

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова
Академия наук Республики Саха (Якутия)
Сибирское отделение РАН



**ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ
СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ**

**Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной
65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов
Сибирского отделения РАН**

23 – 25 марта 2022 г.

Якутск
2022

УДК 55(063) (571.56)
ББК 26.3Я43 (2 Рос. Яку)

Ответственный редактор

В.Ю. Фридовский

Редакционная коллегия:

Л.И. Полуфунтикова, А.В. Прокопьев, О.Б. Олейников, Л.Л. Федорова, В.Ф. Попов

На обложке: Золото-кварцевые жилы, месторождение Хотунское, Аллах-Юньский металлогенический пояс.

Фото М. Кудрина, 2022 г.

Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России [Электронный ресурс] : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 23-25 марта 2022 г. / [Отв. ред. В.Ю. Фридовский]. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2022. – 1 электрон. опт. диск.

ISBN 978-5-7513-3284-6

В сборнике представлены труды XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной геологии и минерально-сырьевым ресурсам Северо-Востока России, прошедшей в очно-заочной форме. Изложены результаты изучения тектоники, геодинамики, эволюции литосферы и магматизма, геологии, минералогии и рудообразующих систем месторождений полезных ископаемых СВ Азии. Приведены новые сведения по гидрогеологии, геоэкологии, мерзлотоведению, а также технике и технологии разведки и добычи полезных ископаемых.

Материалы сборника предназначены для научных работников и специалистов, а также студентов, обучающихся по геологическим специальностям.

УДК 55(063) (571.56)
ББК 26.3Я43 (2 Рос. Яку)

ISBN 978-5-7513-3284-6

© ИГАБМ СО РАН, 2022
© Северо-Восточный
федеральный университет, 2022

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Сергей Попов^{1,2}, Людмила Лебедева³, Владимир Ефремов³

1 АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», ул. Победы, 24, г. Санкт-Петербург,
Ломоносов, 198412, Россия

2 Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, 10-я линия В.О.,
31-33, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

3 Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, 36, Якутск,
677010, Россия

EXPERIENCE OF MATHEMATICAL MODELING TO EVALUATE THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SOIL IN CENTRAL YAKUTIA

Sergey Popov^{1,2}, Ludmila Lebedeva³, Vladimir Efremov³

1 PMGE, 24 Pobeda str., St. Petersburg, Lomonosov, 198412, Russia

2 Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 31–33 10th line V.O., 199178, St.
Petersburg, Russia

3 Melnikov Permafrost Institute, 36 Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia

Annotation. The results of mathematical modelling of thermophysical processes occurring in permafrost are presented in this paper. Monitoring data were collected from November 2016 to September 2019 in borehole 3/16-C which is located at the key site in the Levaya Shestakovka River area (Central Yakutia). The temperature was measured at the surface and in the depths of 0.5 m, 1 m, 3 m and 6 m. The modelling was carried out up to the depth of 6 m by solving the heat equation. The temperature at the surface and the depth of 6 m were used as boundary conditions. The best fit of the field data and simulation results was achieved with an effective thermal diffusivity of the soil of $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

1. Введение

Обзор публикаций и результаты полевых работ авторов показывают, что текущие климатические изменения приводят к нарушению устоявшегося ритма природных процессов. Это наблюдается повсеместно, но особенно заметно в полярных регионах нашей планеты: в Арктике и Антарктиде. В частности, за последние годы участились случаи прорывов приледниковых водоёмов в Антарктиде [1, 2].

В Арктике ускоренными темпами начинает оттаивать многолетняя мерзлота, что может привести к катастрофическим последствиям, поскольку при этом не только меняется природный ландшафт, но и выделяются парниковые газы, которые могут ускорить процессы, связанные с глобальным потеплением [3]. Россия – северная страна и около 60% её территории занимает многолетняя мерзлота. В этом смысле её комплексное изучение является не просто актуальной задачей, а насущной необходимостью, что нашло своё отражение в «*Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года*», утверждённой Указом Президента РФ № 645 от 26.10.2020.

Для оценки состояния многолетней мерзлоты ведется мониторинг температуры грунтов в термометрических скважинах, заложенных на научных полигонах, а также моделирование теплофизических процессов. Термометрические измерения на протяжении долгого времени выполняются авторами в ходе полевых изысканий на полигоне, расположенном в верховьях реки Левая Шестаковка (Центральная Якутия) [4, 5]. В рамках настоящей работы предпринята попытка моделирования теплофизических процессов на основе полученных данных. В её основу положено решение уравнения теплопроводности [6].

2. Краткая характеристика используемых данных

В основу моделирования положены термометрические данные, полученные в период с ноября 2016 г. по сентябрь 2019 г. в ходе мониторинга скважины 3/16-С, расположенной на полигоне в верховьях реки Левая Шестаковка (Центральная Якутия). Они частично опубликованы в работе [4] и представлены на Рисунке 1. Полигон расположен примерно в 20 км к юго-западу от г. Якутска. На западном берегу оз. Кюрдегелях, примерно в 2,5 км от скважины, установлена автоматическая метеостанция, которая регистрировала метеорологические параметры, включая температуру окружающего воздуха и количество выпавших осадков с интервалом 1 час [4]. Помимо методики выполнения работ и температурных данных, в работе [4] представлен геологический разрез до глубины 10 метров. На момент бурения (апрель 2016 г.) его верхняя часть приблизительно до полутора метров представлена мелко- и среднезернистым мёрзлым песком. Далее примерно до глубины 7,2 м следует мелко- и среднезернистый талый водонасыщенный песок. Завершает разрез снова мелко- и среднезернистый мёрзлый песок. Положение границ варьирует с течением времени. В силу технических причин температурный профиль имеется лишь до глубины 6 м, т.е. захватывает только первые два слоя. Термодатчики были установлены на глубинах 0,5, 1, 3 и 6 метров, а интервал регистрации составил 3 часа. Кроме того, термодатчик также был установлен и на поверхности грунта. Интервал регистрации его показаний составлял 1 час. Как указывается в работе [4], несмотря на то, что паспортная точность термисторов составляет $\pm 0,25$ °С их фактическая точность оценивается авторами не хуже $\pm 0,1$ °С. Толщина снежного покрова и его плотность регистрировались на метеорологической станции города Якутска.

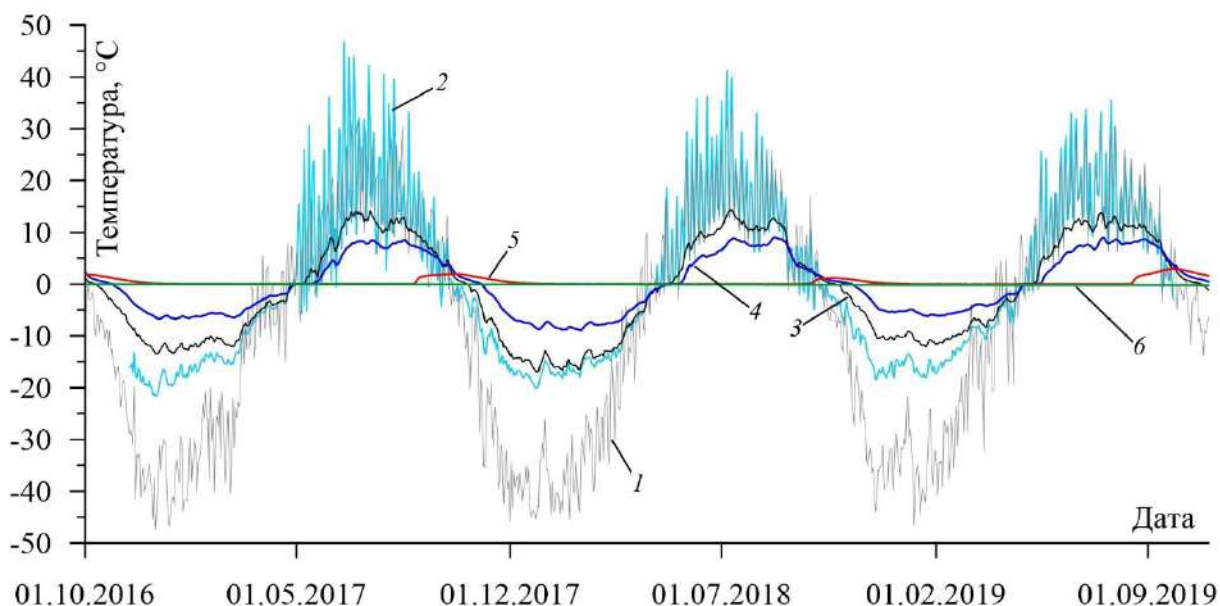


Рисунок 1. Температурные данные по скважине и метеорологической станции: 1 – температура воздуха на метеорологическом посту; температура пород в скважине на глубинах: 2 – 0 м, 3 – 0,5 м, 4 – 1 м, 5 – 3 м, 6 – 6 м.

3. Постановка задачи

В рамках настоящего научного исследования предпринята попытка моделирования теплофизических процессов, основываясь на данных, полученных в ходе полевых работ. Они представлены на Рисунке 1. Уравнение теплопроводности, записанное в наиболее общем виде, определяет распространение температуры θ в среде с течением времени [6]:

$$(1) \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \theta) + \mathbf{v} \cdot \nabla \theta + \Phi,$$

где ρ и c – это плотность среды и её удельная теплоёмкость. Первый член, стоящий в правой части уравнения (1), описывает кондуктивный теплоперенос. При этом коэффициент

теплопроводности λ может отличаться в разных точках среды, а также изменяться с течением времени. Второй член уравнения описывает конвективную передачу тепла, которая осуществляется посредством физического движения элементов среды. Этот процесс определяется полным вектором скорости \mathbf{v} . Последний диссипативный член Φ связан с выделением тепла при движении среды, т.е. при трении различных её слоёв друг о друга. Для однозначного решения уравнения (1) требуется наличие начальных и граничных условий [6]. Таким образом, по распределению температуры в среде можно получить достаточно разноплановое представление о происходящих в ней процессах. Эта задача вполне решаемая, но технически трудно осуществимая. Для этого требуется достаточно частая сеть наблюдений.

В рамках настоящего научного исследования был предпринят первый шаг по выполнению математического моделирования температуры пород. Он заключается в решении одномерной задачи теплопроводности и получении оценки *эффективной* величины коэффициента температуропроводности \bar{a} , $\bar{a} = \lambda/(\rho c)$ верхней части геологического разреза. Это достигается путём решения краевой задачи

$$(2) \begin{cases} \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \bar{a} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \\ \theta(z)|_{t=0} = \theta_0(z), \\ \theta(t)|_{z=0} = \theta_S(t) \\ \theta(t)|_{z=B} = \theta_B(t) \end{cases}$$

где $\theta_0(z)$ – распределение температуры в толще грунта (?) в начальный момент времени, $\theta_S(t)$ – температура, регистрируемая датчиком, расположенным на поверхности грунта, а $\theta_B(t)$ – датчиком на выбранной глубине (6 метров). Опыт работы и подбор параметров показывает, что поскольку глубина среды моделирования относительно небольшая, а расчётное время значительное и исчисляется десятками месяцев, то начальное распределение не играет большого значения. Примерно через полторы, максимум две недели в зависимости от коэффициента \bar{a} , распределение температуры от него зависеть уже не будет.

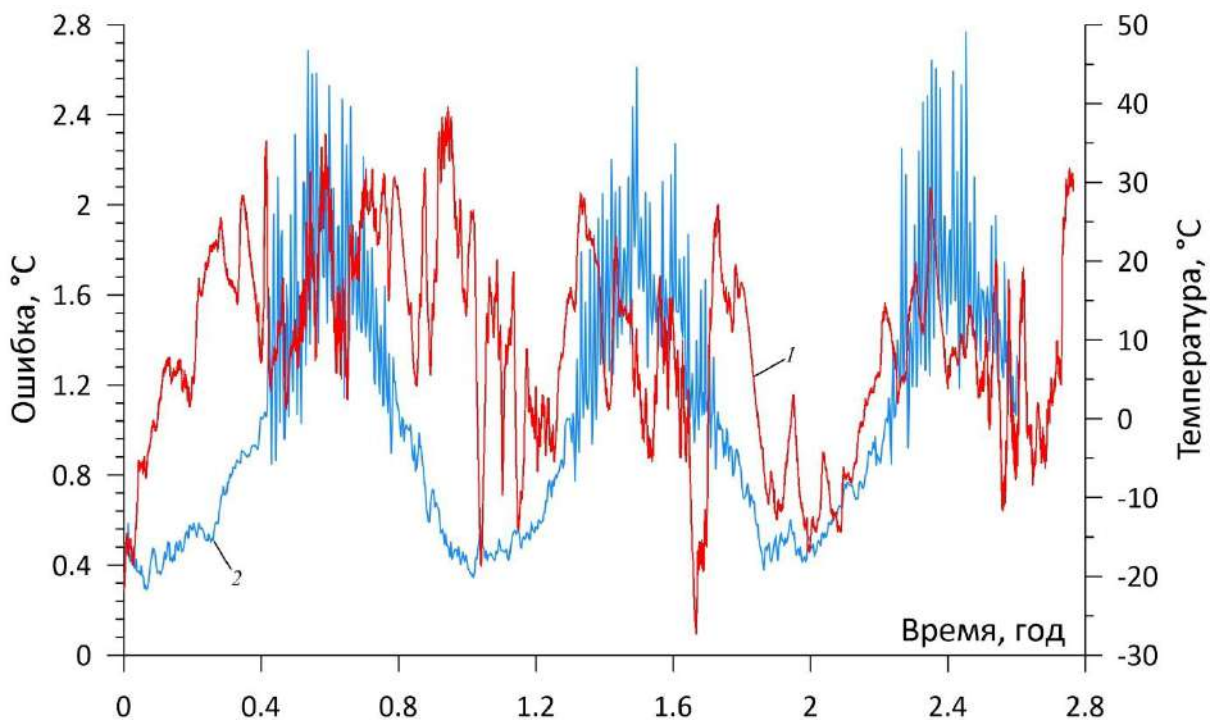


Рисунок 2. Среднеквадратичное отклонение измеренных данных и модельных расчётов
1 – график СКО, 2 – температура на поверхности грунта.

Краевая задача (2) решалась численно с использованием неявной конечно-разностной схемы и метода прогонки. Для практической реализации в рамках настоящего научного исследования была подготовлена компьютерная программа, написанная на языке Delphi с использованием компилятора Embarcadero Delphi 10.4 Sydney.

В рамках настоящего исследования предпринята попытка подобрать величину \bar{a} для всего шестиметрового разреза таким образом, чтобы среднеквадратичное отклонение (СКО) модельных и измеренных значений была близкой к минимальной. Это достигалось методом подбора, решая краевую задачу (2) при различных значениях \bar{a} . Моделирование показало, что наилучшее схождение результатов достигается при $\bar{a} = 2,0 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. При таком значении СКО составило $1,35 \text{ }^\circ\text{C}$ за период 2,8 года. При этом оно изменяется в пределах $0,06 - 2,35 \text{ }^\circ\text{C}$ (Рисунок. 2). Полученное значение вполне соответствует опубликованным данным, например, работа [7]. В качестве примера на Рисунке 3 представлены результаты моделирования и натурные измерения, выполненные для различных моментов времени.

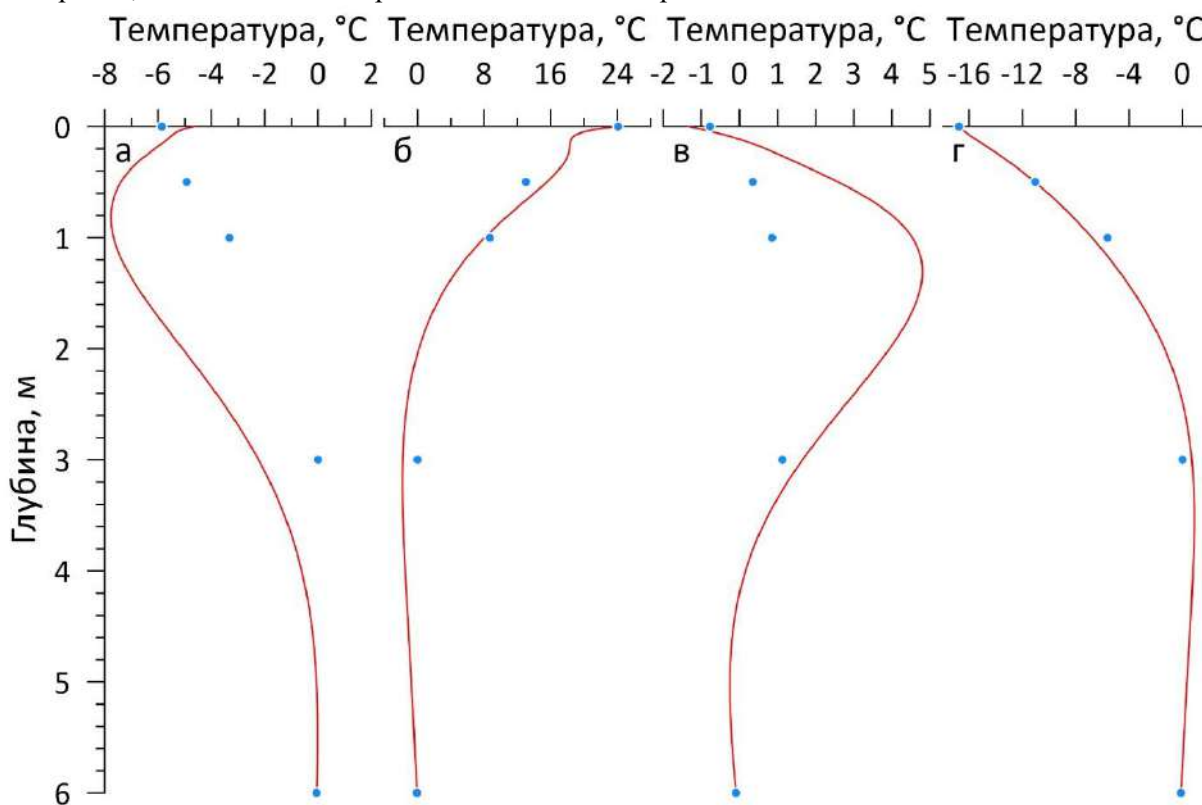


Рисунок 3. Модельное распределение температуры в грунте и наблюденные значения для 15-го апреля 2018 г. (а), 15-го июля 2018 г. (б), 15-го октября 2018 г. (в) и 15-го января 2019 г. (г) Красная линия – результат моделирования; синие точки – измеренные значения в скважине.

Гармонический характер изменения СКО в целом, коррелирующий с ходом температуры на поверхности грунта с некоторым смещением по времени, вполне ожидаем. Малые ошибки, а, следовательно, хорошее соответствие результатов моделирования и данных термометрии для холодного периода, связано с промерзанием верхней части грунта. В этом случае его теплофизические параметры становятся практически однородными по всей глубине. Смещение связано со скоростью замерзания грунта, поскольку этот процесс требует порой длительного времени.

Повышенные значения СКО тёплого периода могут быть объяснены конвективными процессами в приповерхностном слое грунта, происходящими из-за фильтрации талых вод в грунт. Они, перемещаясь вниз, как следует из уравнения (1), также влияют на распределение температуры. Кроме того, изменение водонасыщенности приводит к более контрастному изменению коэффициента теплопроводности с глубиной.

4. Выводы

Моделирование и сопоставление его результатов с данными натурных измерений показало, что в ряде случаев измеренные и модельные значения совпадают с хорошей точностью. Это происходит при условии, когда верхний слой грунта промерзает, и его теплофизические параметры становятся почти однородными по глубине. С другой стороны, наблюдаемые отклонения измеренных значений от модельных в тёплое время вполне объяснимы, поскольку грунт становится неоднородным в плане влагонасыщения. В этом случае нужно прибегать к решению задачи Стефана, которая описывает процессы, связанные с фазовыми переходами [6, 8]. При этом целесообразно рассматривать условия, при которых теплофизические параметры, по крайней мере первой среды, меняются с глубиной. Кроме того, с точки зрения научного интереса имеет смысл учесть конвективный теплоперенос, связанный с вертикальными движениями грунта. Помимо этого, необходимо учитывать теплофизические процессы, происходящие в снегу, поскольку его наличие существенно меняет распределение температуры в нижележащем слое грунта [9]. Однако всё это возможно лишь при условии более тщательных наблюдений.

В частности, целесообразно расположить термодатчики на косе таким образом, чтобы как можно лучше, но в пределах разумного, описать температурный разрез. Исходя из анализа данных и геологического разреза [4], авторам видится целесообразным расположить датчики с интервалом 25 или 33 см от поверхности до глубины 2 метра и далее с интервалом 50 см. Это позволит получить уверенные данные для решения задачи Стефана. Кроме того, желательно установить термодатчики на вехе выше поверхности, чтобы регистрировать температуру снежной толщи. Это позволит учесть её влияние на распределение температур пород.

5. Благодарности

Авторы выражают признательность *Борониной А.С.* за конструктивную критику настоящей статьи. Разработка математической модели выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 22-27-00266 «*Разработка математической модели развития ледникового покрова с последующим применением для описания субгляциальных гидрологических процессов в районе подледникового озера Восток, Восточная Антарктида*».

6. Литература:

- [1] Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V. and Chetverova A.A. [Hydrological studies of lake outbursts in the Antarctic oases](#) // Russian Meteorology and Hydrology, 2020, vol. 45, no. 2, pp. 118-123.
- [2] Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E. and Grigoreva S. [Formation of a large ice depression on Dalk Glacier \(Larsemann Hills, East Antarctica\) caused by the rapid drainage of an englacial cavity](#) // J. Glaciol., 2021, vol. 67, no. 266, pp. 1121-1136.
- [3] Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., Anthony K.W., Olefeldt D., Schuur E.A.G., Koven C., McGuire A.D., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Lawrence D.M., Gibson C. and Sannel A.B.K. Permafrost collapse is accelerating carbon release // Nature, 2019, vol. 569, pp. 32-34.
- [4] Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., Abramov A.A., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M., Fedorov M.P., Nesterova N.V. and Makarieva O.M. Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin // Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, no. 1, pp. 35-44, doi: 10.21782/EC2541-9994-2019-1(35-44).
- [5] Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Efremov V.S., Krylenko I.V., Surkov V.V., Shamov V.V., Lutsenko T.N. Conditions and processes of formation of a beaded channel of a small river in permafrost, Shestakovka river, Central Yakutia // Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, no. 2, pp. 38-49, doi:10.21782/KZ1560-7496-2019-2(38-49).
- [6] Tikhonov A.N., Samarskii A.A. Equations of mathematical physics. Oxford, England: Pergamon Press, 1963, 765 p.

- [7] Aleksyutina D.M., Motenko R.G. Composition, structure and properties of frozen and thawed deposits on the Baydaratskaya Bay coast, Kara Sea // *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, no. 1, pp. 13-25, doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(13-25).
- [8] Gupta S.C. *The classical Stefan problem: basic concepts, modelling and analysis with quasi-analytical solutions and methods*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2003, 385 p.
- [9] Sosnovsky A.V. Mathematical modelling of the influence of snow cover thickness on degradation of permafrost at climate warming // *Earth's Cryosphere*, 2006, vol. X, no. 3, pp. 83-88.