

Ландшафтные предпосылки формирования техногенных криопэггов в Центральной Якутии

Н.А. Павлова, М.В. Данзанова, В.В. Шепелёв

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск
pavlova@mpi.ysn.ru, sheply@mpi.ysn.ru

Аннотация. Обобщены сведения о распространении солоноватых и соленых грунтовых вод, не замерзающих при отрицательной температуре, в пределах урбанизированных участков территории долины Туймаада. На основе визуального дешифрирования аэро- и космоснимков, данных буровых работ и результатов гидрогеохимических исследований прослежена трансформация ландшафтных условий при застройке одного из окраинных микрорайонов г. Якутска. Показано влияние прокладки дорог на изменение геоэкологического состояния территории. Проанализирована роль почвенно-растительного покрова в формировании температурного и влажностного режима грунтов сезонноталого слоя. Выявлено, что в долине Туймаада наиболее уязвимыми в отношении возможного формирования субэкральных водоносных таликов и техногенных криопэггов являются участки высокотемпературных грунтов в неглубоких межрядовых понижениях, маркируемых березняками.

Ключевые слова: криопэгги, условия поверхностного и надмерзлотного стока, растительный покров, температурный режим, гидрогеохимическая обстановка.

Landscape Preconditions of the Formation of Suprapermafrost Cryopegs in an Urban Area, Central Yakutia

N.A. Pavlova, M.V. Danzanova, V.V. Shepelev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk
pavlova@mpi.ysn.ru, sheply@mpi.ysn.ru

Abstract. This study summarizes the available information on brackish and saline groundwaters remaining unfrozen at subzero temperatures which occur in foundation soils within the urban area of the Tuymaada Valley. Visual interpretation of aerial photographs and satellite images, drilling data, and results of hydrogeochemical investigations are used to identify changes to the landscape conditions brought by development in a residential district of Yakutsk. Geoecological changes due to road construction are examined. The influence of vegetation on the thermal regime of the active layer is analyzed. The results of the study suggests that, in the Tuymaada Valley, areas of warm permafrost in shallow inter-ridge depressions recognized at the surface by birch stands have the most potential for formation of anthropogenic cryopegs.

Key words: cryopegs, surface and suprapermafrost runoff, vegetation cover, temperature regime, hydrogeochemical conditions.

Введение

В Центральной Якутии наиболее освоенной территорией является долина Туймаада – расширенная часть долины р. Лены в ее среднем течении. Здесь расположены г. Якутск, основанный в XVII веке, и пригородные поселки. Быстрый рост численности населения в них в

последние десятилетия, а также ветшание жилого фонда требуют увеличения объема жилищного строительства и расширения границ территории населенных пунктов в пределах долины Туймаада. Одной из проблем, которая встает перед проектировщиками, является поиск площадок, подходящих для строительства. Так, в г. Якутске на территориях сноса старой деревянной застройки грунты из-за высокой засоленности, переувлажненности и большого содержания органического материала не отвечают требованиям строительства [1, 2]. Нередко грунты оснований инженерных сооружений находятся в охлажденном состоянии и содержат криопэгги –

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна – к.г.-м.н., зав. лаб.; ДАНЗАНОВА Марина Викторовна – м.н.с.; ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич – д.г.-м.н., зам. директора.

ЛАНДШАФТНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ КРИОПЭГОВ

солончатые и соленые подземные воды, не замерзающие при существующей отрицательной температуре. На урбанизированной территории формирование таких грунтовых вод интенсифицируется в условиях высокой зарегулированности поверхностного и надмерзлотного стока различными барражами [3]. Насыщенные криопэгами грунты имеют низкие прочностные показатели и представляют опасность для свайных фундаментов и возводимых на них зданий. Для исключения или минимизации риска образования криопэгов в грунтах оснований инженерных сооружений при дальнейшем расширении города и освоении прилегающей к нему территории важным является выявление мест, наиболее уязвимых к техногенному воздействию и подверженных процессам засоления грунтов и формирования криопэгов.

Природные условия территории

В пределах долины Туймаада в настоящее время хорошо сохранились черты надпойменно-низкотеррасового типа рельефа с прирусловыми грядами и валами, имеющими превышения около 2–4 м над межгрядовыми ложбинами и старичными озерами. На поверхности надпойменной террасы развита луговая растительность: на грядах – твердоосоковый луг, в межгрядовых понижениях – злаковый, в старичных и озерных понижениях – вейниковые и осоковые луга [4]. Лесистость территории составляет всего 7 %. На песчаных валах произрастают сосновый и березовый лес, в межгрядовых увлажненных понижениях – ива и береза плосколистная. Терраса сложена дриас-голоценовыми аллювиальными отложениями мощностью до 20–25 м [5]. До глубины 3–6 м они представлены суглинками и супесями, ниже залегают разнозер-

нистые пески, которые подстилаются среднеюрскими песчаниками и алевролитами. Основные тепловые характеристики грунтов (глубина сезонного протаивания (ξ), мощность слоя годовых теплооборотов ($H_{\text{год}}$) и температура грунтов на подошве этих слоев ($t_{\text{ср}}^{\xi}$ и $t_{\text{ср}}$ соответственно)) приведены в таблице [6]. Концентрация солей в сезонноталом слое, в зависимости от положения участка на местности и типа почвогрунта, изменяется в значительных пределах: от 0,02 до 5–7 %. В среднем на возвышенных участках в верхнем слое (30–40 см) засоленность почвы составляет 0,26–0,46 %, в понижениях она достигает 1,26 %. Многолетнемерзлые отложения с высоким содержанием солей встречаются под замкнутыми старицами. На таких участках засоленные грунты отмечаются до глубины 6–13 м.

На участках долины Туймаада, не затронутых активным техногенезом, криопэги встречаются фрагментарно. Как правило, они приурочены к подножиям пологих склонов прирусловых валов и бессточным озерным котловинам. Формированию криопэгов в естественных условиях способствуют затрудненный сток поверхностных и надмерзлотных вод в связи с незначительным уклоном поверхности террасы и широкое развитие засоленных почв, являющихся в естественных условиях основным источником поступления солей в основание сезонноталого слоя. Сравнительно высокие отрицательные температуры грунтов благоприятствуют процессу проникновения воды повышенной минерализации в толщу многолетнемерзлых пород. Глубина залегания криопэгов, как правило, ограничивается 2–6 м, а их минерализация составляет 2–5 г/л. В изолированных линзах межмерзлотных криопэгов концентрация растворенных веществ может достигать 20–26 г/л.

Параметры теплового состояния грунтов в долине Туймаада в надпойменно-низкотеррасовом типе местности

Природные комплексы	Литологический состав грунтов	ξ , м	$t_{\text{ср}}^{\xi}$, °С	$H_{\text{год}}$, м	$t_{\text{ср}}$, °С
Гряды с твердоосоковой степью	Супесь, песок с прослоями торфа	1,9	–1,2	13	–2,0
То же	Песок, супесь с прослоями торфа	2,1	–3,4	13	–2,9
Гряды с толокнянковым сосняком	Супесь, песок	1,9	–3,5	15	–3,7
Межгрядовые понижения с разнотравным сосново-лиственничником	Супесь, суглинок, песок с торфом	2,0	–3,8	12	–2,4
С бескильничевым лугом	Суглинок	2,0	–3,2	12	–2,0
То же	Супесь, песок	1,9	–3,7	13	–2,4
Плоское понижение со злаково-разнотравным березняком	Супесь, песок с прослоями торфа	1,8	–0,4	4	–0,5

Методы исследований

Линзы соленых надмерзлотных вод разной мощности широко распространены на техногенно нарушенных участках долины Туймаада, особенно на территории г. Якутска, а также на площадях расположения животноводческих комплексов, летних ферм, свалок, зон, прилегающих к дорогам и засыпанным ложбинам стока и т.д. На таких участках при бурении криопэги вскрывают до глубины 6–10 м (иногда до 17–20 м). Их минерализация изменяется в широких пределах: от 2–4 до 200 г/л, а температура вмещающих грунтов – от минус 0,2 до минус 8 °С. На многих участках криопэги имеют многоярусное залегание. Формирование многослойных криопэгов и их миграция в разрезе отрицательно-температурных песков связаны с динамикой метеорологических параметров в годовом и многолетнем циклах и тепловым воздействием инженерных сооружений и горных выработок на грунты оснований [7]. Способность криопэгов менять свое месторасположение вызывает наибольшие трудности при борьбе с ними.

Для выявления условий формирования надмерзлотных техногенных криопэгов в долине Туймаада и решения задач мерзлотного прогноза был проведен комплекс исследований, позволивший проследить трансформацию ландшафтных условий в процессе застройки одного из окраинных микрорайонов г. Якутска. Выбор этого участка был обусловлен, прежде всего, наличием и доступностью данных дистанционных съемок, фактических материалов бурения и результатов гидрогеохимических исследований. В состав исследований входило визуальное дешифрирование аэро- и космоснимков разных лет (1946, 1952, 1973, 2008–2016 гг.) данной территории для оценки ее обводненности и изменения растительного покрова в процессе урбанизации. Сведения о распространении в грунтах оснований зданий и сооружений соленых и соленых подземных вод, не замерзающих при отрицательной температуре, были заимствованы из материалов изысканий под строительство инженерных объектов, а также получены авторами при бурении скважин на экспериментальных полигонах.

Для изучения роли техногенного нарушения естественного стока в формировании надмерзлотных криопэгов были организованы гидрогеохимические исследования, включающие опробование поверхностных и надмерзлотных вод, а также отбор проб грунтов по разрезу скважин. Аналитические исследования химического состава воды и водных вытяжек грунтов выполнены в Институте мерзлотоведения СО

РАН по стандартным методикам. Оценка степени влияния нарушений напочвенного покрова на температурный режим грунтов проведена на основе анализа результатов выполненного ранее математического моделирования. Термический режим засоленных грунтов моделировался одномерной задачей Стефана, решаемой в кусочно-однородной (слоистой) области горно-породного массива, промерзающего в общем случае в спектре отрицательных температур и имеющего отличную от 0 °С и переменную по глубине температуру начала замерзания. Методика расчета подробно описана и опубликована [8]. Для имитации постепенного сведения напочвенного покрова задавался прогрессивно возрастающий коэффициент теплопроводности грунта в верхнем слое разреза.

Результаты и обсуждение

Рассматриваемая территория находится в юго-западной части города. Активное строительство на ней индивидуальных и среднеэтажных домов началось в 70-х годах прошлого века. Грунтовым основанием зданий служили участки, не занятые лесом. По данным инженерных изысканий, на этой территории грунты до глубины 1,5–3,2 м представлены преимущественно пойменной фацией: мелкозернистыми песками, супесями, перекрытыми сверху суглинками [9]. Ниже до глубины 20–25 м залегают мелко- и среднезернистые пески. Максимальная глубина слоя сезонного протаивания грунтов достигает 2,6–3,0 м. Влажность их в этом интервале изменяется от 22 до 40%. Дренажирование территории до ее освоения происходило в озеро Круглое, а также неглубокие проточные межрядовые понижения и ложбины. О высокой увлажненности последних и их проточном режиме свидетельствуют широко развитые в них березняки (рис. 1, а).

Застройка этого микрорайона г. Якутска и развитие в его пределах транспортной инфраструктуры существенно повлияло на изменение водного баланса территории и способствовало образованию небольших техногенных водоемов с застойным режимом в придорожных зонах и в местных естественных понижениях. На таких участках вытаивание сегрегационного льда, ранее законсервированного в супесчано-суглинистых многолетнемерзлых грунтах, сопровождается просадками поверхности и дальнейшим заболачиванием территории. Следует отметить, что в г. Якутске на участках зарегулированного поверхностного и надмерзлотного стока практически повсеместно активизируются термопросадочные процессы. Нередко они приводят к образованию техногенных непромерзающих

ЛАНДШАФТНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ КРИОПЭГОВ

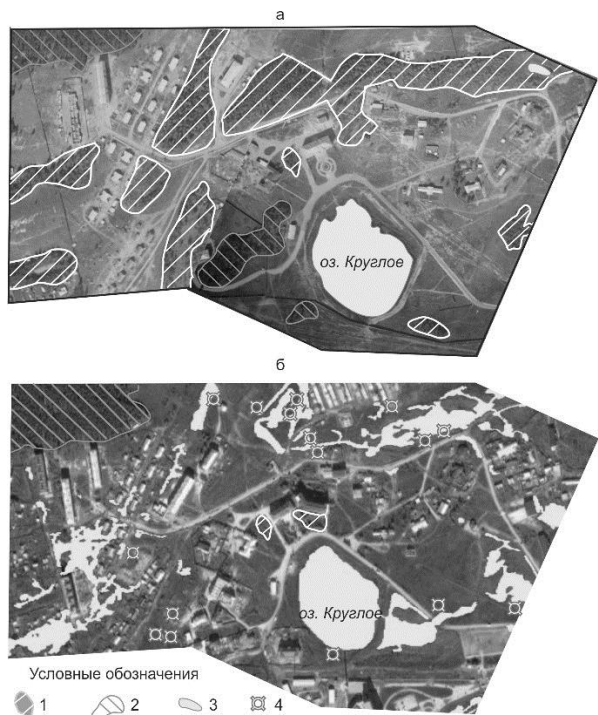


Рис. 1. Влияние застройки на состояние обводненности территории г. Якутска на примере микрорайона «Мерзлотка»: а – 1973 г. (фото предоставлено В.В. Куницким); б – 2008 г. (ресурсы Google Earth).

1 – березняки; 2 – сосняки; 3 – техногенные водоемы (по состоянию на 2006 г.); 4 – скважины, вскрывшие линзы надмерзлотных и межмерзлотных криопэгов (период бурения 1981–2016 гг.)

водоемов. Так, в северо-западной части города в 1980-х годах образовалось термокарстовое озеро, на начальных стадиях формирования которого проседание его дна происходило с интенсивностью 2–4 см в год [10].

Криогенные процессы наиболее интенсивно развиваются на участках распространения минерализованных поверхностных и надмерзлотных вод. Результаты статистической обработки данных химических анализов водных проб, отобранных в разные сезоны года на территории изучаемого микрорайона, свидетельствуют о весьма пестрой минерализации поверхностных

вод и ее постепенном увеличении в течение лета (рис. 2). Характерно, что точки с максимальными концентрациями растворенных компонентов (более 4 г/л), как в поверхностных, так и надмерзлотных водах, расположены вблизи пересечения дорог. Влияние прокладки дорог на изменение гидрогеохимической обстановки иллюстрировано на рис. 3.

Изменение влажностного и гидрогеохимического режима почв и грунтов сезонноталого слоя отразилось в нарушении сукцессионной системы и привело к деградации древесной растительности и появлению зарослей солевыносливых злаков на склонах ложбин стока. В свою очередь известно, что растительный покров оказывает охлаждающее влияние на многолетнемерзлые грунты. Его гибель или нарушение сплошности приводит к увеличению глубины сезонного протаивания пород. Так, по данным П.Н. Скрябина и С.П. Варламова, постепенная рубка лиственного леса в Центральной Якутии в песчано-грядовом типе местности на березо-кустарниковой стадии приводит к повышению температуры грунтов на подошве слоя сезонного протаивания на 0,5–1,0 °С [11]. А.Н. Федоров и др. [12], проводившие наблюдения за изменением ландшафтных условий после сплошной вырубке лиственничника вблизи г. Якутска, установили, что нарушение растительного покрова вызывает увеличение глубины сезонного протаивания на 31–46 см, рост влажности деятельного слоя более чем на 50 % и просадку поверхности до 4,8 см.

В долине Туймаада на участках деградации древостоя также следует ожидать сохранения высокой температуры пород сезонноталого слоя и их повышенной влажности. Анализ результатов математического моделирования динамики температурных полей техногенно засоленных грунтов, выполненного для периода 1981–1992 гг. (время массовой гибели березняков), подтверждает постепенное увеличение глубины сезонного протаивания грунтов и начало формирования субэкральных надмерзлотных таликов при снятии напочвенного покрова (рис. 4).

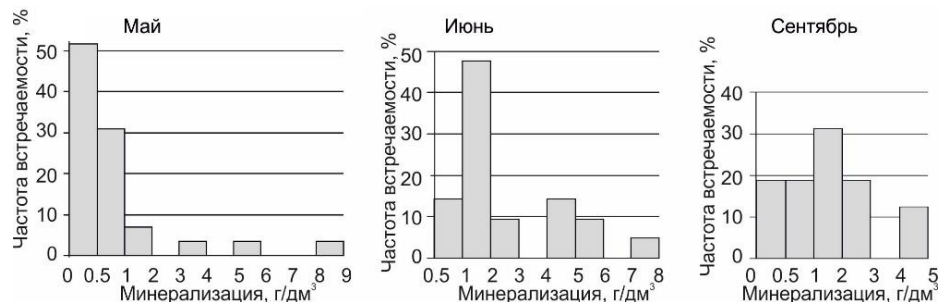


Рис. 2. Диапазон изменения и частота встречаемости минерализации поверхностных вод в теплый период года на территории микрорайона «Мерзлотка» г. Якутска

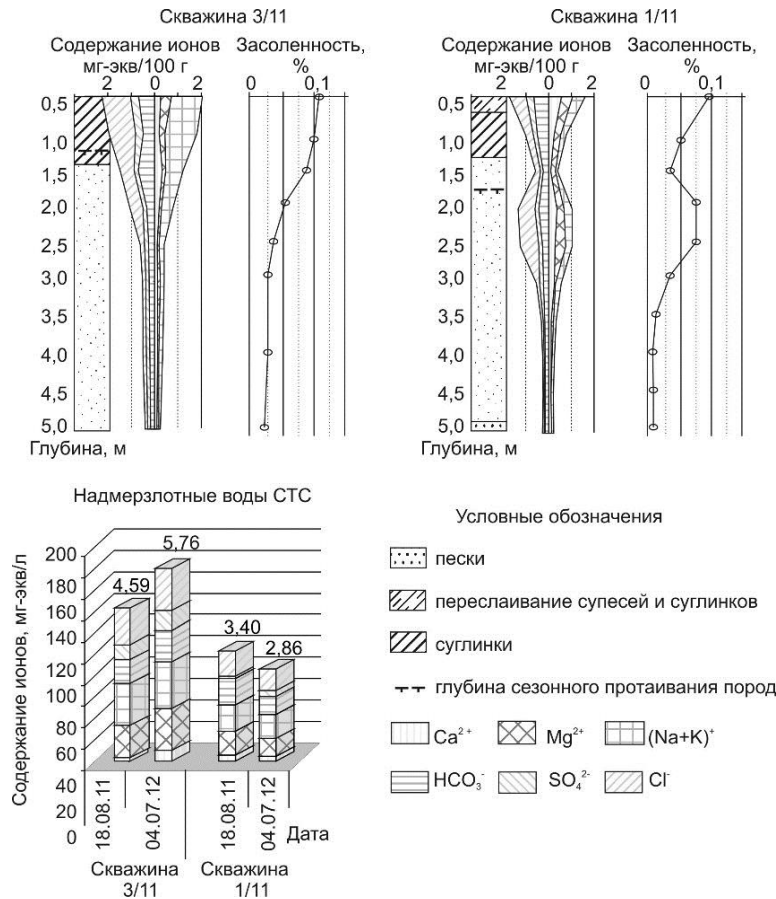


Рис. 3. Химический состав водной вытяжки пород и надмерзлотных вод вблизи дороги, секущей естественный сток (скважина 3/11 расположена в месте барражирования стока; скважина 1/11 – ниже барража)

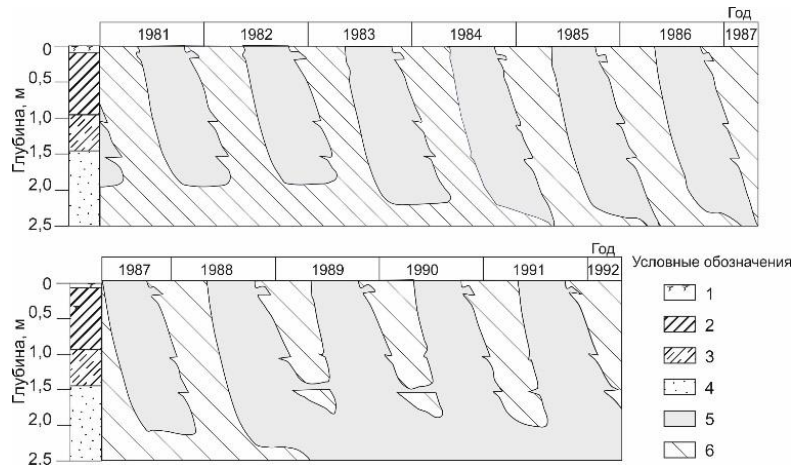


Рис. 4. Траектории фронтов промерзания–оттаивания грунтов в многолетнем цикле при постепенном удалении напочвенного покрова.
1 – почвенно-растительный слой; 2 – суглинки; 3 – переслаивание супесей и суглинков; 4 – пески; 5 – сезоннопротаивающие породы; 6 – мерзлые породы

В подобных условиях постоянный привнос растворенных веществ с окружающей территории с надмерзлотным стоком, а также увеличение времени взаимодействия воды с вмещающими породами и криогенная метаморфизация поровых растворов

являются благоприятными факторами для формирования субэкральных надмерзлотных таликов, насыщенных водой повышенной минерализации вплоть до криопэггов. Это подтверждается данными бурения в местах гибели березового леса (рис. 1, б).

Заключение

Одной из основных задач мерзлотного прогноза является научное предвидение характера и степени допустимых техногенных изменений природной среды. Для предварительной оценки состояния инженерно-геологической среды долины Туймаада и предотвращения негативных последствий, связанных с засолением грунтов оснований и формированием техногенных криопэгов на новых осваиваемых территориях, необходимо выполнить комплексную оценку существующих ландшафтных условий. О степени трансформации мерзлотно-гидрогеологической обстановки можно судить, исходя из изучения темпов изменения растительного покрова, вызванного термокарстовыми просадками и заболачиванием поверхности земли, а также засолением почвогрунтов. В долине Туймаада возможность формирования и развития техногенных криопэгов весьма высока на участках высоко-температурных грунтов в неглубоких межрядовых понижениях, маркируемых безрыжками. Учитывая высокую уязвимость таких ландшафтов к освоению, очень важно не нарушать естественный поверхностный и надмерзлотный сток воды во избежание создания застойных условий водообмена и дальнейшего засоления грунтов.

На урбанизированных территориях в долине Туймаада помимо выраженного барражного эффекта дорог на изменение мерзлотно-гидрогеологических условий могут оказывать влияние строительство дамб, выпас скота, сенокосение, свалки бытовых и производственных отходов. Оценка степени влияния этих техногенных факторов на вероятность формирования криопэгов требует постановки специальных мерзлотно-гидрогеологических исследований.

Результаты подобных исследований важны для решения следующих практических задач: 1) выявление и прогноз мест залегания криопэгов при проведении инженерно-геологических изысканий; 2) разработка мероприятий, обеспечивающих эксплуатационную надежность зданий и сооружений; 3) обоснование мест заложения режимных скважин при организации мерзлотно-гидрогеологического мониторинга на период строительства и эксплуатации сооружений; 5) составление экологических программ защиты геокриологической среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-45-05050.

Литература

1. Сыромятников И.И., Дорофеев И.В. Особенности динамики температуры грунтов на территории г. Якутска // Наука и образование. 2014. № 4. С. 42–45.

2. Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Засоленность и агрессивность сезонноталых и многолетне-мерзлых грунтов в условиях меняющейся геологической среды на примере Якутска // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве Российской Федерации: Материалы XI Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: Академическая наука, 2015. С. 144–146.

3. Павлова Н.А., Данзанова М.В., Сериков С.И. Оценка техногенного влияния на обводненность и гидрохимическую обстановку г. Якутска // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. №3. С. 207–214.

4. Еловская Л.Г., Коновский А.К., Саввинов Д.Д. Мерзлотные засоленные почвы Центральной Якутии. М.: Наука, 1966. 274 с.

5. Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбое» // Геоморфология. 2008. № 1. С. 87–94.

6. Варламов С.П., Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б. Геотемпературный мониторинг грунтов долины Туймаада // Научное обеспечение решений ключевых проблем развития г. Якутска. Якутск: ООО «Сфера», 2010. С. 97–102.

7. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.

8. Anisimova N.P., Pavlova N.A., Tetelbaum A.S. Temperature Dynamics of Anthropogenically Salinized Ground under Action of Short-Term Climatic Changes // Proceedings of the 7th International Symposium on Thermal Engineering and Science for Cold Regions. Seoul, Korea, 2001. P. 205–208.

9. Данзанова М.В. Условия поверхностного стока и физические свойства грунтов сезонноталого слоя микрорайона «Мерзлотка» // Материалы конференции научной молодежи: к 60-летию Якутского научного центра СО РАН и Году молодежи. Якутск: Изд-во ООО РИО «Феникс», 2009. С. 122–126.

10. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 169 с.

11. Скрябин П.Н., Варламов С.П. Оценка теплового состояния нарушенных ландшафтов при восстановлении растительности // Успехи современного естествознания. 2013. №2. С. 73–76.

12. Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Argunov R.N., Efremov P.V., Iwahana G., Machimura T., Lopez L.M., Takakai F. Variability of permafrost and landscape conditions following clear cutting of larch forest in Central Yakutia // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. V.28. Issue 1. P. 331–338.

Поступила в редакцию 01.03.2017