

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 551.34:556.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-6(26-34)

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ТЕХНОГЕННЫХ КРИОПЭГОВ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ЯКУТСКА

Н.А. Павлова, М.В. Данзанова

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; na-pavlova@yandex.ru*

Представлен анализ материалов 30-летних наблюдений за динамикой химического состава антропогенных криопэгов, вскрытых на разных глубинах в толще рыхлых аллювиальных отложений на одном из участков территории г. Якутска. Рассмотрены особенности многолетней и сезонной изменчивости макро- и микроэлементного состава подземных вод. Установлено, что наблюдаемое на протяжении последних 5–7 лет опреснение надмерзлотных криопэгов обусловлено климатическими особенностями предшествующего многолетнего периода. На основе результатов гидрохимических и гидродинамических исследований обосновывается вывод об улучшении гидравлической связи криопэгов, залегающих в слое годовых теплооборотов. В условиях повышения температуры грунтов, наряду с общим снижением содержания легкорастворимых солей в надмерзлотных водах, прогнозируется рост концентрации микроэлементов в поровых растворах.

Надмерзлотные и межмерзлотные криопэги, гидрохимические исследования, макро- и микрокомпоненты, многолетний режим

INTERANNUAL VARIABILITY IN CHEMICAL COMPOSITION
OF ANTHROPOGENIC CRYOPEGS WITHIN YAKUTSK CITY

N.A. Pavlova, M.V. Danzanova

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; na-pavlova@yandex.ru*

Long-term and seasonal variations in major- and trace-element compositions of groundwaters in anthropogenic cryopegs stripped by boreholes in unconsolidated alluvial sediments have been monitored for thirty years at a site within Yakutsk city. Suprapermafrost cryopegs became less saline for the past five to seven years as a result of climate change in many previous years. The obtained data on chemistry and flow dynamics of groundwaters indicate enhanced hydraulic connectivity of cryopegs in the active layer. The ongoing ground temperature warming will lead to general decrease in the contents of highly soluble salts in suprapermafrost cryopegs and to increase in trace element abundances in pore waters.

Suprapermafrost cryopeg, intrapermafrost cryopeg, water chemistry, major and trace elements, long-term regime

ВВЕДЕНИЕ

На урбанизированных территориях криоли-тозоны Центральной Якутии сложилась негативная геоэкологическая ситуация в связи с увеличением техногенной засоленности почвогрунтов, развитием процессов подтопления и образованием техногенных криопэгов. Особенно остро эта проблема ощущается в г. Якутске, где из года в год увеличивается число аварийных зданий из-за неравномерных просадок фундаментов, обусловленных указанными процессами [Геокриологические опасности, 2000; Степанов и др., 2014]. В пределах города наибольшее содержание солей в верхних слоях разреза отмечается, как правило, в кварталах ранней застройки, испытывающих антропо-

генный пресс более 300 лет [Торговкин, Макаров, 2015]. В этих районах засоленность грунтов деятельного слоя превышает 1 % [Макаров, 2011]. Надмерзлотные воды, формирующиеся в теплый период года в сезоннопротаивающих породах, также имеют повышенную минерализацию, которая изменяется от 1 до 4 г/л, а на участках с затрудненными условиями стока может достигать 6–9 г/л [Санникова, 2005; Шепелев, 2011; Данзанова, 2016]. В анионном составе надмерзлотных вод сезонноталого слоя преобладает гидрокарбонат-ион при повышенном содержании хлора. Среди катионов превалирует натрий, подчиненное место занимает магний, содержание кальция редко пре-

вышает 20 %. Концентрирование хлоридов натрия и магния, имеющих низкие температуры начала кристаллизации, в надмерзлотных водах предохраняет их от замерзания в зимний период и способствует формированию водно-химических таликов с криопэгами [Анисимова, 1981; Фотиев, 2009]. В г. Якутске подобные талики разной мощности и конфигурации часто вскрывают скважинами на участках сноса старой деревянной застройки, в замкнутых низинах и озерных котловинах, а также на участках, прилегающих к дорогам и засыпанным ложбинам стока [Анисимова, 1981; Коносовский, 1983; Anisimova, Kurchatova, 2000]. Химический состав криопэгов зависит от вида техногенной нагрузки и степени ее воздействия, а также от температуры водовмещающих пород и условий их промерзания. Наиболее распространены криопэги с минерализацией до 20 г/л, в древней части Якутска минерализация их возрастает до 35–200 г/л. Температура кристаллизации таких растворов составляет от -0.5 до -8.0 °С.

Для выявления пространственно-временных закономерностей формирования антропогенных криопэгов и развития гидрогеохимических процессов, происходящих при освоении территории криолитозоны и современных изменениях климата, были организованы многолетние наблюдения за режимом высокоминерализованных подземных вод с отрицательной температурой, вскрытых на разных глубинах в толще рыхлых аллювиальных отложений на одном из участков в г. Якутске.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Город Якутск расположен на низкой надпойменной террасе р. Лены в среднем ее течении. Для террасы характерен сглаженный рельеф, абсолютные отметки поверхности изменяются от 94 до

102 м [Спектор и др., 2008]. Многолетнемерзлые породы мощностью свыше 300 м имеют площадное распространение. Глубина сезонного протаивания пород на территории города изменяется от 0.5 до 4.5 м и зависит в основном от литологического состава отложений, их влажности, засоленности и затененности поверхности. В последние десятилетия многими исследователями отмечается рост температуры грунтов и увеличение мощности сезонноталого слоя. Основной естественной причиной изменения геокриологической обстановки является повышение приземной температуры воздуха в зимний период, наблюдаемое с 1990-х гг., и рост количества атмосферных осадков (рис. 1) [Варламов и др., 2010; Iijima et al., 2010]. Среди техногенных факторов следует отметить прокладку подземных тепловыделяющих коммуникаций, аварийные утечки из различных водоводов и нарушение условий естественного стока надмерзлотных вод [Сыромятников, Дорофеев, 2014; Заболотник, 2015].

Научно-экспериментальный полигон, на котором проводились режимные наблюдения за изменением мерзлотно-гидрогеологической обстановки, расположен в юго-западной окраинной части г. Якутска и приурочен к основанию пологого склона небольшого эрозионного понижения. Освоение данной территории началось относительно недавно – в 1960-х гг. Понижение, в котором до застройки произрастал березовый лес, заросло камышом. Аллювиальные четвертичные отложения мощностью 20–25 м представлены разнотернистыми песками, перекрытыми до глубины 2.0–2.5 м суглинками и супесями. Мощность слоя сезонного протаивания пород составляет 1.8–2.0 м, а глубина распространения годовых колебаний температур – 16–17 м.

Первые сведения о надмерзлотных криопэгах на этом участке были получены в 1981–1983 гг.,

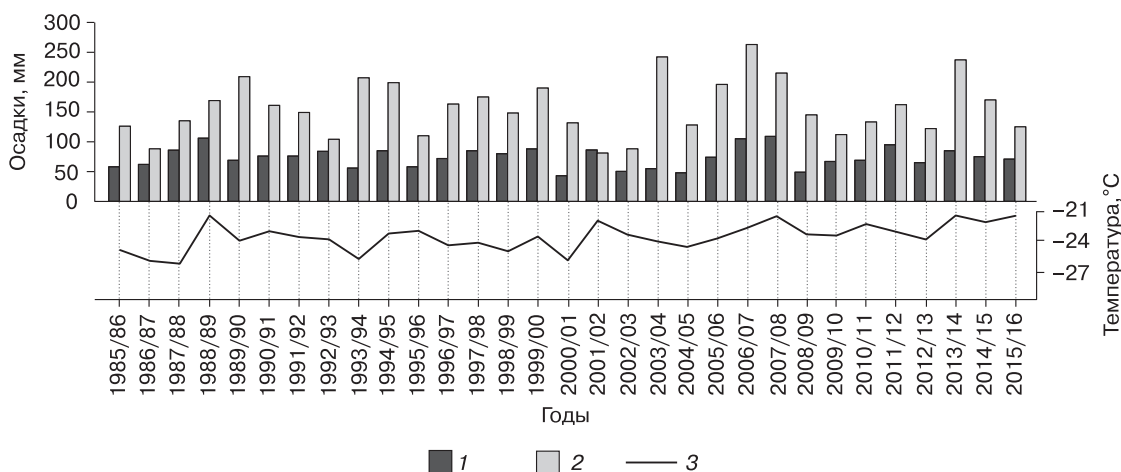


Рис. 1. Изменение суммы атмосферных зимних (1) и летних (2) осадков и средних месячных температур воздуха (3) холодного периода (октябрь–апрель) в г. Якутске в 1986–2016 гг.

когда при бурении зондировочных скважин были вскрыты водонасыщенные отложения на глубинах от 1.8 до 3.4 м [Андреев, 1985]. Мощность обводненных слоев изменялась от 0.4 до 2.0 м, минерализация надмерзлотных вод составляла 4.1–12.6 г/л, а температура вмещающих их грунтов колебалась в пределах $-0.5...-0.8$ °С. Площадь, на которой были обнаружены криопэги, составляла 0.06 км². Формирование соленых вод в основании сезонного промерзания пород произошло в результате инфильтрации загрязненных надмерзлотных стоков, стекающих с окружающей территории, и их криогенной метаморфизации в условиях затрудненного водообмена. Систематические мерзлотно-гидрогеохимические исследования надмерзлотных вод проводятся с 1985 г. Первоначально они велись по четырем скважинам. Их заглубляли в многолетнемерзлые породы не менее чем на 1 м и оборудовали фильтром в интервале водоносного горизонта. В центральной части полигона зимой 2016 г. в 1 м от имеющейся скважины № 3 была пробурена и оборудована еще одна. В настоящее время фильтр в старой скважине расположен в ин-

тервале 1–3 м, а в новой установлен в интервале 4–6 м. Гидрогеологические наблюдения проводятся в обеих скважинах.

Изучение режима межмерзлотных криопэгов, залегающих в интервалах глубин 7–8 м (второй ярус) и 17–19 м (третий ярус), началось в 1988 г. [Ним, Федоров, 1989]. Минерализация межмерзлотных вод на момент бурения составляла 26–30 г/л, а температура – от -0.8 до -1.2 °С. Как показали дальнейшие исследования, формирование криопэгов на глубине 7–8 м связано с динамикой метеорологических параметров в годовом и многолетнем циклах [Анисимова, Павлова, 2002, 2014; Anisimova et al., 2001]. Образование линзы межмерзлотных криопэгов на глубине более 10–15 м может происходить при промерзании реликтовых пойменных или подозерных таликов, вода которых при медленном охлаждении окружающих пород в замкнутых условиях приобретает повышенную минерализацию [Анисимова, 1971]. На территории г. Якутска причиной формирования криопэгов в нижних слоях аллювиальных песков часто служит техногенное повышение температуры пород, по которым происходит миграция растворенных солей из засоленных верхних горизонтов. Так, на рассматриваемом полигоне после прокладки в 1983 г. подземного канализационного трубопровода на прилегающем к нему участке температура грунтов в интервале 2–7 м повысилась на 0.2–0.4 °С. Диффузионное перераспределение ионов при высокой отрицательной температуре привело к засолению всей толщи аллювиальных отложений и способствовало формированию в основании слоя годовых теплооборотов линзы криопэгов (рис. 2).

Наблюдения за режимом третьего яруса криопэгов продолжают до настоящего времени, а за линзой межмерзлотных вод второго яруса были прекращены в 2004 г. в связи с ее пространственной миграцией [Павлова и др., 2009]. В первый год исследований измерения уровня воды в гидрогеологических скважинах и отбор водных проб для определения макрокомпонентного состава криопэгов проводились ежедекадно, а затем до 2001 г. – ежемесячно. В дальнейшем, после установления основных закономерностей внутригодового режима подземных вод, в методику наблюдений были внесены коррективы. Для оценки изменчивости микроэлементного состава криопэгов в годовом цикле в 2015 и 2016 гг. пробы воды из скважин отбирались один раз в месяц с марта по декабрь. Для изучения распределения температуры грунтов по разрезу были пробурены геотермические скважины до глубины 5–20 м. Температура в них измерялась переносными косами до глубины 5 м через 0.5 м, а глубже – через 1 м. Сроки геотермических и гидрогеологических наблюдений совпадали.

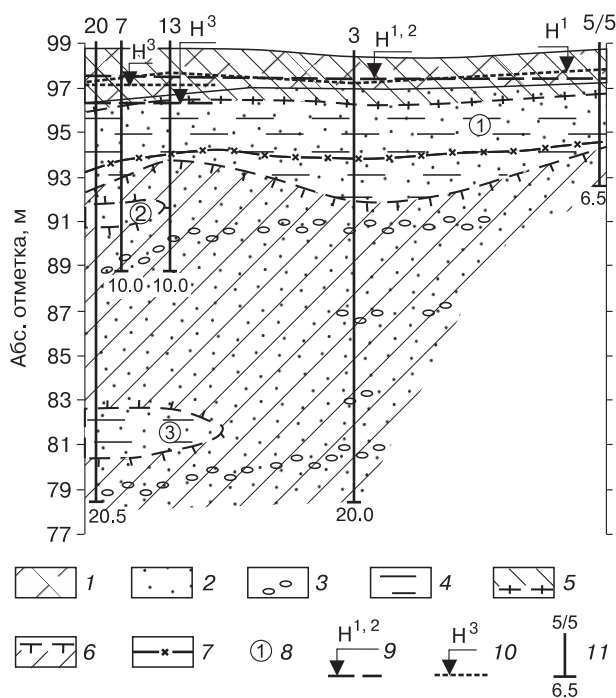


Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез изучаемого участка:

1 – переслаивание супесей и суглинков; 2 – пески разнозернистые; 3 – галька; 4 – водонасыщенные грунты; 5 – слой сезонного промерзания и его граница; 6 – многолетнемерзлые грунты и их граница в мае 2016 г.; 7 – подошва надмерзлотных криопэгов в мае 1992 г.; 8 – номер яруса криопэгов; 9, 10 – уровень криопэгов: 9 – в мае 1992 г., 10 – в мае 2016 г., индекс сверху – номер яруса криопэгов; 11 – наблюдательная гидрогеологическая скважина: цифра сверху – номер скважины, внизу – глубина, м.

Для контроля мерзлотно-гидрогеологической обстановки и изучения изменения засоленности пород по разрезу в отдельные годы бурились дополнительные скважины глубиной 5–20 м с отбором проб грунта. Лабораторные исследования воды и водной вытяжки пород проводились методами титриметрии и капиллярного электрофореза в Институте мерзлотоведения СО РАН. В 2015–2016 гг. химический состав воды определялся масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами анализа с индуктивно связанной плазмой в Аналитическом сертификационном испытательном центре (АСИЦ) Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (ИПТМ) РАН (г. Черноголовка). Нормализация состава редкоземельных элементов (РЗЭ) в криопэгах проведена относительно составов Северо-Американского сланца (NASC) и глин Русской платформы [Дубинин, 2006; Gromet et al., 1984].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Надмерзлотные криопэги имеют наиболее выдержанное распространение по площади (см. рис. 2). В связи с их неглубоким залеганием от поверхности земли гидродинамический и гидрохимический режим подземных вод здесь в большей степени подвержен сезонной и многолетней изменчивости.

Максимальную мощность (до 3–5 м) водоносный слой имеет в осенний период. В это время кровля его залегает на глубине 1.8–2.5 м, а подземные воды имеют минимальную минерализацию, их величина рН изменяется на разных участках полигона от 7.4 до 9.1. В октябре, с началом промерзания супесей и суглинков, отмечается небольшое понижение уровня и минерализации надмерзлотных криопэгов вследствие переноса влаги и солей в область более низких отрицательных температур.

Дисперсные отложения, перекрывающие криопэги, промерзают полностью, как правило, в феврале–марте. С этого времени льдообразование в водонасыщенных песках сопровождается повышением минерализации остаточного раствора в основном за счет солей с низкой температурой замерзания – хлоридов и сульфатов натрия, а также хлоридов магния, рН воды понижается до 6.0–7.3. Криогенный напор в водно-химическом талике достигает максимальной величины в мае–июне (рис. 3). Протаивание покровных суглинков начинается с конца мая и заканчивается в середине июля, а иногда продолжается до сентября. Уровень надмерзлотных криопэгов постепенно понижается, а их минерализация уменьшается за счет разбавления водой тающего внутригрунтового льда. В процессе протаивания пород в подземных водах возрастает доля гидрокарбонатных солей. Осенью при смешивании надмерзлотных криопэгов с инфильтратом атмосферных осадков уровень воды в скважинах повышается. Годовая амплитуда изменения уровня составляет 1.2–2.2 м. Криопэги второго яруса имеют аналогичный гидрогеологический режим, что свидетельствует об их тесной гидравлической связи с надмерзлотными водами.

Описанная динамика уровня и химического состава подземных вод в разные годы имеет свою специфику и зависит от гидрометеорологических особенностей конкретных лет, засоленности пород, мощности и минерализации криопэгов. В целом по метеорологическим и гидрохимическим особенностям срок наблюдений 1985–2016 гг. условно можно подразделить на три этапа.

Первый этап (1985–1992 гг.), первая его половина, по сравнению с последующими отличается более низкими зимними температурами воздуха и относительно небольшой суммой годовых осадков (см. рис. 1). В октябре 1985 г. надмерзлотные криопэги с минерализацией 12–14 г/л и тем-

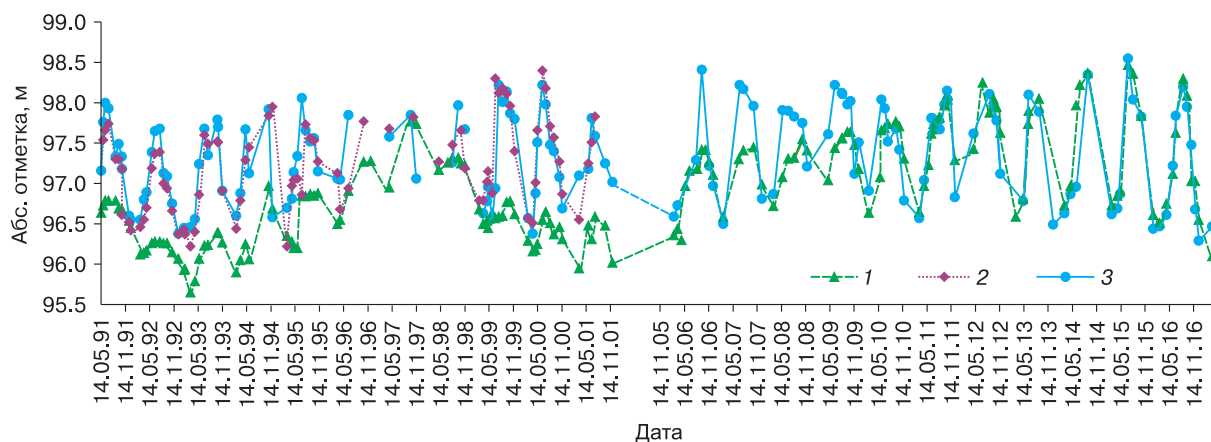


Рис. 3. Изменение уровня криопэгов различных ярусов в многолетнем цикле:

1 – первый ярус (скв. 3); 2 – второй ярус (скв. 7); 3 – третий ярус (скв. 20).

пературой -0.9 °С залежали в интервале глубин 2.2–4.5 м.

Последующей зимой мощность зоны промерзания грунтов достигла 3.5 м. В летние периоды 1986–1989 гг. протаивание пород, перекрывающих криопэги, на отдельных участках происходило не полностью. Сохранение мерзлого перелетка повлияло на интенсивное продвижение фронта холода вглубь зимой. Понижение температуры в интервале водоносного горизонта до -1.2 °С, рост минерализации подземных вод (до 16–18 г/л) способствовали формированию линзы криопэгов в интервале глубин 7–8 м (второй ярус) с концентрацией солей 25–28 г/л. Относительная доля хлоридов натрия в подземных водах в этот период изменялась от 60 до 66 %, хлоридов магния – от 8 до 15 %, а сульфатов магния – от 20 до 27 % (рис. 4).

Во второй этап (1993–2006 гг.) наблюдалось небольшое повышение зимних температур воздуха [Скачков, 2012]. В процессе сезонного промерзания пород кровля верхнего водоносного слоя опускалась до глубины 2.5–3.0 м. Температура грунтов, вмещающих и подстилающих криопэги, составляла $-0.8...-1.1$ и $-1.2...-1.4$ °С соответственно. Минерализация надмерзлотных вод была 15–18 г/л зимой и снижалась до 10–12 г/л осенью. Концентрация солей в линзе криопэгов второго яруса в течение года изменялась в пределах 16–22 г/л. В составе воды верхних водоносных слоев оставались преобладающими хлориды натрия (62–66 %) и сульфаты магния (20–30 %). Хлориды магния (до 7–13 %) проявлялись лишь в зимние месяцы. Сумма гидрокарбонатов и сульфатов кальция не превышала 4–9 %.

Третий этап (2006–2016 гг.) отличается от предыдущих значительным ростом температуры воздуха, а его начало – еще и увеличением количества атмосферных осадков. Относительно мягкие зимы с повышенной мощностью снежного покрова не способствовали глубокому оттеснению криопэгов вниз по разрезу и существенному криогенному концентрированию солей зимой. Мощность сезонномерзлого слоя в эти годы не превышала 2–3 м. Температура грунтов в интервале залегающих криопэгов не опускалась ниже -0.5 °С, а температура подстилающих мерзлых пород стала $-0.7...-0.9$ °С.

В течение последнего десятилетия на полигоне наблюдалось опреснение подземных вод. Минерализация надмерзлотных криопэгов в зимний период достигала 7–10 г/л, а летом и осенью была 3–5 г/л. Несмотря на общее понижение солёности воды, в ее составе преобладали хлориды натрия (53–66 %) и сульфаты магния (20–31 %). Характерно полное отсутствие в надмерзлотных криопэгах хлоридов магния – одного из признаков криогенной метаморфизации воды, и появление сульфатов натрия (до 10–13 %). Подобное опреснение

надмерзлотных вод в это время отмечалось и на другом наблюдательном участке, также расположенном в г. Якутске [Данзанова, 2014].

Криопэги, залегающие в основании слоя годовых теплооборотов (третий ярус), имеют локальное развитие, что подтверждается данными геофизических и буровых работ, выполненных в разные годы на полигоне [Ним, Федоров, 1989; Павлова и др., 2009]. По отношению к многолетнемерзлым породам подобные криопэги можно отнести к межмерзлотным водам. По химическому составу они близки к надмерзлотным водам, но характеризуются повышенной минерализацией и небольшими сдвигами во времени наступления ее экстремумов.

Пьезометрический уровень межмерзлотных криопэгов залегают наиболее близко к поверхности земли в конце летнего сезона (август–сентябрь). В эти же месяцы отмечаются максимальные значения минерализации криопэгов – 25–30 г/л (рис. 5). С ноября по февраль–март прослеживаются понижение их пьезометрического уровня и уменьшение содержания солей до 22–26 г/л. С марта по август происходит рост уровня и минерализации воды. На протяжении всего срока наблюдений соотношение солей в составе криопэгов не меняется: преобладают хлориды натрия (55–67 %) и сульфаты магния (28–35 %), содержание хлоридов магния 10–14 %, величина рН колеблется в пределах 6.3–7.3. Температура водо-вмещающих пород достаточно стабильна ($-1.1...-1.2$ °С).

В многолетнем цикле по особенностям гидродинамического режима криопэгов нижнего яруса можно выделить лишь два этапа, не совпадающих по времени с выделенными периодами для надмерзлотных вод. Отличительной чертой режима межмерзлотных криопэгов в первый этап (1988–2009 гг.) является более низкое положение их уровня относительно вышележающих подземных вод (см. рис. 2). Разница в уровнях была максимальной в мае–июле, когда она достигала 1.2–1.6 м, и минимальной в ноябре–декабре – 0.2–0.6 м.

Начало второго периода относится к 2009 г. С этого времени прослеживалась постепенная синхронизация уровней надмерзлотных и межмерзлотных криопэгов, а с 2011 г. абсолютные отметки поверхности воды во всех скважинах практически стали совпадать, что свидетельствует об улучшении гидравлической связи подземных вод, залегающих на разных глубинах (см. рис. 3). Повидимому, на изменение гидродинамической обстановки повлияли метеорологические особенности 2006–2008 гг., когда повсеместно в Центральной Якутии отмечалось увеличение количества атмосферных осадков, обеспечившее значительные ресурсы надмерзлотных и связанных с ними

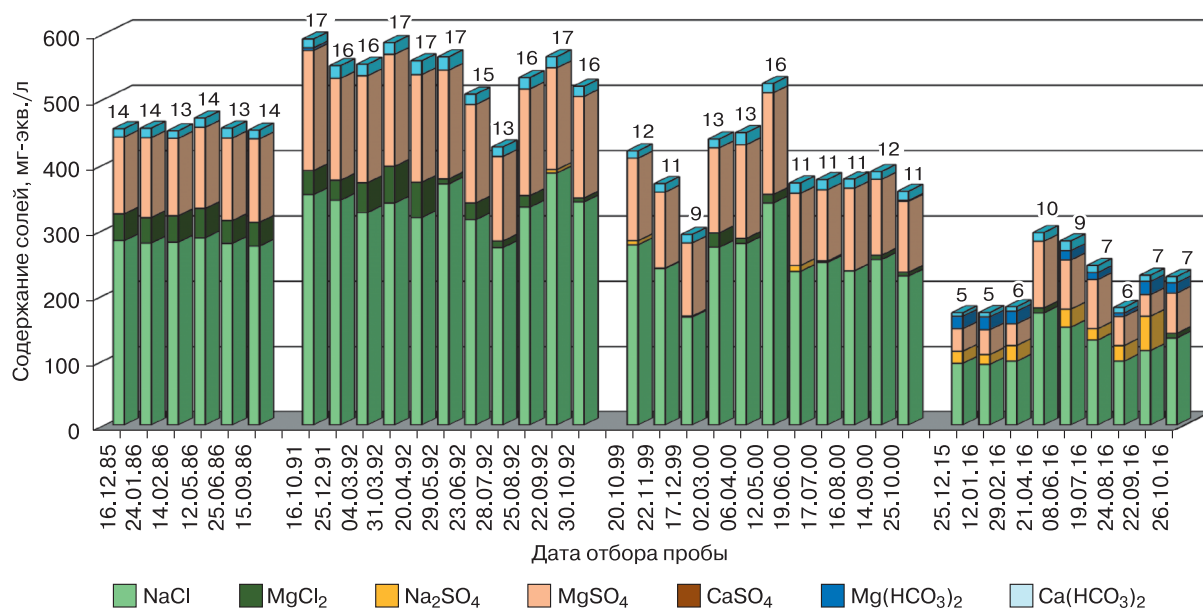


Рис. 4. Изменение солевого состава надмерзлотных криопэггов в многолетнем цикле (скважина 3).

Цифра сверху – сумма минеральных веществ, г/л.

межмерзлотных вод. Снижение в 2015–2016 гг. минерализации криопэггов третьего яруса до 18–25 г/л подтверждает улучшение взаимосвязи разных водоносных слоев.

В 2015–2016 гг. были впервые получены данные по содержанию и изменению микрокомпонен-

тов, включая РЗЭ, в криопэггах на рассматриваемом полигоне (см. таблицу). Установлено, что концентрация микрокомпонентов в надмерзлотных криопэггах меньше, чем в межмерзлотных, в 3–5 раз. Однако элементный состав воды в верхних слоях разреза более разнообразен и изменчив,

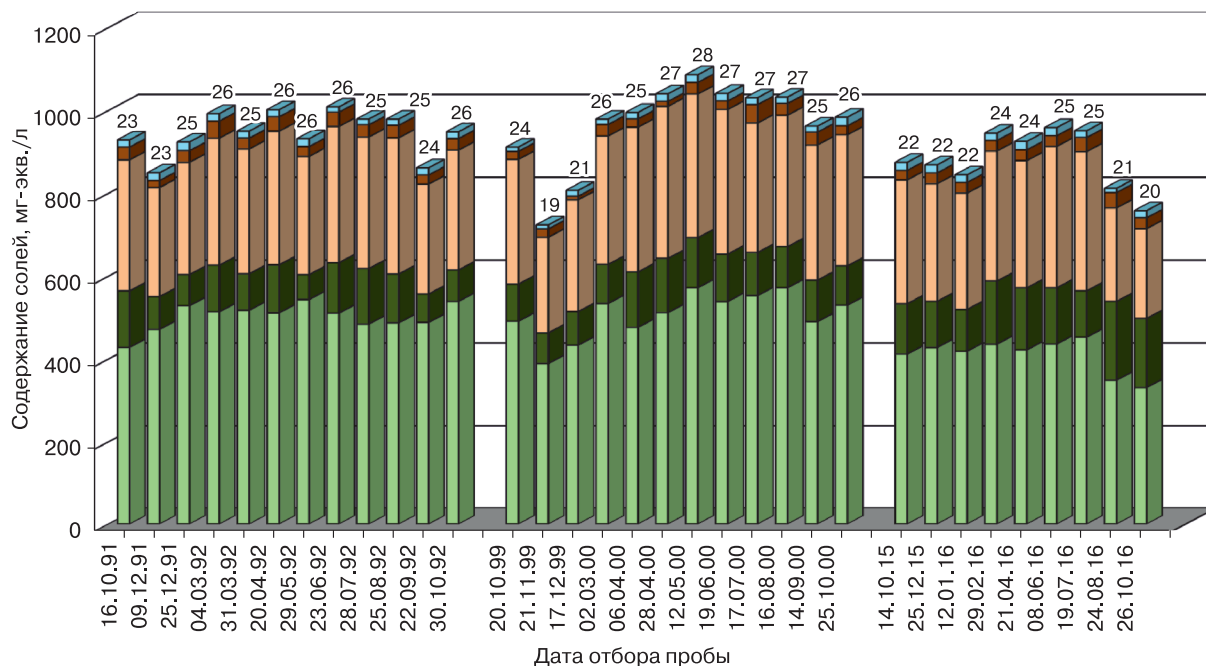


Рис. 5. Изменение солевого состава криопэггов нижнего яруса в многолетнем цикле (скважина 20).

Условные обозн. см. на рис. 4.

**Содержание отдельных микрокомпонентов
в криопэгах в течение года на экспериментальном
полигоне**

| Эле- мент | Ед. изм. | Глубина залегания криопэгов, м | | | |
|------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| | | Скв. 3 1.8–6.0 | Скв. 5/5 1.5–3.0 | Скв. 13 1.8–4.2 | Скв. 20 16.0–18.0 |
| pH | | 6.6–8.5 7.6 | 6.8–9.8 8.0 | 6.0–9.7 7.7 | 6.1–7.9 7.1 |
| F | мг/л | 0.5–3.1 1.6 | 0.4–2.3 1.1 | 0.3–3.9 1.2 | 0.2–12.7 3.4 |
| Br | мг/л | 1.8–5.7 3.3 | 1.5–4.8 3.1 | 2.2–7.1 4.4 | 13.2–19.2 15.9 |
| Ba | мг/л | 0.02–0.2 0.1 | 0.007–0.1 0.07 | 0.01–0.4 0.2 | 0.02–0.05 0.04 |
| Sr | мг/л | 0.6–2.6 1.5 | 0.4–4.0 1.8 | 1.1–3.9 2.5 | 11.4–15.1 12.8 |
| Al | мг/л | 0.04–4.8 2.3 | 0.07–4.7 1.5 | 0.07–67.2 8.3 | 0.07–0.9 0.3 |
| Fe | мг/л | 0.6–115.6 40 | 0.3–126.0 52 | 0.9–374.0 134 | 17.0–174.0 67 |
| Mn | мг/л | 0.3–4.0 1.3 | 0.01–2.7 1.2 | 1.0–13.9 2.5 | 1.4–2.7 2.0 |
| Si | мг/л | 0.6–5.9 3.4 | 0.4–5.9 3.2 | 0.3–25.2 6.8 | 0.3–1.4 0.7 |
| Zn | мг/л | 0.007–0.2 0.07 | 0.008–0.5 0.2 | 0.07–2.6 0.7 | 0.02–0.3 0.1 |
| Li | мкг/л | 2.1–11.1 6.4 | 1.1–9.3 5.3 | 2.8–16.7 13.9 | 15.6–18.9 17.5 |
| Cs | мкг/л | 0.01–0.2 0.12 | 0.01–0.1 0.08 | 0.02–0.7 0.2 | 0.05–1.0 0.07 |
| Mo | мкг/л | 1.5–20.7 12.5 | 0.8–28.7 9.2 | 0.5–17.2 6.8 | 1.2–6.8 3.7 |
| Sn | мкг/л | 0.3–24.7 10.7 | 0.3–18.8 7.0 | 0.4–5.4 2.0 | 1.5–5.3 2.8 |
| Sb | мкг/л | 0.3–1.0 0.6 | 0.2–1.0 0.6 | 0.3–1.6 0.9 | 0.3–1.0 0.6 |
| Hf | мкг/л | 0.03–0.4 0.2 | 0.02–0.3 0.2 | 0.07–1.4 0.4 | 0.07–0.2 0.1 |
| Th | мкг/л | 0.03–9.0 3.7 | 0.07–7.5 2.4 | 0.09–41.9 7.6 | 0.08–1.3 0.4 |
| U | мкг/л | 4.5–90.2 49.6 | 11.6–150.1 47.9 | 6.5–224.1 92.5 | 0.3–1.7 0.9 |
| ΣРЗЭ | % | 0.8–242 91 | 0.7–145 53 | 1.2–2198 334 | 1.5–97 8.0 |
| Сумма легких РЗЭ | % | 82–92 86 | 84–94 86 | 84–87 85 | 85–96 89 |
| La _n | | 2.2–3.5 | 2.2–3.6 | 2.6–3.2 | 0.8–6.0 |
| Yb _n | | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 2.5 |

Примечание. В числителе – пределы варьирования, в знаменателе – среднее значение. La_n/Yb_n – отношение, нормированное к стандартному северо-американскому сланцу [Gromet et al., 1984]. Содержание фтора и pH определены в ИМЗ СО РАН методом потенциометрического анализа, содержание остальных элементов – в АСИЦ ИПТМ РАН масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами анализа с индуктивно связанной плазмой.

чем в линзе криопэгов, залегающих на глубине 17–19 м. В надмерзлотных водах накапливаются алюминий, кремний, барий, молибден, олово, сурьма, цезий, гафний, торий, уран. В межмерзлотных криопэгах в значительно превосходящих количествах обнаружены такие подвижные элементы, как фтор, литий, стронций, бром. Такая дифференциация микроэлементов в подземных водах разных водоносных слоев может быть связана как с повышенной глинистостью отложений в верхней части разреза, так и с более низкими температурами на глубине 17–19 м, ограничивающими выщелачивающую способность криопэгов.

Какой-либо сезонной изменчивости в содержании большинства микроэлементов в подземных криопэгах не прослеживается. Исключение составляют лишь литий, стронций и цинк, максимальные концентрации которых отмечаются в конце наибольшего сезонного промерзания пород, характеризующегося ростом минерализации воды и небольшим повышением ее кислотности. В осенние месяцы несколько увеличивается интенсивность поступления молибдена, олова и сурьмы.

Содержание РЗЭ в изученных криопэгах значительно варьирует в течение года. Минимальные концентрации редких земель чаще отмечаются летом и увеличиваются в период зимнего промерзания пород. В общем количестве элементов редкоземельной группы преобладают легкие (La–Sm), доля которых составляет 82–96 %. Профили распределения РЗЭ в криопэгах, нормированные по отношению к Северо-Американскому сланцу и глинам Русской платформы, однотипные и имеют относительно сглаженный характер.

Наиболее низкие концентрации РЗЭ присущи межмерзлотным криопэгам, где в водовмещающих отложениях практически отсутствуют глинистые фракции. О переносе редких земель в составе взвеси свидетельствует сравнение их содержаний в фильтрованных и нефильТРованных пробах воды. Установлено, что при фильтрации проб надмерзлотных криопэгов через целлюлозный фильтр (диаметр пор 0.45 мкм) концентрация в них РЗЭ уменьшается в 4–6 раз, тогда как в межмерзлотных водах только в 0.5–0.8 раза.

Надежной зависимости между содержанием РЗЭ в криопэгах и макрокомпонентами, а также pH раствора не прослеживается. Отмечена лишь небольшая корреляционная связь содержания РЗЭ с концентрациями в них железа и кальция (коэффициенты корреляции 0.6 и 0.7 соответственно). Установлены отчетливые корреляционные зависимости содержания РЗЭ от содержания алюминия, кремния и марганца (коэффициенты корреляции 0.98, 0.95 и 0.96 соответственно), что, вероятно, связано как с поступлением РЗЭ в раствор в процессе выветривания и выщелачивания

алюмосиликатов водовмещающих пород, так и с активным участием этих элементов во вторичном минералообразовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов многолетних исследований, выполненных на территории г. Якутска, показал высокую зависимость гидродинамического и гидрохимического режима надмерзлотных криопэгов от совокупного влияния температуры воздуха и атмосферных осадков. Повторяющиеся друг за другом холодные малоснежные зимы способствуют быстрому проникновению фронта промерзания вглубь, оттеснению надмерзлотных криопэгов на большую глубину и криогенному концентрированию солей в остающемся поровом растворе. После череды относительно мягких зим с повышенной толщиной снежного покрова отмечаются увеличение мощности водоносного слоя и опреснение надмерзлотных вод.

Установленное однообразие химического состава криопэгов разных ярусов и синхронность изменения их уровней свидетельствуют о гидравлической связи подземных вод, залегающих в слое годовых теплооборотов. В условиях современного потепления климата происходит улучшение этой связи, что отражается в тенденции выравнивания абсолютных отметок уровня воды в скважинах и небольшого уменьшения минерализации криопэгов нижнего яруса вслед за надмерзлотными водами.

Наблюдения за микрокомпонентным составом подземных вод показали обеднение спектра микроэлементов в межмерзлотных криопэгах по сравнению с надмерзлотными. Повышенные содержания фтора, лития, стронция, брома в криопэгах нижнего яруса связаны с хорошей миграционной способностью этих элементов и их накоплением при затрудненном водообмене.

В условиях продолжающегося повышения температуры грунтов можно ожидать роста концентрации микроэлементов, в том числе высокотоксичных, в поровых растворах верхних водоносных слоев, где физико-химические процессы в системе вода–порода происходят наиболее интенсивно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-45-05050).

Литература

- Андреев С.В.** К вопросу о борьбе с антропогенными криопэгами // Региональные и инженерные геокриологические исследования. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1985, с. 127–132.
Andreev, S.V., 1985. On combat against anthropogenic cryopegs, in: Regional and Engineering Geocryological Studies, Institute of Permafrost, Yakutsk, pp. 127–132. (in Russian)
- Анисимова Н.П.** Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М., Наука, 1971, 195 с.
Anisimova, N.P., 1971. Formation of Groundwater Chemistry in Taliks (Central Yakutia). Nauka, Moscow, 195 pp. (in Russian)
- Анисимова Н.П.** Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, Наука, 1981, 153 с.
Anisimova, N.P., 1981. Cryological and Chemical Features of Permafrost. Nauka, Novosibirsk, 153 pp. (in Russian)
- Анисимова Н.П.** Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2014, 189 с.
Anisimova, N.P., Pavlova, N.A., 2014. Permafrost Groundwater Chemistry in Central Yakutia. Academic Publ. House “Geo”, Novosibirsk, 189 pp. (in Russian)
- Анисимова Н.П., Павлова Н.А.** Особенности формирования криопэгов в слое годовых теплооборотов на территории Якутска // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 4, с. 63–69.
Anisimova, N.P., Pavlova, N.A., 2002. Features of cryopeg formation in the active layer within Yakutsk city. Earth’s Cryosphere VI (4), 63–69.
- 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.
Varlamov, S.P., Skryabin, P.N., Skachkov, Yu.B., 2010. Ground temperature monitoring in the Tuimaada valley, in: Solutions to Key Development Problems in Yakutsk city: Theoretical Background, Sfera, Yakutsk, pp. 97–102. (in Russian)
- Геокриологические опасности.** Тематический том / Под ред. Л.С. Гарагули, Э.Д. Ершова. М., Издат. фирма “КРУК”, 2000, 316 с.
Garagula, L.S., Ershov, E.D. (Eds.), 2000. Geocryological Hazard. Collection of Papers. KRUK, Moscow, 316 pp. (in Russian)
- Данзанова М.В.** Динамика мерзлотно-гидрогеологических условий на стационаре “Туймаада” (г. Якутск) // Наука и образование, 2014, № 4 (76), с. 46–50.
Danzanova, M.V., 2014. Variations in permafrost properties and pore water chemistry at the Tuimaada site (Yakutsk). Nauka i Obrazovanie, No. 4 (76), 46–50.
- Данзанова М.В.** Закономерности формирования и режима надмерзлотных и межмерзлотных вод на урбанизированных территориях криолитозоны (на примере г. Якутска): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2016, 23 с.
Danzanova, M.V., 2016. Formation and Regime of Suprapermafrost and Intrapermafrost Groundwaters in the Urban Permafrost Territory (Case Study of Yakutsk). Author’s Abstract, Candidate Thesis (Geology and Mineralogy). Yakutsk, 23 pp. (in Russian)
- Дубинин А.В.** Геохимия редкоземельных элементов в океане. М., Наука, 2006, 360 с.
Dubinin, A.V., 2006. Rare Earth Element Geochemistry of the Ocean. Nauka, Moscow, 360 pp. (in Russian)
- Заболотник П.С.** Влияние аварийных утечек воды на температурный режим грунтов оснований зданий Якутской ТЭЦ // Наука и образование, 2015, № 2 (78), с. 75–78.
Zabolotnik, P.S., 2015. Effect of emergency water leakage on ground temperatures under the buildings of the Yakutsk thermal power station. Nauka i Obrazovanie, No. 2 (78), 75–78.
- Коносавский П.К.** Тепло- и массоперенос при замещении криопэгов пресными водами // Методика гидрогеологических исследований криолитозоны. Новосибирск, Наука, 1983, с. 73–82.
Konosavskiy, P.K., 1983. Heat and mass transfer upon freshwater replacement of cryopegs, in: Methods for Hydrogeological Studies of Permafrost. Nauka, Novosibirsk, pp. 73–82. (in Russian)

Макаров В.Н. Засоленность грунтов на территории города Якутска // *Материалы IX Междунар. симпозиума “Проблемы инженерного мерзлотоведения”*. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2011, с. 455–459.

Makarov, V.N., 2011. Ground salinity in the territory of Yakutsk, in: *Problems of Engineering Permafrost Science, Proc. IX Intern. Symposium, IMZ, Yakutsk*, pp. 455–459. (in Russian)

Ним Ю.А., Федоров А.М. Зондирование методом переходных процессов при поисках и картографировании криопеггов // *Мерзлотно-гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена*. М., Недра, 1989, с. 112–126.

Nim, Yu.A., Fedorov, A.M., 1989. TEM surveys for detection and mapping of cryopegs, in: *Permafrost and Hydrogeological Studies of Free Water Exchange. Nedra, Moscow*, pp. 112–126. (in Russian)

Павлова Н.А., Ефремов В.С., Нерадовский Л.Г. Изучение динамики техногенных криопеггов на территории города Якутска // *Материалы VII Междунар. конф. “Проблемы снижения природных опасностей и рисков (GeoRisk–2009)”*. М., Изд-во Ун-та Дружбы народов, 2009, т. 1, с. 16–21.

Pavlova, N.A., Efremov, V.S., Neradovskiy, L.G., 2009. Changes in anthropogenic cryopegs in Yakutsk city, in: *GeoRisk–2009. Mitigation of Natural Hazards and Risks, Proc. VII Intern. Conf., Izd. Univ. Druzhby Narodov, Moscow, Book 1*, pp. 16–21. (in Russian)

Санникова А.В. Изучение особенностей режима надмерзлотных вод на урбанизированных территориях криолитозоны (на примере г. Якутска) // *Материалы науч. конф. “Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов”*. Иркутск, Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2005, с. 139–140.

Sannikova, A.V., 2005. Features of suprapermafrost groundwaters in urban permafrost regions (case study of Yakutsk city), in: *Basic Problems in Studies and Use of Water and Water Resources, Proc. Sci. Conf., Institute of Geography, Irkutsk*, pp. 139–140. (in Russian)

Скачков Ю.Б. Тенденции изменения экстремальных значений температуры воздуха в г. Якутске // *Наука и образование*, 2012, № 2, с. 39–41.

Skachkov, Yu.B., 2012. Trends in extreme air temperatures in Yakutsk. *Nauka i Obrazovanie*, No. 2, 39–41.

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.

Spektor, V.V., Bakulina, N.T., Spektor, V.B., 2008. Landforms and age of the Lena River alluvial cover at the “Yakut Robbery”. *Geomorfology*, No. 1, 87–94.

Степанов А.В. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне / А.В. Степанов, Ф.Е. Попенко, И.И. Рожин. Новосибирск, Наука, 2014, 448 с.

Stepanov, A.V., Popenko, F.E., Rozhin, I.I., 2014. *Fundamentals of Engineering Safety for Buildings and Structures on Permafrost*. Nauka, Novosibirsk, 448 pp. (in Russian)

Сыромятников И.И., Дорофеев И.В. Особенности динамики температуры грунтов на территории г. Якутска // *Наука и образование*, 2014, № 4 (76), с. 42–45.

Syromyatnikov, I.I., Dorofeev, I.V., 2014. Ground temperature variations in Yakutsk city. *Nauka i Obrazovanie*, No. 4 (76), 42–45.

Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Засоленность и агрессивность сезоннотальных и многолетнемерзлых грунтов в условиях меняющейся геологической среды на примере Якутска // *Материалы XI Общерос. конф. изыскательских организаций “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”*. М., Академическая наука, 2015, с. 144–146.

Torgovkin, N.V., Makarov, V.N., 2015. Salinity and aggressive reactions of the active layer and permafrost under changing geological conditions, case study of Yakutsk, in: *Prospects in Engineering Surveys for Construction in the Russian Federation, Proc. XI Russian Conf. of Survey Institutions, Akademicheskaya Nauka, Moscow*, pp. 144–146. (in Russian)

Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск, Акад. изд-во “Geo”, 2009, 279 с.

Fotiev, S.M., 2009. *Cryogenic Metamorphism of Rocks and Groundwaters: Conditions and Consequences*. Academic Publ. House “Geo”, Novosibirsk, 279 pp. (in Russian)

Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Geo”, 2011, 169 с.

Shepelev, V.V., 2011. *Suprapermafrost Groundwaters*. Academic Publ. House “Geo”, Novosibirsk, 169 pp. (in Russian)

Anisimova, N.P., Kurchatova, A.N. Relationship between anthropogenic salinity and temperature regime of permafrost (Central Yakutia) // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2000, vol. XI, No. 1, p. 91–95.

Anisimova, N.P., Pavlova, N.A., Tetelbaum, A.S. Temperature dynamics of anthropogenically salinized ground under action of short-term climatic changes // *The 7th Intern. Symposium on Thermal Engineering and Sciences for Cold Regions*. Seoul, Korea, 2001, p. 205–208.

Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A., Korotev, R.L. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, iss. 12, p. 2469–2482.

Iijima, Y., Park, H., Suzuki, K., et al. Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, Central Lena River Basin, Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, vol. 21, No. 1, p. 30–41.

*Поступила в редакцию
3 августа 2017 г.*