

Борис Владимирович ГРИГОРЬЕВ¹

Юлия Фанилевна ЯНБИКОВА²

УДК 551.345

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ИОНОВ СОЛЕЙ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ФРОНТА ЗАМЕРЗАНИЯ*

¹ кандидат технических наук, заведующий
кафедрой прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
b.v.grigorev@utmn.ru

² инженер кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
y.f.yanbikova@utmn.ru

Аннотация

Промышленное освоение криолитозоны зачастую сопровождается изменением теплового режима и нарушением ионно-солевого баланса поверхностного слоя. С этим связана аккумуляция большого количества тепловой энергии и легкорастворимых солей в поверхностном слое грунта, что приводит к увеличению глубины протаивания и засолению грунта на значительных глубинах. Подобные явления имеют место не только в пределах глубины сезонного протаивания, но и в толще мерзлой породы, когда в результате многолетней миграции и концентрирования поровых растворов в подстилающие породы формируются криопэги — линзы талых высокоминерализованных поровых растворов в окружении мерзлого грунта.

* Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ
СП-3897.2018.1.

Цитирование: Григорьев Б. В. Экспериментальное исследование миграции ионов солей в замкнутом объеме при движении фронта замерзания / Б. В. Григорьев, Ю. Ф. Янбикова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 4. С. 93-104.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-93-104

Криопэги широко распространены на всей территории вечной мерзлоты. Они снижают несущую способность грунтов оснований и вызывают коррозию бетонных и металлических конструкций.

В настоящее время криопэги остаются слабоизученными в России и за рубежом, поэтому требуется детальное исследование этого криологического объекта, в частности в лабораторных условиях.

Настоящее исследование посвящено изучению процессов миграции ионов солей в поровой воде при движении фронта замерзания, что является главным фактором криогенного концентрирования.

Для этого авторами разработана экспериментальная установка и создана измерительная ячейка, в которую помещается исследуемый влажный грунт. На противоположных сторонах ячейки задается температура, величиной и скоростью изменения которой регулируется движение границы замерзания, направленное сверху вниз. После ряда циклов замерзания-оттаивания проводится определение концентрации и состава солей в четырех интервалах пробоотбора.

В ходе двух серий экспериментов установлен неожиданный результат — значительное увеличение концентрации на 24 и 29% в области начала движения фронта замерзания. Это может быть объяснено массопереносом концентрированного раствора к центрам кристаллизации за счет осмотических сил, что имеет место для использованных в работе глинистых пылеватых грунтов, обладающих высокой величиной удельной активной поверхности и содержанием большого количества незамерзшей воды.

Ключевые слова

Мерзлый грунт, криопэги, миграция солей, фронт замерзания.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-93-104

Введение

Интенсивное хозяйственное освоение территорий вечной мерзлоты, в частности территорий с непостоянным ионно-солевым составом поверхностных и грунтовых вод, требует оценки температурного и ионно-солевого режима мерзлых засоленных пород. Нестабильность водно-солевого баланса негативно сказывается на физико-механических свойствах грунта-основания и приводит к снижению прочностных характеристик и росту коррозионной активности грунта по отношению к элементам фундамента и дорожным покрытиям [2, 5]. Вечная мерзлота на таких территориях может прерываться линзами грунта, в поровом пространстве которых содержится напорный высокоминерализованный водный раствор при отрицательной температуре. Такие криологические образования — криопэги — возникают в результате естественных или техногенных процессов криогенного метаморфизма. Суть этого явления состоит в том, что в процессе перехода воды в лед часть солей отжимается растущими ледяными включениями в промерзающий раствор, постепенно увеличивая в нем содержание легкорастворимых компонентов [3, 7]. Длительное, много-

кратно повторяющееся движение фронта замерзания — оттаивания способствует миграции и накоплению в ограниченных зонах грунта высокоминерализованного порового раствора, что приводит к образованию криопэггов [8].

Исследования закономерностей криогенного метаморфизма позволяют создать обоснованные методики проведения прогнозных оценок температурного и водно-ионного режима засоленных пород, определяющего состояние и эволюцию ряда районов криолитозоны России (шельф, приморские низменности), которые в настоящее время интенсивно осваиваются [6].

Многообразие химического состава природных засоленных растворов и термобарических условий существования криопэггов затрудняет экспериментальное исследование процессов криогенного метаморфизма в полевых условиях [6]. Для этого необходимы лабораторные исследования с воссозданием условий формирования криопэггов, изучением процессов массообмена и локального накопления ионов солей, установлением факторов равновесия внутри системы «лед — раствор — кристаллы солей» и на границе мерзлая порода — криопэг.

Цель работы — разработать методику и провести эксперименты по изучению процессов миграции ионов солей в поровой воде при вертикальном движении фронта замерзания в ограниченном объеме.

Описание экспериментальной установки

Для выполнения исследований по изучению миграции ионов солей в поровой воде при движении фронта замерзания была разработана оригинальная установка, позволяющая задавать и регулировать скорость движения границы раздела фаз между мерзлым и талым грунтом в замкнутом объеме. В состав установки входит измерительная ячейка с исследуемым грунтом, система поддержания температуры холодного спаи термопар и криокамера.

Измерительная ячейка (рис. 1) представляет собой цилиндр (1) диаметром 50 мм и высотой 220 мм, в который помещается исследуемый грунт (7). С боковой стороны вовнутрь цилиндра введены спаи медь-константановых термопар (8). Количество термопар — 7, они пронумерованы сверху вниз. С торцевых сторон цилиндр ограничивают два алюминиевых диска (3), внешняя сторона которых стыкуется с соответствующими элементами Пельтье (2) для задания необходимой положительной или отрицательной температуры. Радиаторы (11) с вентиляторами (10) для отвода или подвода тепла пристыкованы к противоположным сторонам элементов Пельтье. Цилиндр имеет двойную теплоизоляцию (4), (6) из вспененного полиэтилена со стабилизатором градиента температуры (5), одеваемым на первый слой изоляции (4). Вся конструкция стягивается шпильками (9).

Методика проведения эксперимента

Был проведен предварительный опыт по определению температуры начала замерзания используемого типа грунта (суглинка), насыщенного хлоридно-сульфатным натриево-магниевым и хлоридно-сульфатным натриево-магниевым кальциевым растворами с концентрацией 40 г/л. Дополнительно определены значения температуры замерзания используемых растворов.

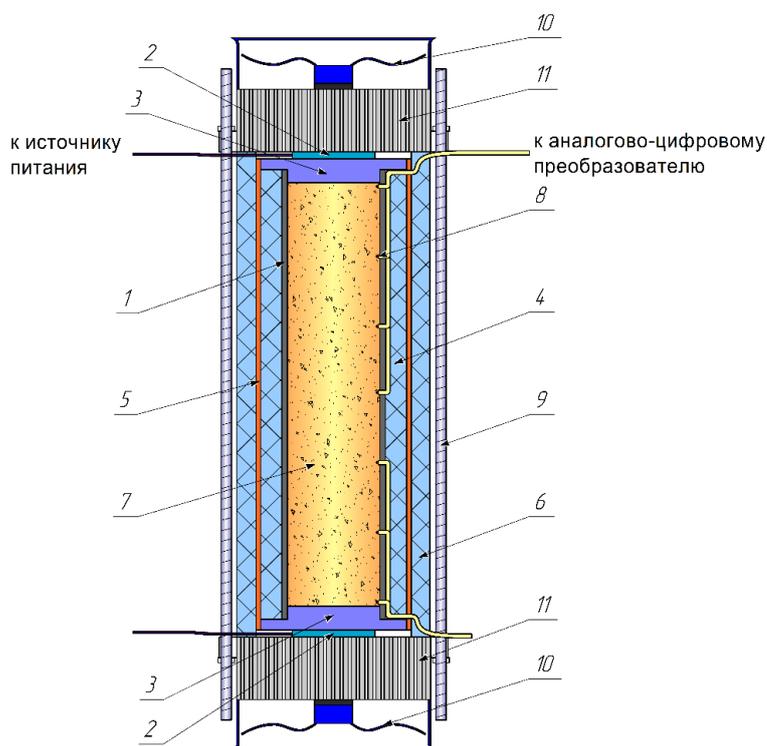


Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки:

- 1 — цилиндр для грунта;
- 2 — элементы Пельтье;
- 3 — алюминиевые диски;
- 4, 6 — теплоизоляция;
- 5 — медный кожух;
- 7 — грунт;
- 8 — термопары Т-типа;
- 9 — шпильки;
- 10 — вентиляторы;
- 11 — радиаторы

Fig. 1. The scheme of the experimental unit:

- 1 — cylinder case for the ground;
- 2 — Peltier elements;
- 3 — aluminum disks;
- 4, 6 — insulation;
- 5 — copper case;
- 7 — ground;
- 8 — type T thermocouples;
- 9 — studs;
- 10 — ventilators;
- 11 — radiators

Результаты этих экспериментов необходимы для отслеживания перемещения фронта замерзания грунта в ходе эксперимента, то есть понимания фазового состава порового раствора в каждой точке при конкретной температуре.

Были сделаны следующие выводы:

1. Температура замерзания суглинка, насыщенного хлоридно-сульфатным натриево-магниевым раствором с концентрацией 40 г/л, равна $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Температура замерзания суглинка, насыщенного хлоридно-сульфатным натриево-магниевым-кальциевым раствором с концентрацией 40 г/л, равна $-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Температура замерзания хлоридно-сульфатного натриево-магниевого раствора с концентрацией 40 г/л равна $-1,6$ °С.
4. Температура замерзания хлоридно-сульфатного натриево-магниево-кальциевого раствора с концентрацией 40 г/л равна $-2,3$ °С.

Описание хода эксперимента

Эксперимент проводится в следующей последовательности:

1. Грунт измельчается и просеивается через сито. В экспериментах применялся суглинок с высокой долей пылеватой фракции и пористостью $(45,8 \pm 0,5)$ %.
2. Подготавливается солевой раствор концентрации 40 г/л и заданного химического состава. Массовые доли компонентов в смеси солей для приготовления растворов для насыщения образца грунта отражены в таблицах 1, 2
3. Цилиндр измерительной ячейки устанавливается на вибростол.
4. Грунт засыпается в цилиндр небольшими порциями и заливается солевым раствором. Данный шаг продлевается до полного заполнения цилиндра при непрерывной вибрации для устранения воздушных прослоек и пустот.

Таблица 1

Массовые доли компонентов в смеси солей для подготовки хлоридно-сульфатного натриево-магниевого раствора

Химическая соль	Ω , %
Хлорид натрия	50,0
Сульфат магния	50,0

Table 1

Mass fractions of salt components used to prepare a chloride-sulfate magnesium solution

Таблица 2

Массовые доли компонентов в смеси солей для подготовки хлоридно-сульфатного натриево-магниево-кальциевого раствора

Химическая соль	Ω , %
Хлорид натрия	71,0
Хлорид магния	10,5
Сульфат магния	10,0
Хлорид кальция	8,5

Table 2

Mass fractions of salt components used to prepare a chloride-sulfate magnesium solution

5. Проводится сборка измерительной ячейки. В собранном виде измерительная ячейка помещается вертикально в открытый теплоизолированный бокс в криокамере.
6. С помощью элементов Пельтье на верхнем торце измерительной ячейки задается отрицательная температура и положительная температура с нижнего торца. Это формирует направленное движение фронта заморзания сверху вниз, что имеет место в природных условиях.
7. По изменению температуры можно судить о движении фронта заморзания сверху вниз. Стационарный участок означает, что движения фронта заморзания нет. Следовательно, необходимо увеличить напряжение на «отрицательном» элементе Пельтье на 6-10%, инициируя тем самым движение фронта. Такая процедура проводится до промерзания половины объема грунта (рис. 2). После этого «холодный» элемент Пельтье отключается, грунт нагревается до положительных температур, и описанный цикл повторяется снова 5-6 раз.
8. Исследуемый грунт извлекается из измерительной ячейки и делится на 4 равные части.
9. Проводится химический анализ водных вытяжек.

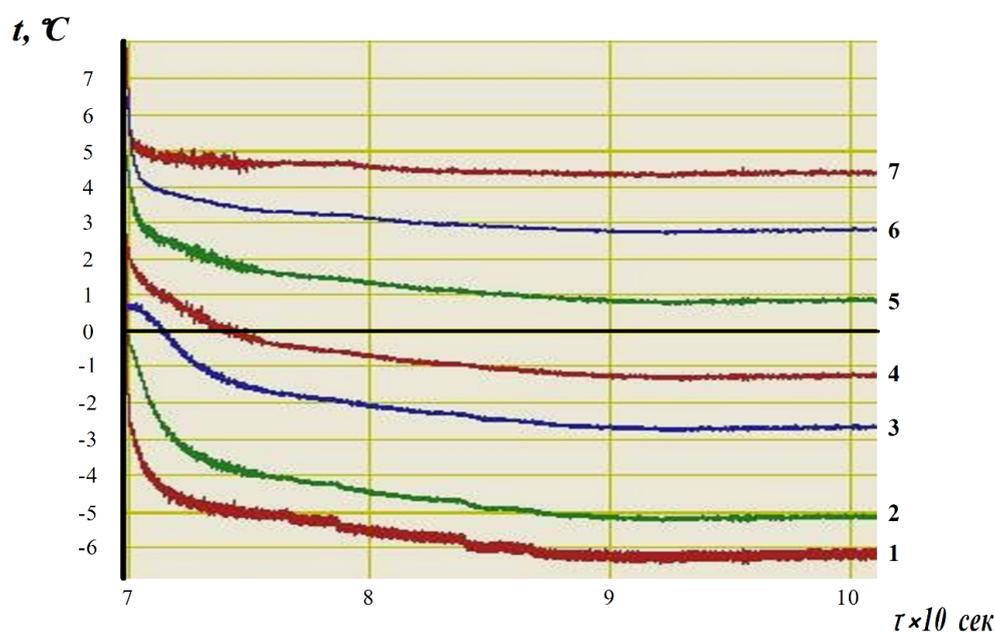


Рис. 2. Показания датчиков температуры. Номера кривых соответствуют номерам термопар

Fig. 2. Indications of temperature sensors. The numbers of the curves correspond to the numbers of the thermocouples

Эксперимент по миграции солей в грунте, насыщенном хлоридно-сульфатным натриево-магниевым раствором

До начала эксперимента влажность грунта составляет $(28,8 \pm 0,1)$ %, минерализация поровой воды равна $(21,4 \pm 2,4)$ г/л. Содержание ионов в поровой воде приведено в таблице 3.

Таблица 4 содержит значения концентраций ионов в поровой воде по завершении циклов замерзания — оттаивания. Концентрация ионов пересчитана в соответствии с методикой, описанной в работе [4].

Таблица 3

Table 3

Содержание ионов в поровой воде

Ion content of pore water

Содержание анионов, г/л			Содержание катионов, г/л			
HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
< 0,10	$2,0 \pm 0,2$	$11,3 \pm 2,3$	$0,9 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	$5,9 \pm 0,6$	$0,06 \pm 0,01$

Таблица 4

Table 4

Содержание ионов в поровой воде

Ion content of pore water

№ пробы и глубина отбора	Содержание анионов, г/л			Содержание катионов, г/л			
	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Проба 1, 0-49 мм	< 0,11	$4,1 \pm 0,5$	$12,8 \pm 2,6$	$1,4 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$6,8 \pm 0,7$	$0,06 \pm 0,01$
Проба 2, 54-99 мм	< 0,10	$3,5 \pm 0,4$	$11,2 \pm 2,2$	$1,2 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,6$	$0,06 \pm 0,01$
Проба 3, 104-155 мм	< 0,11	$2,9 \pm 0,4$	$9,9 \pm 2,0$	$0,9 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$	$5,7 \pm 0,6$	$0,06 \pm 0,01$
Проба 4, 160-210 мм	< 0,11	$2,5 \pm 0,3$	$12,0 \pm 2,4$	$1,1 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$	$6,5 \pm 0,7$	$0,04 \pm 0,01$

Рис. 3 содержит значения суммарной минерализации поровой воды, выраженные как сумма всех найденных величин из таблицы 4. При этом следует добавить, что представленные в таблице 4 ионы составляют не полный перечень всех ионов, присутствующих в грунтовой воде, а только тех, что входили в состав раствора. Поэтому реальная величина суммарной минерализации несколько отличается от представленной на рис. 3 в большую сторону.

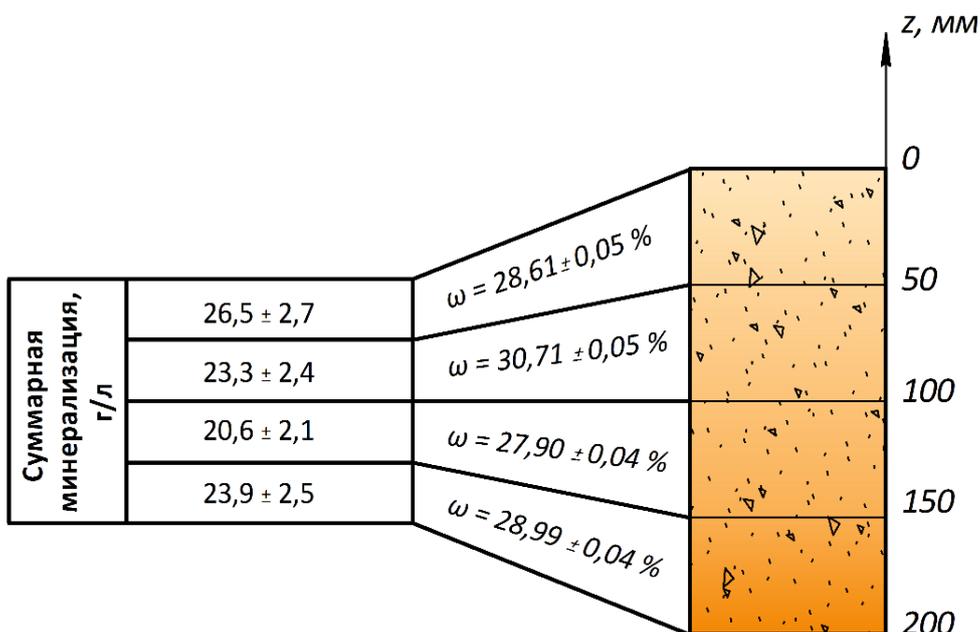


Рис. 3. Суммарная минерализация поровой воды и влажность образцов (грунт насыщен хлоридно-сульфатным натриево-магниевым раствором)

Fig. 3. Total pore water mineralization and sample moisture (the soil saturated with a chloride-sulphate-sodium-magnesium solution)

Эксперимент по миграции солей в грунте, насыщенном хлоридно-сульфатным натриево-магниевым-кальциевым раствором

До начала эксперимента влажность грунта составляет $(24,79 \pm 0,04) \%$, минерализация поровой воды равна $(29,5 \pm 3,7)$ г/л. Содержание ионов в водной вытяжке и поровой воде приведено в таблице 5.

Таблица 6 содержит значения концентраций ионов в поровой воде по завершении циклов заморзания — оттаивания. Концентрация ионов пересчитана в соответствии с методикой, описанной в работе [4].

Рис. 4 содержит значения суммарной минерализации поровой воды, выраженные как сумма всех найденных величин из таблицы 6. Реальная суммарная величина минерализации будет отличаться от данных рис. 4 в большую сторону.

Таблица 5

Table 5

Содержание ионов в поровой воде

Ion content of pore water

Содержание анионов, г/л			Содержание катионов, г/л			
HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
< 0,10	1,5 ± 0,2	18,0 ± 3,6	1,3 ± 0,1	0,6 ± 0,1	8,0 ± 0,8	0,06 ± 0,01

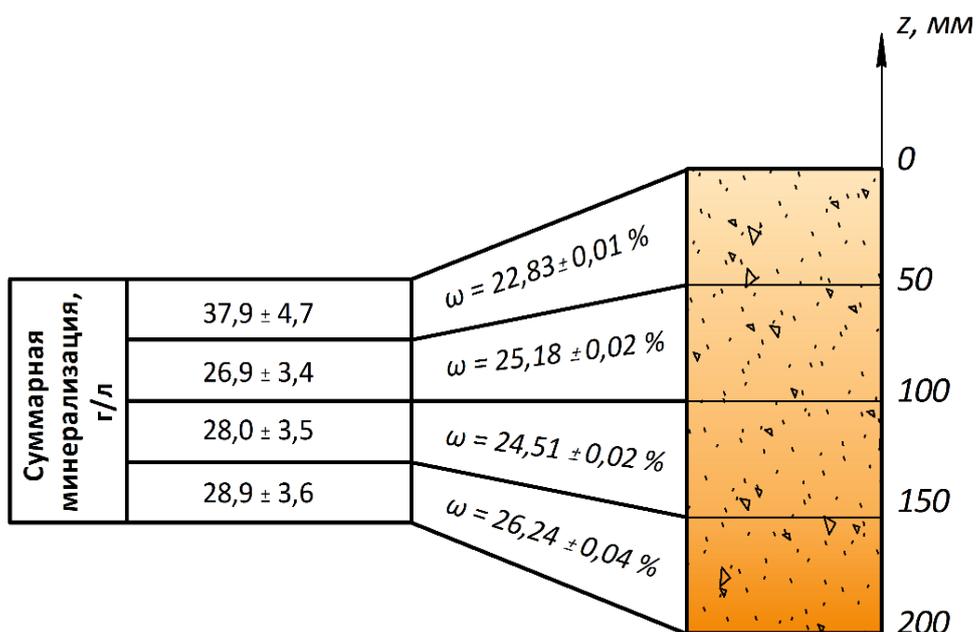


Рис. 4. Суммарная минерализация поровой воды и влажность образцов (грунт насыщен хлоридно-сульфатным натриево-магниевым-кальциевым раствором)

Fig. 4. Total pore water mineralization and sample moisture (the soil saturated with a chloride-sulphate-sodium-magnesium-calcium solution)

Таблица 6

Содержание ионов в поровой воде

Table 6

Ion content of pore water

№ пробы и глубина отбора	Содержание анионов, г/л			Содержание катионов, г/л			
	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Проба 1, 0-47 мм	< 0,13	1,0 ± 0,1	22,6 ± 4,5	1,8 ± 0,2	0,9 ± 0,1	11,4 ± 1,1	0,08 ± 0,01
Проба 2, 57-93 мм	< 0,12	0,9 ± 0,1	16,2 ± 3,3	1,1 ± 0,1	0,6 ± 0,1	7,9 ± 0,8	0,06 ± 0,01
Проба 3, 103-144 мм	< 0,12	0,8 ± 0,1	17,0 ± 3,4	1,2 ± 0,1	0,6 ± 0,1	8,2 ± 0,8	0,06 ± 0,01
Проба 4, 154-210 мм	< 0,12	0,7 ± 0,1	17,5 ± 3,5	1,3 ± 0,1	0,6 ± 0,1	8,7 ± 0,9	0,07 ± 0,01

Выводы

В ходе проведенного эксперимента с хлоридно-сульфатным натриево-магниевым раствором установлено, что максимальная концентрация соли в поровом растворе содержится в образце, отобранном со стороны «холодного» элемента Пельтье, от

которого в каждом цикле начинается движение фронта замерзания; второй максимум концентрации наблюдается у «горячего» элемента Пельтье. Концентрация солей в верхнем интервале пробоотбора возросла на 24%, в нижнем — на 11%.

Аналогичный характер распределения ионов повторяется в эксперименте с хлоридно-сульфатным натриево-магниевым-кальциевым раствором: концентрация солей в верхнем интервале пробоотбора возросла на 29%, в нижнем — снизилась на 2%. Это объясняется типом грунта: для глинистых пылеватых грунтов с высокой величиной удельной активной поверхности и количеством незамерзшей воды наблюдается массоперенос концентрированного раствора к центрам кристаллизации за счет осмотических сил. Концентрирование в нижней части возможно за счет механизма отжатия избыточного раствора при кристаллизации воды в порах грунта.

В результате работы установлен недостаток предложенной конструкции измерительной ячейки, заключающийся в отсутствии компенсации роста порового давления в нижней части ячейки, неизбежно возникающего при кристаллизации большей части раствора. В дальнейших исследованиях это будет устранено путем модернизации экспериментальной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Н. П. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н. П. Анисимова, Н. А. Павлова // Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.
2. Васильчук Ю. К. Криопэги / Ю. К. Васильчук, Н. А. Буданцева // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 томах. СПб.: Недра, 2006. Том 1. С. 230-235.
3. Волков Н. Г. Прогноз температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород и криопэгов (на примере п-ова Ямал): дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Н. Г. Волков. М., 2006. 214 с.
4. Григорьев Б. В. Замерзание влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях: дис. ... канд. техн. наук / Б. В. Григорьев. Тюмень, 2013. 135 с.
5. Данзанова М. В. Экспериментальные исследования фильтрационных свойств грунтов, вмещающих надмерзлотные криопэги, на территории Якутска / М. В. Данзанова, Н. А. Павлова // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 6. С. 567-576.
6. Кияшко Н. В. Закономерности изменения фазового и химического состава, теплофизических характеристик засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал в процессе их криогенного метаморфизма: дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Н. В. Кияшко. М., 2014. 138 с.
7. Паренкина О. Л. Условия формирования и распространения криопэгов на территории Бованенковского НГКМ / О. Л. Паренкина // Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 3. С. 93-95.
8. Торговкин Н. В. Агрессивность сезонноталых и мерзлых грунтов Якутска / Н. В. Торговкин, В. Н. Макаров // Наука и образование. 2014. № 1 (73). С. 85-89.

Boris V. GRIGORIEV¹
Yuliya F. YANBIKOVA²

UDC 551.345

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF SALT IONS MIGRATION
IN ENCLOSED VOLUME DURING THE MOTION
OF THE FREEZING FRONT***

¹ Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
b.v.grigorev@utmn.ru

² Engineer, Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
y.f.yanbikova@utmn.ru

Abstract

Industrial development of cryolithic zone is often followed by thermal regime change and surface layer's ion balance disruption. Accumulation of thermal energy and highly soluble salts in the ground's surface layer leads to an increase of thawing depth and ground salinization on significant depths. Similar phenomena can also happen outside of the seasonal thawing depth range. After pore solutions spend years migrating and concentrating in the permafrost, cryopegs are formed inside the underlying rock formations. Cryopegs are lenses of thawed highly-mineralized pore solutions surrounded by frozen ground.

Cryopegs are widely distributed throughout the permafrost. They decrease the load bearing capacity of formation grounds and cause corrosion of concrete and metallic constructions. Currently cryopegs are underexplored in Russia and the rest of the world, therefore, detailed investigation of this cryologic object is required, in particular, in laboratory conditions.

This article studies the migration of salt ions in the pore water during the motion of the freezing front. In order to investigate the subject, the authors developed an experimental unit and created a measuring unit where studied moist grounds are inserted. Temperature can be set on the opposite sides

* The work was supported by the Russian Federation President Grant SP-3897.2018.1.

Citation: Grigoriev B. V., Yanbikova Yu. F. 2018. "Experimental Research of Salt Ions Migration in Enclosed Volume during the Motion of the Freezing Front". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 4, pp. 93-104.
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-93-104

of the experimental unit. Controlling the extent and speed of temperature change provides a means to regulate freezing front movement (directed from top to bottom). After a number of freezing-thawing cycles salt compositions and concentrations are checked and measured in four intervals of sampling. Two series of experiments yielded an unexpected result: a significant increase in salt concentration (24% and 29%) in the freezing front movement starting area. It can be explained as a result of a concentrated solution mass-transfer to the crystallization centers due to osmotic powers, which is a viable explanation as clayey, pulverulent grounds were used in the study. These grounds have a large active surface area and a high unfrozen water content.

Keywords

Frozen ground, cryopegs, salt migration, freezing front.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-93-104

REFERENCES

1. Anisimova N. P., Pavlova N. A. 2014. *Gidrogeohimicheskie issledovaniya kriolitozony Tsentralnoy Yakutii* [Hydrogeochemical Studies of the Cryolithozone of Central Yakutia]. Novosibirsk: Geo.
2. Vasilchuk Yu. K., Budantseva N. A. 2006. "Kriopegi" [Cryopegs]. In: *Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal*: in 3 vols. Vol. 1, pp. 230-235. Saint Petersburg: Nedra.
3. Volkov N. G. 2006. "Prognoz temperaturnogo i vodno-ionnogo rezhima zasolennykh merzlykh porod i kriopegov (na primere p-ova Yamal)" [Forecast of the Temperature and Water-Ion Regime of Saline Frozen Rocks and Cryopegs (On the Example of the Yamal Peninsula)]. *Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) diss.* Moscow.
4. Grigoriev B. V. 2013. "Zamerzanie vlazhnykh gruntov v ravnovesnykh i neravnovesnykh usloviyakh" [Freezing of Wet Soils in Equilibrium and Non-Equilibrium Conditions]. *Can. Sci. (Tech.) diss.* Tyumen.
5. Danzanova M. V., Pavlova N. A. 2016. "Eksperimentalnye issledovaniya filtratsionnykh svoystv gruntov, vmeshchayushchikh nadmerzlotnye kriopegi, na territorii Yakutska" [Experimental Studies of the Filtration Properties of Soils Containing the Permafrost Cryopegs, in the Territory of Yakutsk]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*, no 6, pp. 567-576.
6. Kiyashko N. V. 2014. "Zakonomernosti izmeneniya fazovogo i himicheskogo sostava, teplofizicheskikh harakteristik zasolennykh porod i kriopegov p-ova Yamal v processe ikh kriogennoy metamorfizma" [Regularities of Changes in the Phase and Chemical Composition, Thermophysical Characteristics of Saline Rocks and Cryopegs of the Yamal Peninsula in the Process of their Cryogenic Metamorphism]. *Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) diss.* Moscow.
7. Parenkina O. L. 2010. "Usloviya formirovaniya i rasprostraneniya kriopegov na territorii Bovanenkovskogo NGKM" [The Conditions for the Formation and Distribution of Cryopegs on the Territory of the Bovanenkovo Gas Field]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*, no 3, pp. 93-95.
8. Torgovkin N. V., Makarov V. N. 2014. "Aggressivnost sezonnotalykh i merzlykh gruntov Yakutska" [Aggression of Seasonally Low and Frozen Soils of Yakutsk]. *Nauka i obrazovanie*, no 1 (73), pp. 85-89.