

УДК 556.34(571.56)

ПРОГНОЗ ИНФИЛЬТРАЦИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ ИЗ ПРУДА-ОТСТОЙНИКА В КРИОЛИТОЗОНЕ

Попов В.И.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: popov.gtf@mail.ru*

Интенсификация промышленного освоения месторождений полезных ископаемых – одна из основных причин загрязнения окружающей среды. Продвижение промышленного производства в северные регионы страны поставило новые задачи, связанные с проблемой захоронения дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы криолитозоны. В попытках решения этой проблемы возникла необходимость в изучении процесса взаимодействия рассолов и мерзлых пород. В работе представлены результаты математического моделирования инфильтрации высокоминерализованного раствора, аналогом которого являются дренажные рассолы, в мерзлый массив горной породы. Разработанная математическая модель инфильтрации высокоминерализованного раствора позволяет учитывать его поступление как за счет вымывания солей с территории рудного склада (I), так и из естественного пруда-отстойника (II), расположенного на удалении от бровки уступа карьера. При расчетах учитываются условия термодинамического равновесия льда с высокоминерализованным раствором, которые обеспечивают его плавление и соответствующее разбавление раствора. А также изменения фазового объема рассматриваемой системы высокоминерализованный раствор – поровый лед (появление воздушной депрессии), вызванной плавлением льда. Используются модели фильтрации в средах с переменной пористостью. Модель позволяет рассчитывать зоны удаления порового льда в горном массиве в соответствии с траекториями течения рассола в породе.

Ключевые слова: высокоминерализованный раствор, инфильтрация, диффузионный и конвективный перенос, фазовое равновесие лед – раствор

FORECAST OF INFILTRATION OF CONCENTRATED LIQUID WASTE FROM A SETTLEMENT POND IN THE CRYOLITHOZONE

Popov V.I.

*Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences”, N.V. Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: popov.gtf@mail.ru*

The intensification of industrial development of mineral deposits is one of the main causes of environmental pollution. The promotion of industrial production to the northern regions of the country has set new tasks related to the problem of burying drainage brines in the permafrost of the permafrost zone. In attempts to solve this problem, it became necessary to study the process of interaction between brines and frozen rocks. The paper presents the results of mathematical modeling of the infiltration of a highly mineralized solution, which is analogous to drainage brines into a frozen rock mass. The developed mathematical model of highly mineralized solution infiltration makes it possible to take into account its influx both due to salt leaching from the territory of the ore store (I) and from the natural settling pond (II) located at a distance from the edge of the quarry ledge. The calculations take into account the conditions of thermodynamic equilibrium of ice with a highly mineralized solution, which ensure its melting and the corresponding dilution of the solution. As well as changes in the phase volume of the considered system of a highly mineralized solution – pore ice (the appearance of air depression) caused by the melting of ice. Models of filtration in media with variable porosity are used. The model makes it possible to calculate the zones of pore ice removal in the rock mass in accordance with the brine flow trajectories in the rock.

Keywords: highly mineralized solution, infiltration, diffusion and convective transport, ice-solution phase equilibrium

Геоэкологические способы захоронения и складирования дренажных рассолов, формирующихся при алмазодобыче, развивались в следующих направлениях [1–3]: 1) регулируемый сброс дренажных рассолов с минерализацией до 90 г/л в речную сеть со слабой ассимилирующей способностью; 2) поверхностное складирование высокоподвижных и агрессивных ко льду дренажных рассолов в условиях многолетнемерзлых пород; 3) подземное захоронение дренажных рассолов в естественных емкостях многолетнемерзлых пород; 4) закачка рассолов в водоносные комплексы криолитозоны, при этом условия

затрудненного возврата рассолов достигаются обустройством вокруг карьера тампонажной зоны.

В данной работе в развитие вышеупомянутого пункта 4 представлены предварительные результаты по исследованию методом математического моделирования проникновения высокоминерализованного раствора в мерзлый массив горной породы. Разработанная модель позволяет учесть поступление раствора как за счет вымывания солей на территории рудного склада (рис. 1, I) так и из естественного водосборника (рис. 1, II) расположенного на некотором удалении от бровки уступа карьера [4].

Особенностью взаимодействия порового льда мерзлых горных пород и высокоминерализованного раствора солей является возможность процесса оттаивания льда при отрицательной температуре. В случае контакта рассола с пресным льдом нарушается термодинамическое равновесие гетерогенной ранее изолированной системы лед – раствор, в системе согласно термодинамическому принципу Ле-Шателье возникают процессы, направленные к восстановлению равновесия: уменьшение концентрации рассола за счет расплавления порового льда, отбор тепла, необходимого для расплавления, из окружения изолированной системы. В данном исследовании представлена математическая модель прогноза фазового состояния системы мерзлый льдонасыщенный массив – высокоминерализованный раствор с учетом его конвективного и диффузионного переноса в неоднородном, поровом пространстве мерзлого массива. Дополнительно учтены сопутствующие механизмы разбавления высокоминерализованного раствора при контактном плавлении порового льда, а также изменение фазового объема лед – высокоминерализованный раствор рассма-

триваемой системы (появление воздушной депрессии), вызванной плавлением льда, а следовательно, уменьшением его фазового объема.

Описываемая методология может оказаться полезной при разработке гидрометаллургических технологий выщелачивания в условиях преобладания отрицательных температур как среды, так и массивов горных пород при использовании реактивов, с высокой реакционной активностью в высокоминерализованных растворах, что обеспечит проницаемость мерзлой горной породы [5–7].

Для простоты сделаем предположение об однородном строении и минеральном составе горного массива, что обеспечит простое выражение для уравнения фазового равновесия поровой влаги.

Материалы и методы исследования

Процесс переноса тепла, влаги и солей опишем системой из трех соответствующих уравнений баланса [8–10], которые вместе с уравнением фазового равновесия определяют содержание подвижных компонентов в двумерном мерзлом горном массиве (рис. 1).

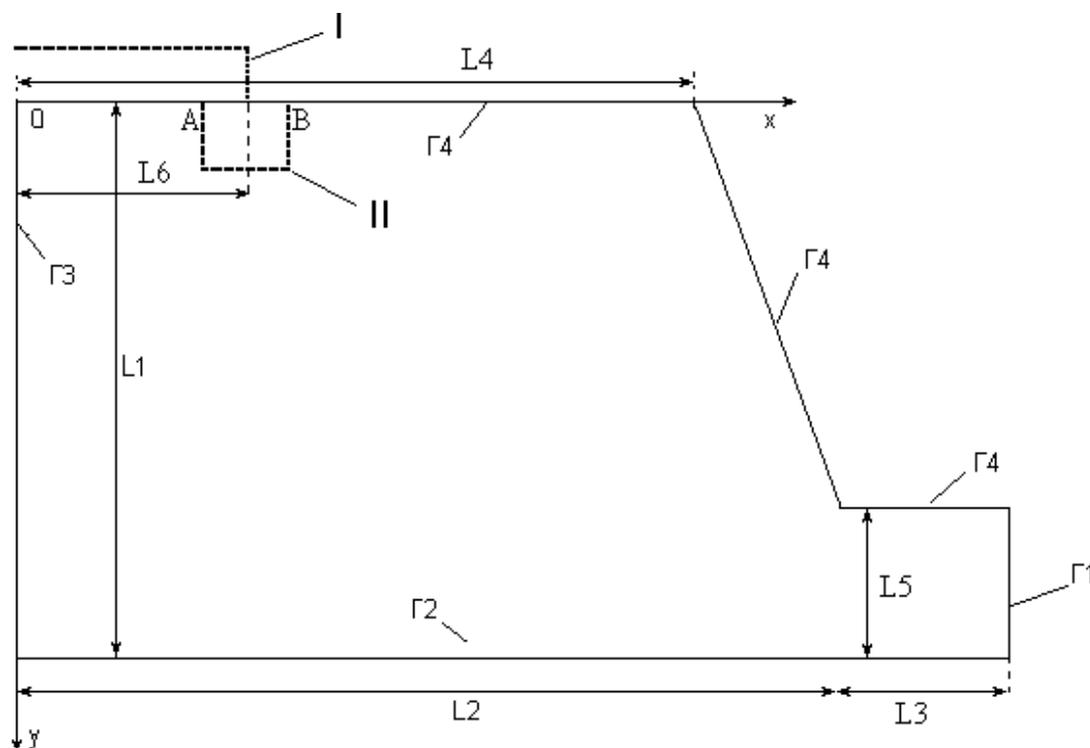


Рис. 1. Схема областей инфильтрационного проникновения в сечении борта карьера ($L1 = 40 \text{ m}$; $L2 = 126, 6 \text{ m}$; $L3 = 33, 4 \text{ m}$; $L4 = 106, 45 \text{ m}$; $L5 = 5 \text{ m}$; $L6 = 64 \text{ m}$; $B = 9, 6 \text{ m}$)

Так как возмущающим фактором является изменение температуры в первоначально однородной рассматриваемой системе, то первым уравнением будет уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = -\nabla J_T + L\rho I_F, \quad (1)$$

где c, ρ – теплоемкость и плотность горных пород; L – теплота фазового превращения; T – температура; t – время; J_T – поток тепла с конвективным компонентом; I_F – интенсивность источника фазовых превращений лед – вода [10]. Начальным условием является постоянная отрицательная температура массива $T_{\text{мас}}$. Граничные условия третьего рода приняты на поверхностях теплообмена с внешней средой и условия симметрии – на границах обрезания массива.

Второе уравнение математической модели описывает перемещение жидкой фазы в двумерном первоначально мерзлом массиве (рис. 1):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla J_w - I_F. \quad (2)$$

Здесь w – влагосодержание; J_w – поток влаги с фильтрационным компонентом. Начальным условием является содержание незамерзшей влаги и порового льда, соответствующих отрицательной температуре массива. Граничные условия определяют изоляцию системы, на выделенных участках поверхности массива ставится условие инфильтрации раствора на определенном временном интервале $(0, t_{\text{инф}})$.

Третье уравнение описывает перенос концентрации раствора как за счет диффузионного, так и конвективного процесса инфильтрации:

$$\frac{\partial(wC)}{\partial t} = -\nabla J_C - k_{\text{зах}} C I_F, \quad (3)$$

где C – концентрация растворенного компонента; J_C – суммарный поток растворенного компонента; $k_{\text{зах}}$ – параметр, определяющий вероятность захвата солей на границе лед – поровый раствор. Начальным условием является однородное содержание соли C_0 . Граничные условия определяют изоляцию системы, на выделенных участках поверхности массива ставится условие инфильтрации раствора с концентрацией $C_{\text{рас}}$ на определенном временном интервале $(0, t_{\text{инф}})$. Система (1–3) дополняется уравнением фазового состояния раствора $T_F = T_F(w, C)$.

Так как инфильтрация в массив горной породы происходит в условиях неполного насыщения, для величины гидравлической проводимости используем выражение ван Генухтена – Муалема, приведенное в работе [7].

$$K(w) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^n)^m \right], \quad (4)$$

где S_e – относительная насыщенность порового пространства жидкой фазой влагой; K_s – коэффициент фильтрации при полном насыщении принят $K_s = 2,5 \cdot 10^{-8}$ м/с; l, n, m – связанные параметры.

Наличие льда в порах приводит к снижению проницаемости горной породы, этот факт учитывается введением фильтрационного сопротивления перемещению потока [7]:

$$K(w)_{\text{frozen}} = 10^{\frac{\Omega w_i}{w_i - w_r}} K(w), \quad (5)$$

где w_i – максимальная влагоемкость породы; w_r – адсорбционная влагоемкость; w_i – льдистость; Ω – параметр.

Приведенная система уравнений переноса тепла, влаги и солей (1–3) решена численным методом [10] с использованием метода дробных шагов, на которых решаются задачи фильтрации, диффузии и фазового перехода поровый лед – вода, а также их покомпонентного расщепления на одномерные задачи.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчеты проводились для двух вариантов поступления раствора в массив. Первый вариант (I) относится к складированию засоленного рудного материала на поверхности массива. Инфильтрация рассола, вымываемого осадками из засоленных руд, локализована на отрезке $(0, L_6)$ – рис. 1), занятом рудным складом.

Для второго варианта (II) инфильтрация рассчитывалась из естественного пруда-отстойника с высокоминерализованным раствором, расположенного в области АБ (рис. 1).

Значения расчетных параметров приняты следующими: температуры массива $T_{\text{мас}} = -2$ °С; начальная концентрация порового раствора в массиве $C_0 = 1$ г/л; концентрации высокоминерализованного раствора приняты как $C_{\text{рас}} = 50 * C_0$ для первого варианта и $C_{\text{рас}} = 100 * C_0$ для второго; начальная влажность массива равна 0,13.

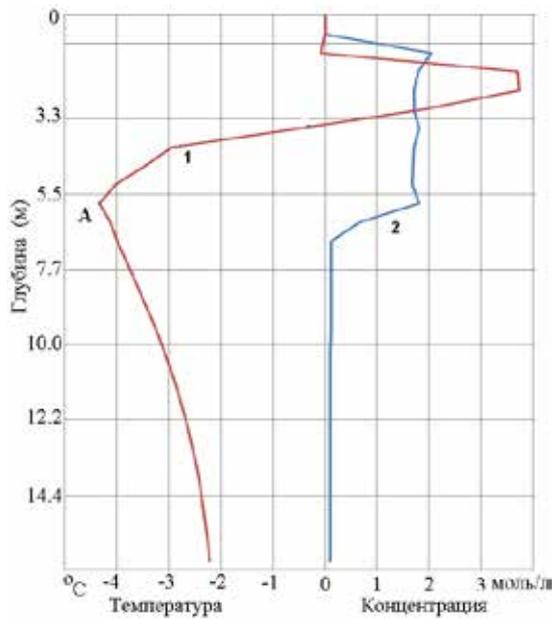


Рис. 2. График распределения температуры (1) и концентрации (2) под дном пруда-отстойника ($t = 1,5$ года)

Температура подачи высокоминерализованного раствора принята равной температуре поверхности массива для первого варианта и температуре дна пруда-отстойника, полученной в результате решения отдельной задачи, для второго варианта. Температура среды меняется в соответствии с климатическим значением годового цикла

для места расположения промышленного объекта. На рис. 2 представлены графики температуры и концентрации высокоминерализованного раствора под дном пруда-отстойника. Литерой (А) выделена область понижения температуры массива при инфильтрации раствора высокой минерализации в льдосодержащем массиве горных пород.

Результаты расчетов позволили выявить, что распределение концентрации высокоминерализованного раствора в целом для обоих вариантов соответствует его фронтальному перемещению, для второго варианта существенно влияние бровки уступа карьера. Для льдосодержания можно наблюдать как свободную от порового льда зону, так и рост его содержания на границе области термодинамического равновесия, вызванного охлаждением породы. Изменение начального распределения льдосодержания обусловлено взаимодействием порового льда с фильтрационным потоком высокоминерализованного раствора (рис. 3). Снижение содержания порового льда в породном массиве для обоих вариантов может привести к деструктивным процессам в зонах влияния фильтрационных потоков высокоминерализованного раствора. Учет этих факторов может способствовать повышению надежности процессов захоронения и минимизации их негативного влияния на окружающую среду.

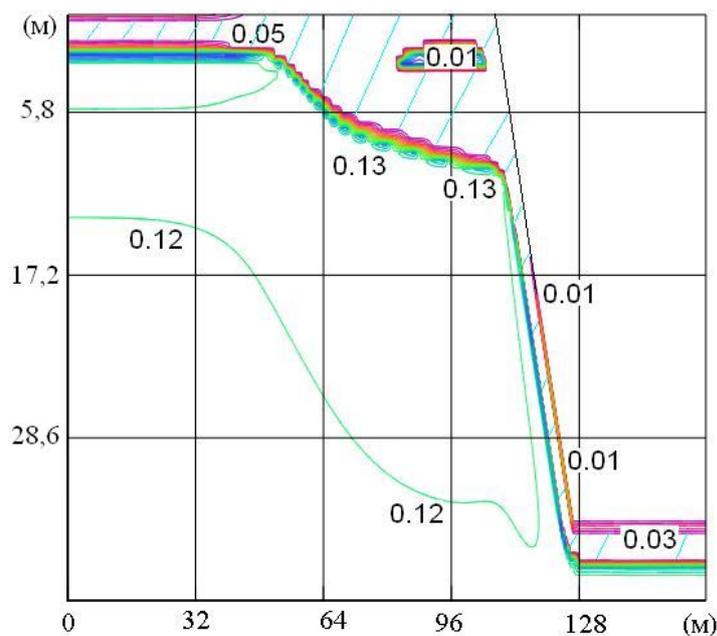


Рис. 3. Картина распределения льдосодержания в зоне влияния пруда-отстойника ($t = 10,5$ года). Заштрихована область, свободная от порового льда

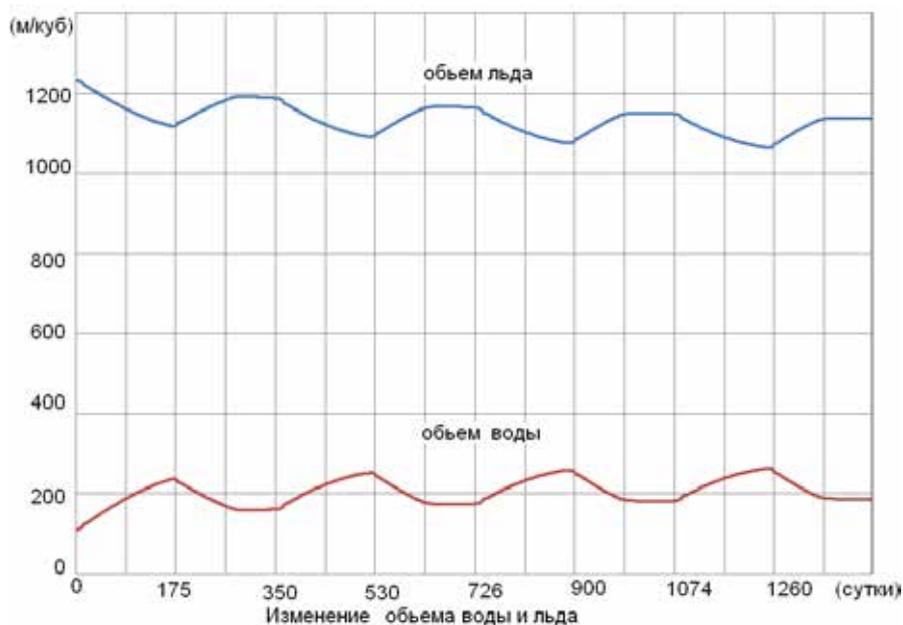


Рис. 4. Временной график раздельного суммирования содержаний влаги и порового льда в расчетном объеме горного массива

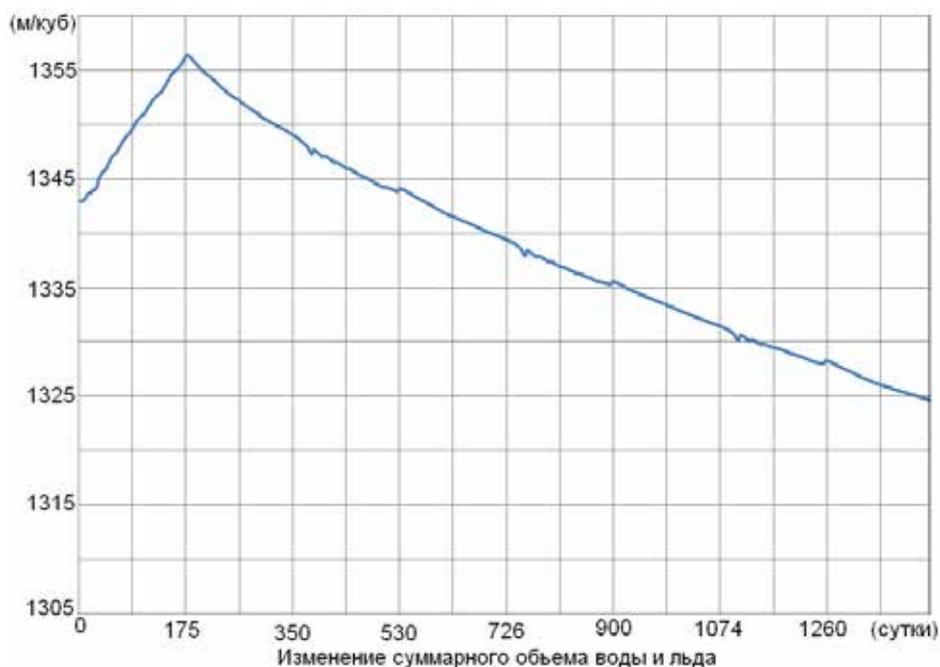


Рис. 5. Временной график общего изменения содержания влаги и порового льда в расчетном объеме горного массива

Условия инфильтрации под дном хранилища высокоминерализованного раствора (пруд-отстойник), его более высокая концентрация приводят к интенсивному характеру протекания процесса взаимо-

действия с поровым льдом, в этом случае зона деструкции мерзлого состояния массива приобретает значительные размеры по сравнению с такими параметрами для рудного склада. При проникновении высо-

коминерализованного раствора в мерзлый массив происходит оттаивание порового льда, что приводит к снижению насыщенности порового пространства из-за разности объемов при фазовом превращении лед – вода. На рис. 4 приведены графики изменения объема твердой и жидкой фаз воды во времени при начальной инфильтрации определенного количества рассола. В соответствии с геометрией расчетной области производился подсчет и суммирование локального содержания влаги по всем узлам расчетной сетки. Периодические изменения содержаний суммарных объемов влаги и льда в мерзлом массиве соответствуют годовым циклам изменения температуры.

Суммарное содержание объемов воды и льда в рассматриваемой системе представлено на рис. 5. Начальная часть графика суммарного содержания влаги и порового льда, представленного на рис. 5, соответствует закачке (инфильтрации) рассола в мерзлый массив. Дальнейшее снижение суммарного содержания обусловлено процессами плавления порового льда при взаимодействии с фильтрующим высокоминерализованным раствором. Изменение суммарного объема поровых содержаний влаги и льда приводит к образованию депрессии давления воздуха в поровом пространстве массива. Этот факт, отмеченный в работе [1], свидетельствует о значительных и весомых составляющих объема емкостных свойств мерзлотных коллекторов криолитозоны.

Заключение

Результаты расчетов и моделирования показали, что процесс переформирования первоначально однородного поля льдосохранения в горном массиве достаточно сложен. Это обусловлено явлениями оттайки порового льда при контакте с высокоминерализованным раствором и его образованием в зонах охлаждения массива, образующихся на периферии фильтрующего

раствора. Расчетами показано формирование насыщенной ледяной прослойки вблизи контакта пород с областью фильтрующего высокоминерализованного раствора.

Полученные результаты расчетов не противоречат известным фактам и качественно соответствуют характерным признакам процесса складирования высокоминерализованных растворов в коллекторах криолитозоны.

Список литературы

1. Дроздов А.В., Попов В.Ф. Удаление дренажных рассолов в недра криолитозоны при разработке алмазных месторождений Якутии // Разведка и охрана недр. 2013. № 12. С. 44–48.
2. Янников А.М., Ильков А.Т. Формирование рассолопоглощающих коллекторов в толще многолетнемерзлых пород на примере участка «Ботуобинский» (Республика Саха (Якутия)) // Геология и недропользование. 2021. № 4. С. 64–73.
3. Янникова А.М., Янникова С.А., Овчинникова М.Ю., Корепанова А.Ю. Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» (рудник «Айхал») // Вестник Пермского университета. Сер. Геология. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299.
4. Белов В.А., Перельгин А.И. О расчетных формах поперечных сечений малых водоемов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2013. № 3. С. 50–52.
5. Iwahana G., Cooper Z.C., Carpenter S.D., Deming J.W., Eichen H. Intra-ice and intra-sediment cryopeg brine occurrence in permafrost near Utqayavik (Barrow). *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. Vol. 32. Issue 3. P. 427–446.
6. Wana X., Yang Z. Pore water freezing characteristic in saline soils based on pore size. *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 173. P. 1–12.
7. Курилко А.С., Попов В.И. Моделирование тепло-массообменных процессов выщелачивания в рудном штабеле при низких температурах окружающей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 111–119.
8. Knutsson R., Viklander P., Knutsson S., Laue J. Geothermal study to explain man-made permafrost in tailings with raised surface. *Environmental Earth Sciences*. 2018. No. 77. 288. P. 1–12.
9. Angelopoulos M., Westermann S., Overduin P., Faguet A., Olenchenko V., Grosse G., Grigorev M.N. Heat and Salt Flow in Subsea Permafrost Modeled with CryoGRID2. *J Geophys. Res. Earth. Surf.* 2019. Vol. 124 (4). P. 920–937.
10. Попов В.И., Курилко А.С. Приближенный метод решения задач теплопереноса при замерзании влаги в горных породах криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 57–64.