два раза в год – перед началом протаивания и перед началом промерзания пород.

Дифференциальные пучиномерные установки, в отличие от конструкции ВСЕГИНГЕО, состояли не из двух невыпучивающихся реперов, а из одного, и, кроме того, в нем была заложена термогирлянда для изучения динамики температурного режима пород (рис. 1, б). Глубина заложения репера изменялась в зависимости от геокриологических условий от 9,5 м (глубина сезонного оттаивания не превышала 3 м) до 15 м (глубина сезонного оттаивания не превышала 5 м). Вокруг репера на расстоянии не менее 1 м размещались глубинные подвижные пучиномеры. Глубина их установления определялась литологическими особенностями разреза пород. В целом пучиномеры (с незначительными отклонениями) располагались на глубинах 0,3; 0,6; 1,2; 1,5; 2,1 и 2,5 м. Для изучения температурного режима пород использовалась термометрическая гирлянда. Она находилась в стационарном положении в скважине, используемой для оборудования репера дифференциальной пучиномерной установки. Термодатчики располагались от поверхности пород до глубины 1 м с интервалом 0,2 м, от 1 до 3,5 м с интервалом 0,5 м, от 3,5 до 5,5 м через 1 м, от 5 до 10 м через 2,5 м и далее через 2,5 м. В качестве датчиков температуры пород использовались терморезисторы типа КМТ-4, оттарированные в лаборатории геотермии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Определение температуры пород производилось с точностью до 0,1 °С с периодичностью наблюдений один раз в декаду с последующим расчетом среднемесячных их значений. С той же периодичностью выполнялись замеры глубины сезонного оттаивания или промерзания пород по мерзлотомеру Данилина (точность 1 см).

Замеры величин деформаций пучения осуществлялись техническим нивелированием с точностью до 0,1 мм либо штангенциркулем по отношению к измерительной базе. Для определения величины льдонакопления в горном массиве осенью и весной проходились зондировочные скважины на глубину, равную мощности слоя сезонного оттаивания и промерзания пород.

Результаты исследований неравномерности гидротермических деформаций и их анализ

Полученные результаты были сведены в таблицу, в которой для каждой пучиномерной марки приведено значение деформаций пучения после промерзания сезонноталого слоя грунта в приконтактной к автомобильной дороге полосе.

Из таблицы следует, что коэффициенты неравномерности площадок, оборудованных на гравийно-супесчанистых и гравийно-суглинистых грунтах (ИМЗ 1 и 2), характеризуются небольшими значениями с отклонениями, не превышающими 5%.

Неравномерность пучения (см/м) пород слоя сезонного промерзания на пучиномерных площадках ЛЗРК в 1998 г.

№ ИМЗ	№ профиля	Расстояние между пучиномерными марками 5 м						
		1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8
1	I	1,2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4
	II	0,1	0,6	0,2	0,1	0,3	0,5	-
	III	0,2	0,2	0,8	0	0,6	0,4	0,2
2	I	1,2	1	0,4	0,2	0,2	0,8	-
	II	0,6	1	0,4	0,2	0,2	1	-
	III	0,8	0,4	0	0	0,3	0,5	-
	IV	0,6	0,2	0,4	-	-	-	-
3	I	0,6	0,8	1,4	1,2	2,2	0,8	-
	II	2	2,4	0,2	3,6	1	0,6	0,8
	III	0,6	0,8	0,8	1,4	0,4	0,8	0,2
4	I	0,6	1	0,8	0,5	1,1	0,9	0,1
	II	0,4	1	1,5	1,5	3,2	1,4	1,2
	III	0,8	0,7	1,7	0,4	0,8	0,2	0,8

На площадках ИМЗ 3 и 4, сложенных илами, обогащенными органикой, коэффициенты неравномерности превышают 5–10% и более. Следовательно, участки, на которых распространены грунты этого типа и за пределами территории исследований, относятся к морозоопасным. В связи с этим земляное полотно на грунтах, аналогичных грунтам на стационарных площадках ИМЗ 1, 2, как правило, слабо деформируемо и необходимость выравнивания грунтовой автомобильной дороги в течение сезона с отрицательными температурами практически не возникала. Деформации же земляного полотна

вблизи площадок ИМЗ 3 и 4 в этот период были столь существенными, что снижало пропускную способность автомобильного транспорта и увеличивало коэффициент аварийности. Чтобы исключить это, выполняли специальные работы по снижению пучин на проезжей части автомобильной дороги.

Таким образом, заимствованная методика исследований гидротермических деформаций обеспечивала лишь гипотетическое предположение о причинах деформаций земляного полотна и дорожной одежды. Это предопределило необходимость разработки специальных площадок для наблюдений за изменением деформаций всех элементов конструкции автомобильной дороги, вызванных циклическими фазовыми переходами влаги в грунтах в течение годового климатического ритма.

Характеристика разработанной методики исследований влияния гидротермических деформаций на эффективность эксплуатации автомобильных дорог

Анализ опыта исследований гидротермических деформаций показал, что поиск и обоснование размещения стационарных площадок должны базироваться на инженерно-геокриологическом районировании исследуемой территории. В комплекс инженерно-геокриологического районирования необходимо включать работы по выявлению участков с однотипными условиями, различающимися по степени сложности для проектирования и потенциальной опасности при эксплуатации автомобильных дорог. На выбранных участках с максимально неблагоприятными условиями, как правило, необходимо оборудовать наблюдательный полигон по изучению кинетики и механики гидротермических деформаций в условиях изменения климата и интенсивности технической нагрузки на земляное полотно и дорожную одежду.

Наблюдательный полигон должен состоять из площадки по изучению неравномерности гидротермических деформаций и установок, позволяющих наблюдать за изменением подобных деформаций по разрезу всех элементов автомобильной дороги, представляющих собой природно-техническую систему (ПТС). Внешняя граница системы расположена в пределах области, испытывающей технические нагрузки на все виды природной среды (приземную атмосферу, биосферу, гидросферу, литосферу, криолитозону). Насыпь автомобильной дороги, взаимодействуя с грунтами оснований, принято называть литотехнической системой (ЛТС) [8]. В соответствии с этим, ЛТС является частью ПТС и представляет собой ее структурообразующий элемент, определяющий интенсивность развития гидротермических деформаций. Исходя из этого технология организации наблюдений за гидротермическими деформациями ЛТС (рис. 2) будет несколько отличаться от оборудования ПТС в целом.

Площадка измерения неравномерности гидротермических деформаций расположена по нормали к оси автомобильной дороги. Поперечные границы площадки охватывают всю территорию полосы отвода и часть придорожной полосы, где природные условия находятся практически в естественном состоянии (рис. 2). Площадка измерения неравномерности гидротермических деформаций состоит из установленных поверхностных марок на территории от откосов до придорожной полосы, расположенных на

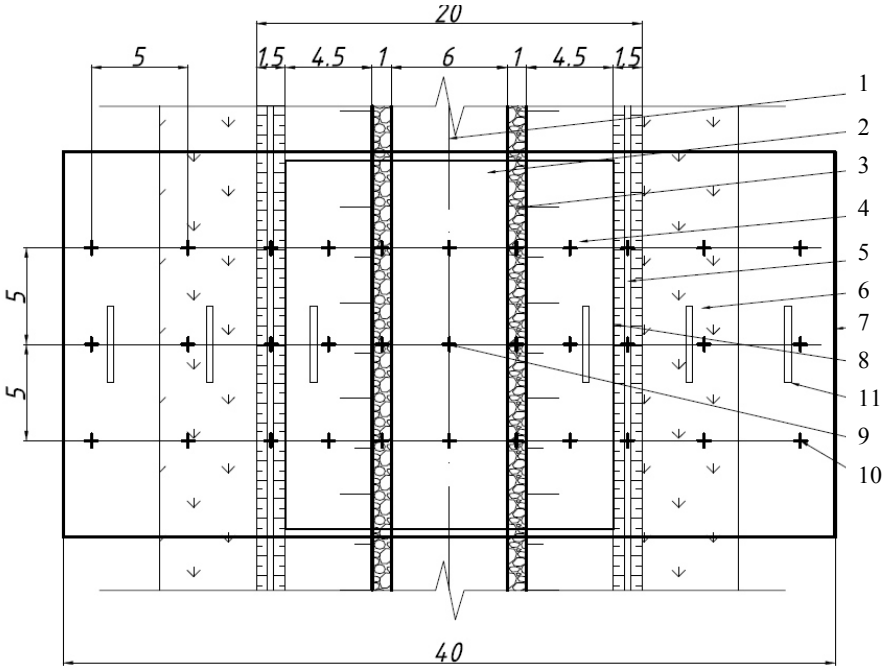

Рис.2. Схема организации мониторинга гидротермических деформаций по площади и по разрезу пород природно-технической системы «Автомобильная дорога» (все размеры даны в метрах):
1 – ось автомобильной дороги; 2 – проезжая часть; 3 – обочина; 4 – откос; 5 – кювет; 6 – придорожная полоса; 7, 8 – соответственно границы площадок ПТС и ЛТС; 9 – марки для изучения неравномерности гидротермических деформаций на проезжей части; 10 – марки для изучения неравномерности гидротермических деформаций за пределами проезжей части; 11 – дифференциальный измеритель гидротермических деформаций

расстоянии друг от друга с учетом конкретного строения основания и земляного полотна автомобильной дороги. На проезжей части автомобильной дороги оставляются метки несмываемой краской (рис. 2).

Дифференциальный измеритель гидротермических деформаций состоит из репера коаксиально опущенной и вмонтированной в него пластмассовой трубки с термогирлядной, помещенных в буровую скважину на глубину больше на 2–3 м глубины колебаний годовых нулевых амплитуд температур пород. Справа и слева по нормали к невыпучивающемуся реперу помещаются пучиномеры. Расстояние между ними 0,5 м, глубина заложения изменяется через 0,5 м. Количество пучиномеров определяется глубиной слоя сезонного оттаивания или мощностью сезонномерзлых пород. Репер представляет собой стальную трубу, снизу заваренную металлической пластиной, играющей роль якоря и предохраняющей от попадания в трубу влаги. На верхней части репера оборудуется винтовая крышка для предохранения попадания в репер атмосферных осадков. В крышку с двух сторон размещают болты, с помощью которых она закрепляется на трубе репера, предохраняя крышку от развинчивания. Верхняя часть репера располагается выше дневной поверхности на величину, равную максимальной мощности накопления снежного покрова на данной территории. Пластмассовая труба, в которой размещается термогирлянда, снизу гидроизолируется. Верхняя ее часть располагается ниже предохранительной крышки репера на 20–30 см (рис. 1, б).

Расстояние между датчиками температур размещается согласно ГОСТ 25358-82 «Грунты. Метод полевого определения температур». Для контроля над движением нижней границы слоя сезонного промерзания пород на каждом конструктивном элементе, включая проезжую часть, устанавливаются мерзлотомеры Данилина (ГОСТ 24847-81. «Грунты. Метод определения глубины сезонного промерзания).

Наблюдения за изменением положения наблюдательной сети осуществляются с периодичностью, равной одному месяцу, и полным опробованием строения и инженерно-геокриологических свойств грунтов два раза в год, перед началом протаивания и перед началом промерзания. Результаты исследований заносятся в специальные таблицы и обрабатываются с использованием известных статистических методов.

Выводы

1. Предложенные система и устройство для определения гидротермических деформаций должны быть основой для организации мониторинга функционирования автомобильных дорог в криолитозоне.

2. Применение разработанной методики позволит осуществлять контроль и диагностику в годовом климатическом ритме изменений качества эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне в зависимости от изменения климатических параметров и технического прессинга.

3. Полученные результаты мониторинга будут использованы для разработки мероприятий по ликвидации, предотвращению или управлению гидротермическими деформациями для обеспечения эффективного функционирования автомобильных дорог в области распространения многолетнемерзлых пород.

Литература

1. *Схема* комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года. Сводный том. Утверждена Постановлением Правительства Республики Саха (Якутия) №411 от 6.09.2006 года. М.; Якутск, 2006.

2. *Ершов Э.Д.* Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М., 1979. 216 с.

3. *Кондратьев В.Г.* Стабилизация земляного полотна на вечномерзлых грунтах. Чита: Забтранс, 2011. 175 с.

4. *Шестернев Д.М.* Линейные сооружения в криолитозоне России / Материалы 5-й конф. геокр. России. МГУ им. М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. Т.1, ч. 2. Линейные сооружения в криолитозоне. М.: Университетская книга, 2016. С. 228–235.

5. *Русанов Б.С.* Гидротермические движения земной поверхности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 226 с.

6. *Методические* рекомендации по стационарному изучению криогенных физико-геологических процессов. М.: ВСЕГИНГЕО, 1979. 70 с.

7. *Шестернев Д.М., Шестернев Д.Д.* Пучение крупнообломочных пород Читино-Ингодинской впадины в связи с потеплением климата/ Д.М. Шестернев, Д.Д. Шестернев // Криосфера Земли. 2007. Т. XXI, №4. С. 80–92.

8. *Шестернев Д.М.* Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (на примере железной дороги Беркакит–Томмот–Якутск) // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума, 3 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. С. 253–260.

Поступила в редакцию 15.11.2016