



М.Ю. Филимонов, Н.А. Ваганова,
Е.Н. Акимова, В.Е. Мисилов

Использование суперкомпьютерных технологий для долгосрочного моделирования динамики изменения границ залегания вечной мерзлоты

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А., Акимова Е.Н., Мисилов В.Е. Использование суперкомпьютерных технологий для долгосрочного моделирования динамики изменения границ залегания вечной мерзлоты // Научный сервис в сети Интернет: труды XXI Всероссийской научной конференции (23-28 сентября 2019 г., г. Новороссийск). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2019. — С. 627-638. — URL: <http://keldysh.ru/abrau/2019/theses/32.pdf>
doi:[10.20948/abrau-2019-32](https://doi.org/10.20948/abrau-2019-32)

Размещена также [презентация к докладу](#)

Использование суперкомпьютерных технологий для долгосрочного моделирования динамики изменения границ залегания вечной мерзлоты

М.Ю. Филимонов^{1,2}, Н.А. Ваганова^{1,2}, Е.Н. Акимова^{1,2}, В.Е. Мислов^{1,2}

¹ *Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина*

² *Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН*

Аннотация. Рассмотрена модель распространения тепловых полей в многолетнемерзлых породах от различных инженерных объектов, функционирующих в Арктических районах. В предложенную модель включены наиболее существенные технические и климатические параметры, влияющие на формирование тепловых полей в приповерхностном слое грунта. Основной целью исследования является долгосрочное прогнозирование изменения динамики границы залегания вечной мерзлоты при эксплуатации кустовой площадки северного нефтегазового месторождения. Такой прогноз получается при моделировании сложной системы, состоящей из источников тепла (холода) и мерзлого грунта, растепление которого может приводить к потере его несущей способности и возможным техногенным и экологическим авариям. Например, источниками тепла могут выступать добывающие скважины, а источниками холода – сезоннодействующие охлаждающие устройства, которые используются для термостабилизации грунта. Для минимизации воздействия источников тепла на вечную мерзлоту используются различные варианты теплоизоляции, а для сохранения первоначального температурного режима верхнего слоя грунта используются отсыпки, состоящие из песка, бетона, пеноплекса, или другого теплоизолирующего материала. Разработанный комплекс программ был использован при проектировании 12 северных нефтегазовых месторождений. Для решения описанной задачи в сложной трехмерной области требуются существенные вычислительные ресурсы. Время счета одного варианта часто может превышать 10-20 часов машинного времени на суперЭВМ. Для ускорения проведения численных расчетов были использованы многоядерные процессоры. Приведены численные расчеты, иллюстрируют возможность разработанного комплекса программ для проведения долгосрочных прогнозов по определению изменения границ распространения зон вечной мерзлоты, а также показывают, что на многоядерных процессорах можно достичь ускорения близкого к теоретическому.

Ключевые слова: тепломассоперенос, криолитозона, моделирование, параллельные вычисления, OpenMP

Supercomputer technologies for long-term modeling of permafrost changes

M.Yu. Filimonov^{1,2}, N.A. Vaganova^{1,2}, E.N. Akimova^{1,2}, V.E. Misilov^{1,2}

¹ *Ural Federal University*

² *Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS*

Abstract. A model of propagation of thermal fields in permafrost from various engineering objects operating in Arctic regions is considered. The proposed model includes the most significant technical and climatic parameters affecting the formation of thermal fields in the surface layer of the soil. The main objective of the study is a long-term forecasting of changes in the dynamics of permafrost boundaries during operation of cluster sites of northern oil and gas fields. Such a forecast is obtained by simulation of complex system consisting of heat or cold sources and frozen soil, thawing of which can lead to the loss of the bearing capacity and possible technogenic and environmental accidents. For example, the sources of heat can be production wells, and the sources of cold can be seasonal cooling devices that are used to stabilize the soil. To minimize the impact of heat sources on permafrost, various options for thermal insulation are used, and to preserve the original temperature regime of the top layer of soil, riprap materials consisting of sand, concrete, foam concrete, or other heat insulating material are used. The developed set of programs was used in the design of 12 northern oil and gas fields. To solve the described problem in a complex three-dimensional area, substantial computational resources are required. The computing time of one variant can often exceed 10–20 hours of machine time on a supercomputer. To speed up the numerical calculations, multi-core processors are used. Numerical calculations illustrate the possibility of a developed set of programs for making long-term forecasts for determining changes in the boundaries of the permafrost zones, and show that on multi-core processors it is possible to achieve acceleration close to the theoretical one.

Keywords: heat and mass transfer, cryolithozone, simulation, parallel computing, OpenMP

Термин *вечная мерзлота* был введён в научное употребление в 1927 году основателем школы советских мерзлотоведов М.И. Сумгиным. Впоследствии этот термин критиковали и были предложены альтернативные термины: *многолетнемёрзлые породы*, *многолетняя криолитозона* и др. Общепринято, что многолетнемёрзлыми породами называются породы, которые не менее двух лет находятся при отрицательных температурах. В работах, посвященных освоению северных нефтегазовых месторождений, чаще используется термин *многолетнемёрзлые породы*, сокращенно ММП. Криолитозона занимает около 25% всей суши земного шара [1-2] и располагается в северных или в горных регионах ниже зоны сезонного протаивания грунта, которая определяется

географическими координатами, интенсивностью солнечного излучения и другими климатическими факторами. Возможные изменения климата, связанные, например, с глобальным потеплением (особенно в приполярных районах) могут привести к серьезным изменениям в ММП, которые окажут влияние на окружающую среду в глобальном масштабе [2].

Освоение зон распространения ММП особенно актуально для России, поскольку в криолитозоне добывается около 93% российского природного газа и 80% нефти. Вместе с тем, освоение этих регионов приводит к негативным последствиям, связанным с растеплением ММП, которое приводит к образованию опасных геологических явлений, называемых термокарстом. Средняя толщина ММП меняется в пределах от 10 до 800 метров, а слагающие ММП породы имеют различные физико-химические свойства, которые могут изменяться по всем направлениям. В летнее время, в результате положительных температур и солнечного излучения, происходит сезонное оттаивание верхнего слоя грунта, в зимнее время наблюдается обратный процесс. Моделирование таких сезонных процессов описано в [3], а применение многоядерных процессоров и технологии OpenMP в [4]. Большое влияние на формирование тепловых полей в грунте оказывает и техногенное воздействие, приводящее часто к более существенным изменениям границ ММП [5-6]. На кустовых площадках северных нефтегазовых месторождениях такие воздействия могут оказывать следующие технические системы, являющиеся также и источниками тепла: добывающие и нагнетательные скважины [7-8], факельные системы [9], эксплуатируемые по специальным алгоритмам [10] и другие инженерные объекты. Для термостабилизации грунта (его охлаждения) используются охлаждающие устройства, которые позволяют уменьшить тепловые воздействия от источников тепла на окружающий грунт и могут быть использованы для подготовки строительной площадки в зоне распространения вечной мерзлоты путем охлаждения верхней части грунта [11].

Для решения описанных задач были разработаны математические модели и соответствующие комплексы прикладных задач для моделирования нестационарных тепловых полей в приповерхностном слое грунта в сложной трехмерной области. Время счета таких задач, для которых требуется получить большое число решений с различными параметрами, очень часто могло превышать десятки часов машинного времени на суперЭВМ. Были рассмотрены некоторые параллельные подходы [12], а также использованы облачные технологии, позволяющие проводить удаленные вычисления при решении некоторых задач, возникающих при обустройстве и эксплуатации северных нефтегазовых месторождений [13-14]. В настоящей работе исследовано применение многоядерных процессоров с использованием технологии OpenMP для решения задач долгосрочного прогнозирования изменения границ протаивания мерзлых пород вокруг добывающей скважины.

Приведены результаты численных расчетов и оценка эффективности применения многоядерных процессоров.

1. Постановка задачи и математическая модель

Пусть $T=T(t,x,y,z)$ – распределение температуры в момент времени t , (x,y,z) – точка расчетной области $\Omega = \{(x,y,z): -L_x \leq x \leq L_x, -L_y \leq y \leq L_y, -L_z \leq z \leq 0\}$. Расчетная область представляет собой трехмерный параллелепипед (рис. 1), из которого удалена вертикальная цилиндрическая скважина Ω_1 и сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ) Ω_2 . Оси x и y расположены параллельно поверхности грунта, а ось z – внутрь Ω . На рис. 1 приведено 2 возможных варианта: отдельно расположенная скважина и скважина, вокруг которой расположены СОУ.

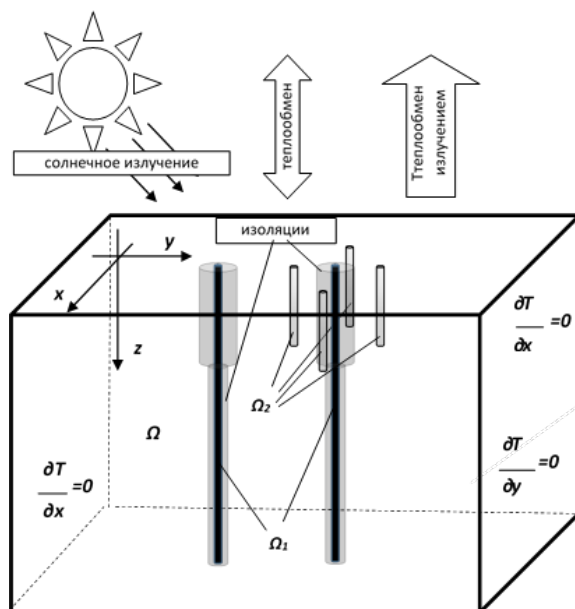


Рис. 1. Расчетная область Ω , скважина Ω_1 , охлаждающие устройства Ω_2 и краевые условия

Процесс распространения тепла с учетом фазового перехода описывается следующим уравнением теплопроводности:

$$\rho(c_v(T) + k\delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad } T) \quad (1)$$

с учетом начального условия

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z), \quad (2)$$

где ρ – плотность [кг/м³], T^* – температура фазового перехода,

$$c_v(T) = \begin{cases} c_1(x, y, z), & \text{при } T < T^*, \\ c_2(x, y, z), & \text{при } T > T^*, \end{cases} \quad \text{– удельная теплоемкость [Дж/(м·К)],}$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1(x,y,z), & \text{при } T < T^*, \\ \lambda_2(x,y,z), & \text{при } T > T^*, \end{cases} \text{ – коэффициент теплопроводности [Вт/(м} \cdot \text{К)],}$$

$k=k(x,y,z)$ – теплоемкость фазового перехода, δ – дельта-функция Дирака. Обоснование применимости этого уравнения для решения задач типа Стефана обосновано в [15-16]. В [17] на основе баланса тепла на дневной поверхности выписано краевое условие

$$\alpha q(t) + b(T_{air}(t) - T|_{z=0}) = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{air}^4(t)) + \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (3)$$

и описан алгоритм привязки математической модели к конкретному географическому месту. В условии (3) Через $T_{air}(t)$ обозначена температура воздуха в приповерхностном слое, которая изменяется периодически в соответствии с годовым температурным циклом, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт/(м}^2\text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана, $b=b(t,x,y)$ – коэффициент теплообмена, $\varepsilon=\varepsilon(t,x,y)$ – коэффициент серости. Коэффициенты теплообмена и серости зависят от типа и состояния поверхности грунта. Суммарная солнечная радиация $q(t)$ состоит из суммы прямой солнечной радиации и рассеянной радиации. Грунтом поглощается только часть суммарной радиации равной $\alpha q(t)$, где $\alpha=\alpha(t,x,y)$ – доля энергии, ушедшая на нагрев грунта, которая в общем случае зависит от состояния атмосферы, угла падения солнечных лучей, т.е. широты местности и времени суток.

Технические системы Ω_1 и Ω_2 являются дополнительными источниками тепловых полей в ММП. В связи с этим возникают дополнительные краевые условия для этих объектов. На поверхностях этих объектов $\partial\Omega_i$ зададим краевые условия

$$T|_{\partial\Omega_i} = T_i(t), \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Для того, чтобы воспользоваться численными методами необходимо на гранях расчетной области Ω задать краевые условия

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\pm L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=\pm L_y} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-L_z} = 0. \quad (5)$$

При этом расчетная область должна быть выбрана достаточно большой, чтобы избежать влияния краевых условий (5) на тепловые поля в расчетной области Ω , создаваемые объектами Ω_i .

2. Численные расчеты и оценка производительности

Для использования численного метода для решения задачи (1)-(5) необходимо определить параметры, входящие в краевое условие (3). В [17-18] описан итерационный алгоритм по определению этих параметров. Выбор этих параметров позволяет опосредовано учесть влияние снежного покрова, климатические, и природные условия, связанные с географическими координатами конкретной кустовой площадке. При численной реализации

решения задачи (1)-(5) применяется конечно-разностный метод, позволяющий использовать метод расщепления по пространственным переменным, для лучшей организации численных расчетов. Уравнение (1), следуя работам [15-16], по каждому из пространственных направлений аппроксимируется неявной центрально-разностной трехточечной схемой и методом прогонки решается система разностных линейных алгебраических уравнений, имеющая трехдиагональный вид. На поверхности грунта, ввиду условия (3), возникает алгебраическое уравнение 4-ой степени, для решения которого используется метод Ньютона [19]. В расчетах используется ортогональная сетка, равномерная или сгущающаяся по определенному закону вблизи поверхности грунта, либо к поверхностям Ω_i . Описанная методика реализована в сертифицированном пакете программ «Wellfrost» и различных его модификациях, которые были апробированы на 12 северных нефтегазовых месторождениях. Также было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов численных расчетов, связанных с определением границы нахождения нулевой изотермы, которая определяет границу области растепления грунта вокруг добывающей скважины. Точность численных расчетов была проверена в 2012 году для российского нефтяного месторождения «Русское», для которого полученные численные результаты отличались от экспериментальных менее 5% через 3 года после начала эксплуатации месторождения.

На рис. 2 и 3 представлены рассчитанные тепловые поля за 5 лет эксплуатации вокруг скважины без теплоизолирующих оболочек и с комбинированной теплоизолирующей оболочкой, а также с системой из 8 СОУ.

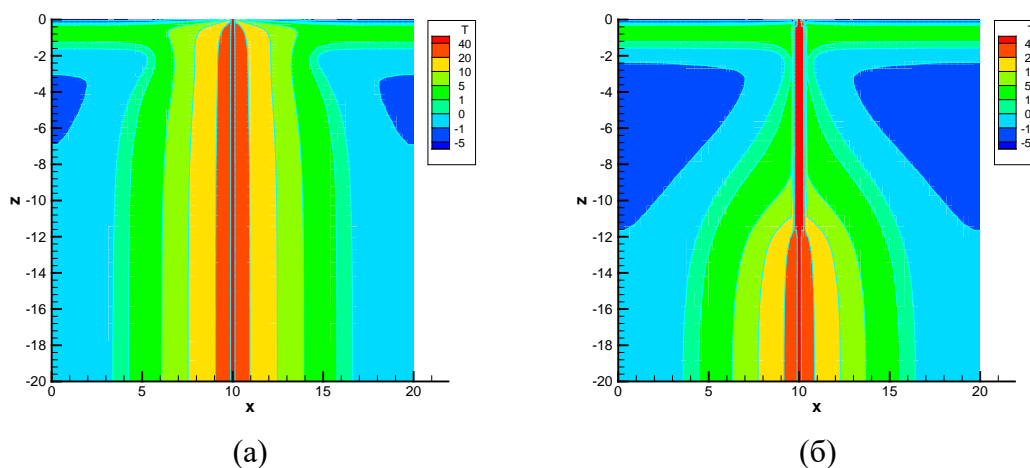


Рис. 2. Тепловые поля после 5 лет эксплуатации неизолированной скважины (а) и скважины с комбинированной оболочкой (б)

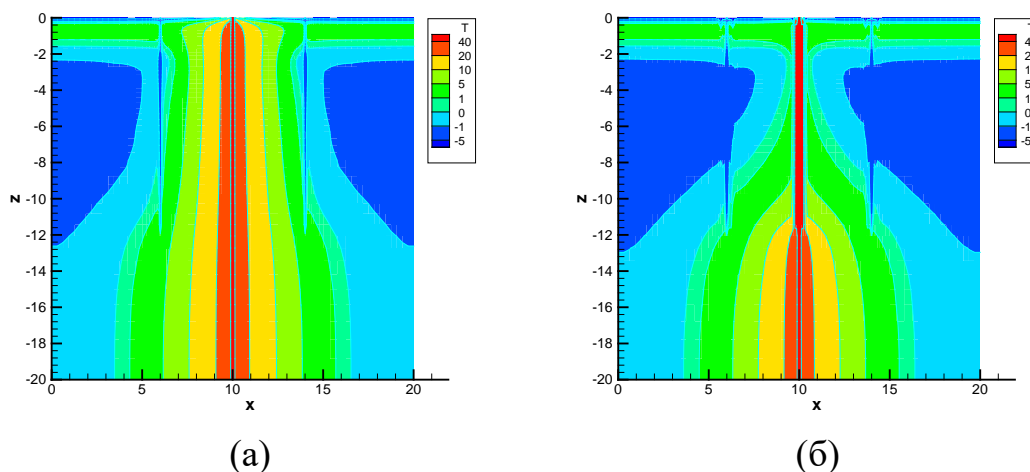


Рис. 3. Тепловые поля после 5 лет эксплуатации неизолированной скважины (а) и скважины с комбинированной оболочкой (б) и системы СОУ

Фоновая температура многолетнемерзлых пород -0.7°C , температура флюида в скважине 50°C . Расчеты позволяют оценить взаимное влияние источников тепла или холода, зону сезонного протаивания и промерзания верхнего слоя грунта. Для оценки долгосрочного влияния расчеты проводятся на временной период до 50 лет, шаг по времени не превышает 24 часа. Время расчета зависит как от размера расчетной сетки, так и от сложности внедряемых в расчетную область объектов. В таблице 1 приведены описания вариантов расчета. На рисунке 4 представлен график изменения времени расчета для каждого из вариантов. Расчеты проводились на сетке $91 \times 91 \times 51$ узлов.

Таблица 1. Описание вариантов расчета.

Номер варианта	Описание варианта
1	Промерзание и оттаивание грунта без внедренных в него объектов.
2	Растепление грунта вокруг скважины без теплоизоляции.
3	Растепление грунта вокруг скважины с простой оболочкой.
4	Растепление грунта вокруг скважины с комбинированной оболочкой.
5	Промерзание грунта при наличии 9 СОУ.
6	Промерзание и растепление грунта вокруг скважины без теплоизоляции и 8 СОУ.
7	Промерзание и растепление грунта вокруг скважины с простой оболочкой и 8 СОУ.
8	Промерзание и растепление грунта вокруг скважины с комбинированной оболочкой и 8 СОУ.

Время расчета варианта растет нелинейно как при увеличении количества объектов, включенных в модель, так и от сложности конструкции объекта даже при условии, что размер расчетной сетки остается неизменным.

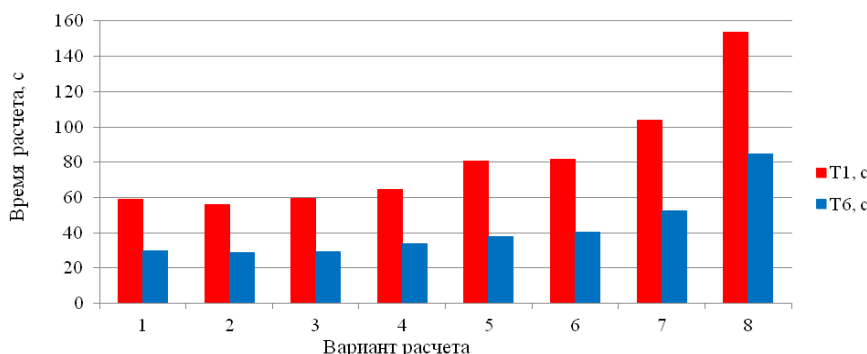


Рис. 4. Времена расчетов 1 года для различных вариантов: время выполнения последовательной программы (красный), время выполнения программы на 6 ядрах (синий)

В таблице 2 приведены времена выполнения параллельной программы для расчета 1 года на 6-ядерном процессоре AMD Ryzen 5 1600X: T_1 — время выполнения последовательной программы, T_6 — время выполнения программы на 6 ядрах.

Таблица 2. Времена выполнения параллельной программы для различных вариантов.

Вариант расчета	$T_1, с$	$T_6, с$	Ускорение S_6	Эффективность E_6
1	59	29.7	1.98	0.33
2	56.2	28.8	1.95	0.32
3	59.6	29.5	2.01	0.34
4	64.3	33.6	1.91	0.32
5	80.8	38.1	2.12	0.35
6	81.8	40.5	2.01	0.34
7	103.7	52.4	1.98	0.33
8	153.8	84.9	1.81	0.30

Для исследования параллельного алгоритма используются показатели ускорения $S_n = T_1 / T_n$ и эффективности $E_n = S_n / n$ при выполнении программы на n ядрах. Полученные значения согласуются с теоретическим ускорением, рассчитанным по закону Амдала:

$$\bar{S}_n = \frac{1}{\alpha + \frac{(1-\alpha)}{n}} = 2.2, \text{ где } \alpha = 0.35 \text{ — доля последовательного кода.}$$

3. Заключение

Разработанные модели и алгоритмы позволяют моделировать распространение нестационарных тепловых полей в мерзлом грунте от добывающих скважин на кустовых площадках, с учетом возможного размещения охлаждающих устройств вокруг скважины. Проведенные расчеты показывают возможность получения долгосрочного прогноза о динамике изменения границы вечной мерзлоты для различных вариантов эксплуатации скважины с использованием дополнительных технических систем и теплоизоляционных материалов. Усложнения, вносимые в модель за счет учета различных дополнительных источников холода (применение СОУ) и использование теплоизоляции, приводят к увеличению времени счета. Применение параллельных вычислений при решении таких задач позволило существенно сократить время счета. Разработан комплекс параллельных программ для многоядерных процессоров с использованием технологии OpenMP.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 19-07-00435-а.

Литература

1. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost // *Nature*. — 2001. — V. 410. — P. 889-890.
2. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // *Natural Hazards*. — 2002. — V. 26. — P. 203-225.
3. Akimova E.N., Filimonov M.Y., Misilov V.E., Vaganova N.A. Supercomputer modelling of thermal stabilization processes of permafrost soils // 18th Intern. Conf. Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Geoinformatics 2019. Kyiv, Ukraine, 13-16 May 2019. — 2019. — № 15482.
4. Akimova E. N., Filimonov M.Yu., Misilov V.E., Vaganova N.A. Simulation of thermal processes in permafrost: parallel implementation on multicore CPU // *CEUR Workshop Proceedings*. — 2018. — V. 2274. P. 1-9. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2274/paper-01.pdf>
5. Vaganova N., Filimonov M. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* — 2017. — V. 72. — P. 012005. — doi:10.1088/1755-1315/72/1/012005
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/72/1/012005/pdf>
6. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields // *AIP Conference Proceedings*. — 2015 — V. 1690. — P. 020016. — doi: 10.1063/1.4936694
7. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // *Вестник НГУ*.

- Сер. Математика, механика, информатика. – 2013. Т. 13. – № 4. – С. 37-42.
URL: <http://www.mathnet.ru/links/c888886340a471d696d18d1435e5eaf2/vngu312.pdf>
8. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. — 2015. — V. 9045. P. 178-185. — doi:10.1007/978-3-319-20239-6_18. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20239-6_18
 9. Filimonov M., Vaganova N. Short and Long Scale Regimes of Horizontal Flare System Exploitation in Permafrost // CEUR Workshop Proceedings. — 2016. — V. 1662. — P. 253-260. — URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1662/mod3.pdf>
 10. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Influence of Special Regimes of Horizontal Flare Systems on Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. — 2019. — V. 11386. — P. 233-240. — doi:10.1007/978-3-030-11539-5_25
 11. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Simulation of Cooling Devices and Effect for Thermal Stabilization of Soil in a Cryolithozone with Anthropogenic Impact // Lecture Notes in Computer Science. — 2019. — V. 11386. — P. 580-587. — doi:10.1007/978-3-030-11539-5_68
 12. Vaganova N., Filimonov M. Parallel splitting and decomposition method for computations of heat distribution in permafrost // CEUR Workshop Proceedings. — 2015. — V. 1513.—P. 42-49.—URL:<http://ceur-ws.org/Vol-1513/paper-05.pdf>
 13. Берсенов А.Ю., Ваганова Н.А., Васёв П.А., Игумнов А.С., Филимонов М.Ю. Кластерные вычисления как сервис на примере задачи моделирования тепловых полей от скважин на северных нефтегазовых месторождениях // Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров: труды Международной суперкомпьютерной конференции (22-27 сентября 2014 г., г. Новороссийск). — М.: Изд-во МГУ, 2014. — С. 147-151. — URL: <http://agora.guru.ru/abrau2014/pdf/147.pdf>
 14. Ваганова Н.А., Васев П.А., Гусарова В.В., Игумнов С.Т., Филимонов М.Ю. Использование облачных технологий при моделировании эксплуатации северных нефтегазовых месторождений // Труды ИМех УрО РАН «Проблемы механики и материаловедения». Материалы конференции «Актуальные проблемы математики, механики, информатики». Ижевск, 3–5 марта 2014. – 2014. – Ижевск: ИМ УрО РАН.– С. 23-28.
 15. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача.– М.:Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
 16. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМиМФ.– 1965.– Т. 5.– № 5.– С. 816-827.
 17. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. On Boundary Conditions Setting for Numerical Simulation of Thermal Fields Propagation in Permafrost Soils // CEUR-WS Proceedings. — 2018. — Vol. 2109.—P. 115-122— URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2109/paper-04.pdf>
 18. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Долгосрочное прогнозирование динамики зон оттаивания многолетнемерзлых пород в устье куста добывающих скважин // XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный

100-летию академика С.С. Кутателадзе: сб. тр. Всероссийской конференции. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. — С. 42-48.

19. Башуров Вл.В., Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // Вычислительные технологии. — 2011. — Т. 16. — №. 4. — С. 3-18.

References

1. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost // Nature. — 2001. — V. 410. — P. 889-890.
2. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // Natural Hazards. — 2002.— V. 26. — P. — 203-225.
3. Akimova E.N, Filimonov M.Y., Misilov V.E., Vaganova N.A. Supercomputer modelling of thermal stabilization processes of permafrost soils // 18th Intern. Conf. Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Geoinformatics 2019. Kyiv, Ukraine, 13-16 May 2019. — 2019. — № 15482.
4. Akimova E. N., Filimonov M.Yu., Misilov V.E., Vaganova N.A. Simulation of thermal processes in permafrost: parallel implementation on multicore CPU // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — V. 2274. P. 1-9. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2274/paper-01.pdf>
5. Vaganova N., Filimonov M. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. — 2017. — V. 72. — P. 012005. — doi:10.1088/1755-1315/72/1/012005
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/72/1/012005/pdf>
6. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields // AIP Conference Proceedings. — 2015 — V. 1690. — P. 020016. — doi: 10.1063/1.4936694
7. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю. Прогнозирование изменений в вечной мерзлоте и оптимизация эксплуатации инженерных систем // Вестник НГУ. Сер. Математика, механика, информатика. — 2013. Т. 13. — № 4. — С. 37-42. URL: <http://www.mathnet.ru/links/c888886340a471d696d18d1435e5eaf2/vngu312.pdf>
8. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. — 2015. — V. 9045. P. 178-185. — doi:10.1007/978-3-319-20239-6_18. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20239-6_18
9. Filimonov M., Vaganova N. Short and Long Scale Regimes of Horizontal Flare System Exploitation in Permafrost // CEUR Workshop Proceedings. — 2016. — V. 1662. — P. 253-260. — URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1662/mod3.pdf>
10. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Influence of Special Regimes of Horizontal Flare Systems on Permafrost // Lecture Notes in Computer Science. — 2019. — V. 11386. — P. 233-240. — doi:10.1007/978-3-030-11539-5_25
11. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Simulation of Cooling Devices and Effect for Thermal Stabilization of Soil in a Cryolithozone with Anthropogenic Impact //

- Lecture Notes in Computer Science. — 2019. — V. 11386. — P. 580-587. — doi:10.1007/978-3-030-11539-5_68
12. Vaganova N., Filimonov M. Parallel splitting and decomposition method for computations of heat distribution in permafrost // CEUR Workshop Proceedings. — 2015. — V. 1513.—P. 42-49.—URL:<http://ceur-ws.org/Vol-1513/paper-05.pdf>
 13. Bersenev A.Iu., Vaganova N.A., Vasev P.A., Igumnov A.S., Filimonov M.Iu. Klasternye vychisleniia kak servis na primere zadachi modelirovaniia teplovykh polei ot skvazhin na severnykh neftegazovykh mestorozhdeniakh // Nauchnyi servis v seti Internet: mnogoobrazie superkompiuternykh mirov: trudy Mezhdunarodnoi superkompiuternoii konferentsii (22-27 sentiabria 2014 g., g. Novorossiisk). — M.: Izd-vo MGU, 2014. — P. 147-151. — URL: <http://agora.guru.ru/abrau2014/pdf/147.pdf>
 13. Bersenev A.Iu., Vaganova N.A., Vasev P.A., Igumnov A.S., Filimonov M.Iu. Klasternye vychisleniia kak servis na primere zadachi modelirovaniia teplovykh polei ot skvazhin na severnykh neftegazovykh mestorozhdeniakh // Nauchnyi servis v seti Internet: mnogoobrazie superkompiuternykh mirov: trudy Mezhdunarodnoi superkompiuternoii konferentsii (22-27 sentiabria 2014 g., g. Novorossiisk). — M.: Izd-vo MGU, 2014. — P. 147-151. — URL: <http://agora.guru.ru/abrau2014/pdf/147.pdf>
 14. Vaganova N.A., Vasev P.A., Gusarova V.V., Igumnov S.T., Filimonov M.Iu. Ispolzovanie oblachnykh tekhnologii pri modelirovanii ekspluatatsii severnykh neftegazovykh mestorozhdenii // Trudy IMekh UrO RAN «Problemy mekhaniki i materialovedeniia». Materialy konferentsii «Aktualnye problemy matematiki, mekhaniki, informatiki». Izhevsk, 3–5 marta 2014. — 2014. — Izhevsk: IM UrO RAN.— P. 23-28.
 15. Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. Computational Heat Transfer. Vol. 2. The Finite Difference Methodology. — Chichester, Wiley, 1995. — 432 pp.
 16. Samarskii A.A., Moiseenko B.D. Ekonomicheskaiia skhema skvoznogo scheta dlia mnogomernoii zadachi Stefana // ZhVMiMF.—1965.—V. 5.— № 5.— P. 816-827.
 17. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. On Boundary Conditions Setting for Numerical Simulation of Thermal Fields Propagation in Permafrost Soils // CEUR-WS Proceedings. — 2018. — Vol. 2109.—P. 115-122.— URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2109/paper-04.pdf>
 18. Vaganova N.A., Filimonov M.Iu. Dolgosrochnoe prognozirovanie dinamiki zon ottaivaniia mnogoletnemerzlykh porod v uste kusta dobyvaiushchikh skvazhin // XXXI Sibirskii teplofizicheskii seminar, posviashchennyi 100-letiiu akademika S.S. Kutateladze: sb. tr. Vserossiiskoi konferentsii. — Novosibirsk: IT SO RAN, 2014. — P. 42-48.
 19. Bashurov V.I.V., Vaganova N.A., Filimonov M.Iu. Chislennoe modelirovanie protsessov teploobmena v grunte s uchetom filtratsii zhidkosti // Vychislitelnye tekhnologii. — 2011. — V. 16. — №. 4. — P. 3-18.