

УДК 004.42+004.021+519.688

## **ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРАНИЦ ЗАЛЕГАНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ АРКТИКИ**

**М. Ю. Филимонов<sup>1</sup>, Н. А. Ваганова<sup>2</sup>, Е. Н. Акимова<sup>3</sup>, В. Е. Мисиллов<sup>4</sup>**

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

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

*<sup>1</sup>fmy@imm.uran.ru, <sup>2</sup>vna@imm.uran.ru, <sup>3</sup>aen15@yandex.ru, <sup>4</sup>v.e.misilov@urfu.ru*

### ***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 использованы различные варианты теплоизоляции, а для сохранения первоначального температурного режима верхнего слоя грунта – 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 расчета одного варианта часто может превышать 10–20 часов машинного времени на суперЭВМ. Для ускорения проведения численных расчетов были использованы многоядерные процессоры. Приведены численные расчеты, которые иллюстрируют возможности 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:** компьютерные программы, теплоперенос, криолитозона, моделирование, задача Стефана, параллельные вычисления, OpenMP*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Термин «вечная мерзлота» был введен в научное употребление в 1927 году основателем школы советских мерзловедов М.И. Сумгиным. Впоследствии этот термин критиковали, и были предложены альтернативные термины: многолетнемерзлые породы, многолетняя криолитозона и др. Общепринято, что многолетнемерзлыми породами называются породы, которые не менее двух лет находятся при отрицательных температурах. В работах, посвященных освоению северных нефтегазовых месторождений, чаще используется термин многолетнемерзлые породы, сокращенно ММП.

Криолитозона занимает около 25% всей суши земного шара [1, 2] и располагается в северных или 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 изменяется 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 месторождений 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 расчета 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.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

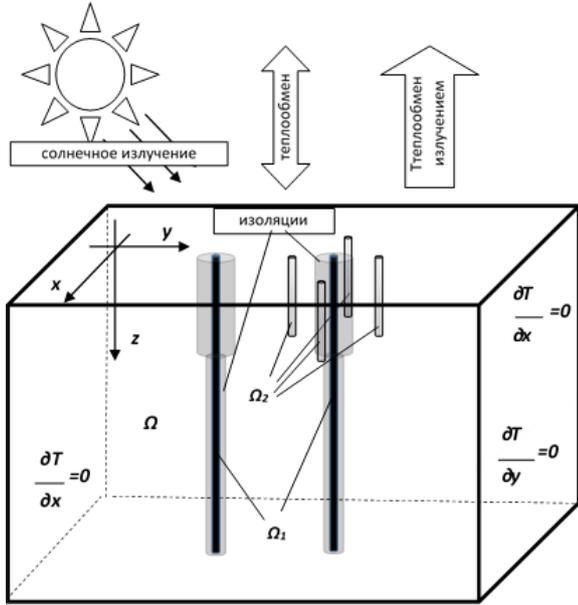
Пусть  $T=T(t,x,y,z)$  – распределение температуры в момент времени  $t$ ,  $(x,y,z)$  – точка расчетной области  $\Omega = \{(x, y, z) : -L_x \leq x \leq L_x, -L_y \leq y \leq L_y, -L_z \leq z \leq 0\}$ . Расчетная область представляет собой трехмерный параллелепипед (рис. 1), из которого удалены вертикальная цилиндрическая скважина  $\Omega_1$  и сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ)  $\Omega_2$ . Оси  $x$  и  $y$  расположены параллельно поверхности грунта, а ось  $z$  – внутрь  $\Omega$ . На рис. 1 приведены два возможных варианта: отдельно расположенная скважина и скважина, вокруг которой расположены СОУ. 

Рис. 1. Расчетная область  $\Omega$ , скважина  $\Omega_1$ , охлаждающие устройства  $\Omega_2$  и краевые условия

Процесс распространения тепла с учетом фазового перехода может быть описан следующим уравнением теплопроводности:

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

с учетом начального условия

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

где  $\rho$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>],  $T^*$  – температура фазового перехода,

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

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

$k=k(x,y,z)$  – теплоемкость фазового перехода,  $\delta$  – 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 годичным 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  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  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

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

Чтобы воспользоваться численными методами, необходимо на гранях расчетной области  $\Omega$  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  $\Omega$ , создаваемые объектами  $\Omega_i$ .

## 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 опосредованно 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  $\Omega_i$ . 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.

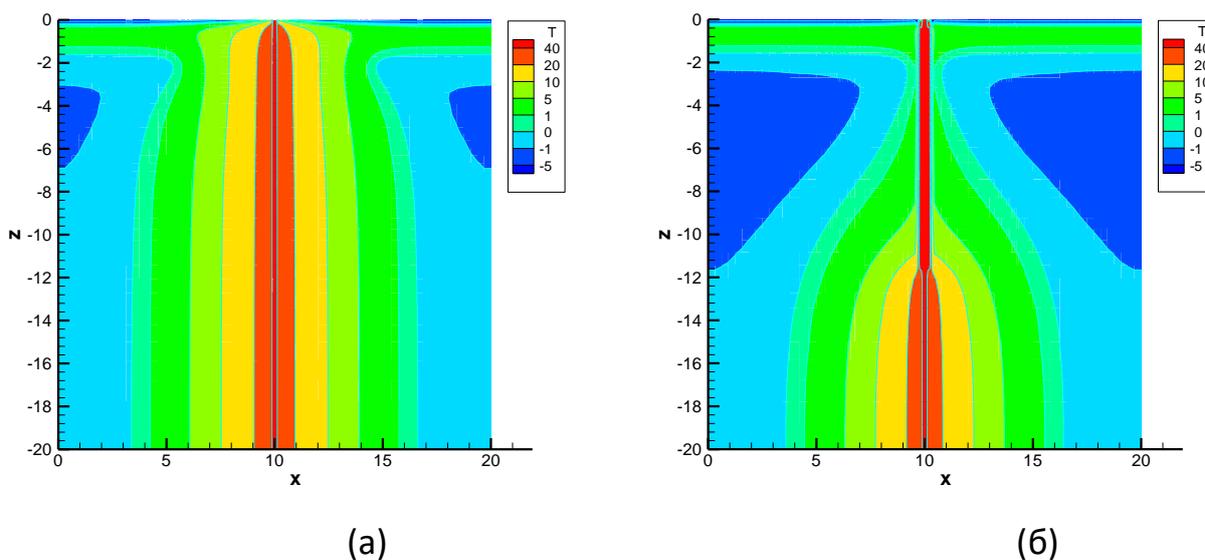


Рис. 2. Тепловые поля после 5 лет эксплуатации неизолированной скважины (а) и скважины с комбинированной оболочкой (б)

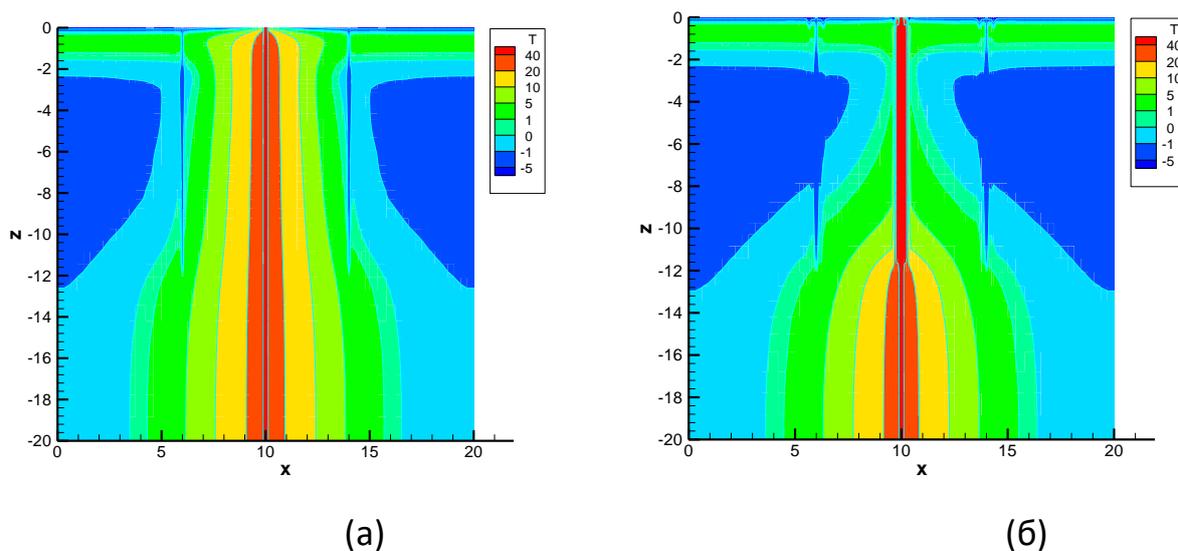


Рис. 3. Тепловые поля после 5 лет эксплуатации неизолированной скважины (а) и скважины с комбинированной оболочкой (б) и системы СО<sub>2</sub>

Фоновая температура многолетнемерзлых пород  $-0.7^{\circ}\text{C}$ , температура флюида в скважине  $50^{\circ}\text{C}$ . 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 рис. 4 представлен график изменения времени расчета для каждого из вариантов. Расчеты проводились на сетке 91x91x51 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.

Численное моделирование сложных объектов для долгосрочных прогнозов требует значительных затрат времени. Одним из способов сокращения времени счета является использование параллельных вычислений [20, 21].

Для процедуры пересчета поля температуры методом переменных направлений в работе [22] авторами было проведено распараллеливание для многоядерных процессоров с использованием технологии OpenMP [23]. Трехдиагональные системы линейных уравнений могут решаться независимо друг от друга. В параллельной реализации они распределяются по OpenMP-потокам.

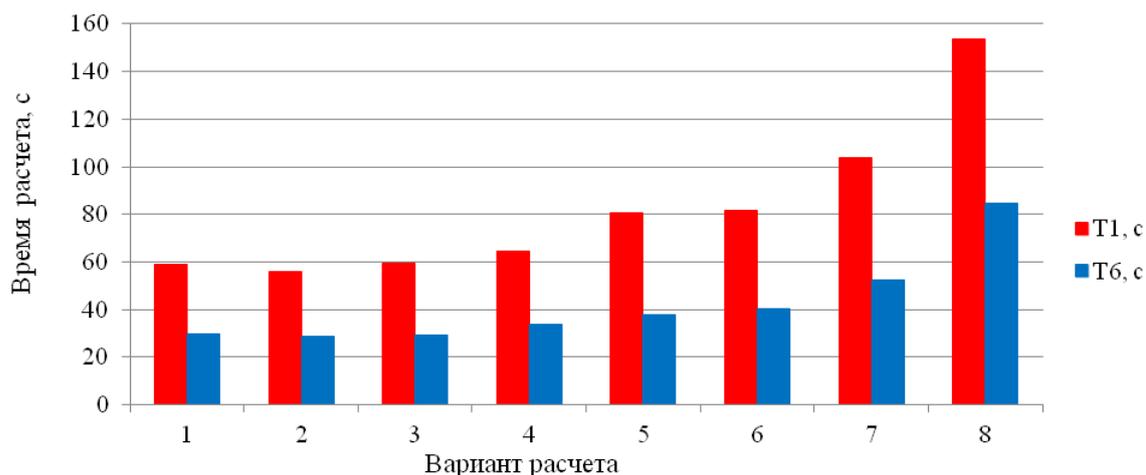


Рис. 4. Времена расчетов 1 года для различных вариантов: время выполнения последовательной программы (красный), время выполнения программы на 6 ядрах (синий)

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:

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

Для анализа производительности последовательной программы и измерения доли последовательного кода был использован инструмент для профилирования Intel Vtune Amplifier [24].

### **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 показали 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 использования теплоизоляции, приводят к увеличению времени расчета. Применение параллельных вычислений при решении таких задач позволило существенно сократить время расчета. Разработан комплекс параллельных программ для многоядерных процессоров с использованием технологии OpenMP.

### **Благодарности**

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. P. 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. Моделирование эксплуатации инженерных систем в условиях вечной мерзлоты // Вестник НГУ. Сер. Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. № 4. С. 37–42. URL: <http://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](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. *Берсенев А.Ю., Ваганова Н.А., Васёв П.А., Изумнов 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., Изумнов 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 сква-

жин // 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.

20. Voevodin V.V., Voevodin V.I.V. Parallel computing // St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2002. 608 p.

21. Rodrigue G. (Ed.) Parallel computations. Vol. 1. Elsevier. 2014.

22. 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. Vol. 2274. P. 1–9. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2274/paper-01.pdf>

23. Chandra R., Dagum L., Kohr D., Menon R., Maydan D., McDonald J. Parallel programming in OpenMP. Morgan Kaufmann. 2001.

24. Intel Developer Zone. Intel VTune Amplifier. URL: <https://software.intel.com/en-us/intel-vtune-amplifier-xe-support/documentation>.

---

## APPLICATION OF SUPERCOMPUTER TECHNOLOGIES FOR LONG-TERM MODELING OF PERMAFROST BOUNDARIES IN THE OIL AND GAS FIELDS OF THE ARCTIC

M. Yu. Filimonov<sup>1</sup>, N. A. Vaganova<sup>2</sup>, E. N. Akimova<sup>3</sup>, V. E. Misilov<sup>4</sup>

*Ural Federal University*

*N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS*

<sup>1</sup>fmy@imm.uran.ru, <sup>2</sup>vna@imm.uran.ru, <sup>3</sup>aen15@yandex.ru, <sup>4</sup>v.e.misilov@urfu.ru

### **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:** *computer software, heat and mass transfer, cryolithozone, simulation, parallel computing, Stefan problem, OpenMP*

## 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. P. 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. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. Modelirovanie ekspluatatsii inzhenernykh system v usloviyakh vechnoi merzloty // *Vestnik NGU. Ser. Mathematics, mechanics, informatics*. 2013. T. 13. № 4. C. 37–42. URL: <http://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](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 mestorozhdeniiax // Nauchnyi servis v seti Internet: mnogoobrazie superkompiuternykh mirov: trudy Mezhdunarodnoi superkompiuternoi konferentsii (22–27 sentiabria 2014 g., g. Novorossiisk). M.: Izd-vo MGU, 2014. S. 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. S. 23–28.

15. *Samarisky A.A., Vabishchevich P.N.* Computational Heat Transfer. Vol. 2. The Finite Difference Methodology. Chichester, Wiley, 1995. 432 p.

16. *Samariskii A.A., Moiseenko B.D.* Ekonomicheskaiia skhema skvoznogo scheta dlia mnogomernoi zadachi Stefana // ZhVMiMF. 1965. V. 5. № 5. S. 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. V. 2109. P. 115–122. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2109/paper-04.pdf>

18. *Vaganova N.A., Filimonov M.Yu.* 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. S. 42–48.

19. *Bashurov V.I., Vaganova N.A., Filimonov M.Yu.* Chislennoe modelirovanie protsessov teploobmena v grunte s uchetom filtratsii zhidkosti // Vychislitelnye tekhnologii. 2011. V. 16. No 4. S. 3–18.

20. *Voevodin V.V., Voevodin V.I.* Parallel computing // St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2002. 608 p.

21. *Rodrigue G.* (Ed.) Parallel computations. Vol. 1. Elsevier. 2014.

22. *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>

23. *Chandra R., Dagum L., Kohr D., Menon R., Maydan D., McDonald, J.* Parallel programming in OpenMP. Morgan Kaufmann. 2001.

24. Intel Developer Zone. Intel VTune Amplifier. URL: <https://software.intel.com/en-us/intel-vtune-amplifier-xe-support/documentation>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**ФИЛИМОНОВ Михаил Юрьевич** – заведующий кафедрой высокопроизводительных компьютерных технологий Уральского федерального университета, ведущий научный сотрудник Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН. Сфера научных интересов – математическое моделирование и информатика.

**Mikhail Yurievich FILIMONOV** – Head of the Department of High-Performance Computer Technologies of the Ural Federal University, Leading Researcher at N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests include mathematical modeling and computer science.

email: [fmy@imm.uran.ru](mailto:fmy@imm.uran.ru)



**ВАГАНОВА Наталья Анатольевна** – старший научный сотрудник Уральского федерального университета и Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН. Сфера научных интересов – информационные технологии и вычислительная математика.

**Nataliia Anatolyevna VAGANOVA** – Senior Researcher, Ural Federal University and N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests include information technology and computational mathematics.

email: vna@imm.uran.ru



**АКИМОВА Елена Николаевна** – профессор кафедры Информационных технологий и систем управления Института радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ Уральского федерального университета, ведущий научный сотрудник Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН. Сфера научных интересов – численные методы, некорректные задачи, параллельные вычисления.

**Elena Nikolaevna AKIMOVA** – Professor of Department of Information Technologies and Control System of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University; Leading researcher at N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanic of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences. Research interests include numerical methods, ill-posed problems, parallel computing.

email: aen15@yandex.ru



**МИСИЛОВ Владимир Евгеньевич** – научный сотрудник Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, доцент Уральского федерального университета. Сфера научных интересов – обратные и некорректные задачи, численные методы, параллельные вычисления.

**Vladimir Evgenievich MISILOV** – Research scientist at the Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences; docent at the Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia. His research interests are in ill-posed problems, numerical methods, parallel computing.

email: v.e.misilov@urfu.ru

*Материал поступил в редакцию 29 октября 2019 года*