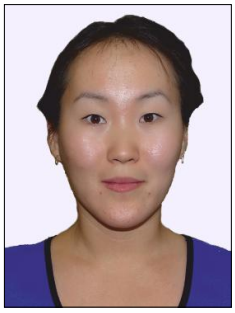
УДК 519.63: 551.345
DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-5-27-35

# ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

# ON THE EFFICIENCY OF BOUNDARY CONDITIONS RESTORATION WHEN MODELING THE THERMAL REGIME OF FROZEN SOILS



***П. П. Пермяков,***
*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск*
*permyakov2005@mail.ru*

***Т. А. Афанасьева,***
*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*
*tatyana_umka91@mail.ru*

***С. П. Варламов,***
*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*
*tatyana_umka91@mail.ru*

***П. Н. Скрябин,***
*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*
*tatyana_umka91@mail.ru*

***P. Permyakov,***
*Permafrost Institute named after P.I. Melnikov, SB RAS, Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V. P. Larionov, SB RAS, Yakutsk*

***T. Afanasyeva,***
*Permafrost Institute named after P.I. Melnikov, SB RAS, Yakutsk*

***S. Varlamov,***
*Permafrost Institute named after P.I. Melnikov, SB RAS, Yakutsk*

***P. Skryabin,***
*Permafrost Institute named after P. I. Melnikov, SB RAS, Yakutsk*

**Р**ассматривается алгоритм восстановления теплового потока на поверхности неоднородного мерзлого грунта при промерзании – протаивании. Оценка термического состояния мерзлых грунтов при изменении климата и урбанизации территории является актуальной задачей геокриологии. Нарушения природных условий приводят к изменению геокриологических условий, угрожающих устойчивости инженерных сооружений. Достоверность численного моделирования термического режима грунтов зависит от корректности задания граничных условий. Исследуется влияние погрешности определения теплофизических и механических характеристик и влажности исследуемого грунтового массива на процесс восстановления теплового потока. Установлено, что процесс восстановления сильно зависит от высоты снежного покрова и температуры окружающей среды

***Ключевые слова:*** *мерзлые неоднородные грунты; итерационный метод; граничная обратная задача; погрешности восстановления граничных условий; тепловой режим; моделирование; грунтовый массив; Якутия; стационар Туймаада; тепловой поток*



*© П. П. Пермяков, Т. А. Афанасьева, С. П. Варламов, П. Н. Скрябин, 2017*

In the article the algorithm of restoration of heat flux on the surface of non-uniform frozen ground at freezing – thawing is considered. Evaluating the thermal state of frozen soils under climate change and urbanization is an important task in geocryology. Disturbances to the natural environment lead to changes in geocryological conditions that threaten the stability of engineering structures. The accuracy of numerical modeling of the soil thermal regime can be increased by improving the boundary conditions. The errors in the determination of the thermal physical and mechanical characteristics and humidity of the investigated soil massif are influenced by the process of heat flux recovery. It is established that the recovery process is highly dependent on the height of the snow cover and ambient temperature

***Key words:*** *frozen heterogeneous soils; iterative method; boundary inverse problem; restoration error of boundary conditions; thermal regime; modeling; soil massif; Yakutia; Tuymaad hospital; heat flow*

*Введение.* Оценка термического состояния мерзлых грунтов при изменении климата и антропогенных воздействий является актуальной задачей геокриологии. Нарушения природных условий (вырубка леса, удаление снежного и напочвенного покрова, развитие растительности) приводят к изменению геокриологических условий и развитию негативных криогенных процессов [5]. В связи с этим возникает необходимость разработки нового метода восстановления граничных условий с учетом неоднородности грунта и применения методики восстановления теплового потока для решения практических задач.

Восстановление граничных условий промерзающих-протаивающих мерзлых грунтов относится к классу некорректных задач [1–2; 4; 8–9]. Решение осуществляется специальными регуляризирующими алгоритмами, т.е. искомое решение задачи находится из минимума функционала невязки. В качестве входных данных берутся экспериментальные измерения температур грунтов.

Результаты исследований будут полезны для оценки устойчивости осваиваемых территорий к антропогенным воздействиям.

*Постановка задачи и алгоритм решения.* Температурное поле мерзлых грунтов с учетом фазового перехода поровой воды описывается следующей задачей теплопроводности (прямая задача) [7]:

$$c^\beta \rho^\beta \frac{\partial T^\beta}{\partial \tau} = \frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda^\beta r^n \frac{\partial T^\beta}{\partial r}\right),$$
$$R_{\beta-1} < r < R_\beta, 0 < \tau \le \tau_m, \beta = \overline{1,n}, \quad (1)$$

$$\lambda^\beta \frac{\partial T^\beta}{\partial r} = 0,\ r = R_\beta,\ 0 < \tau \le \tau_m, \quad (2)$$

$$T^\beta(r,0) = T_0^\beta(r), \qquad R_{\beta-1} \le r \le R_\beta,\ \beta = \overline{1,n},\ \tau = 0. \quad (3)$$

На стыке двух слоев выполняются условия сопряжения

$$T^\beta\Big|_{R_\beta^-} = T^{\beta+1}\Big|_{R_\beta^+},$$

$$\lambda^\beta \frac{\partial T^\beta}{\partial r}\Big|_{R_\beta^-} = \lambda^{\beta+1}\frac{\partial T^{\beta+1}}{\partial r}\Big|_{R_\beta^+}, \qquad 0 < \tau \le \tau_m, \qquad \beta = \overline{1,n-1},$$

$$c^\beta = c^\beta(T) = c_{\text{ск}}^\beta + c_{\text{л}}\omega_0^\beta + (c_{\text{в}} - c_{\text{л}})\omega_{\text{нв}}^\beta(T) + L\frac{\partial \omega_{\text{нв}}^\beta(T)}{\partial T},$$

$$\lambda^\beta = \lambda^\beta(T) = \lambda_{\text{м}}^\beta + \left(\lambda_{\text{т}}^\beta - \lambda_{\text{м}}^\beta\right)\frac{W_{\text{нв}}^\beta(T) - W_{\text{пс}}^\beta}{W_0^\beta - W_{\text{пс}}^\beta},$$

где $\nu = 0,1,2-$ соответствует декартовой, цилиндрической и сферической координатам.

Требуется восстановить одно из граничных условий на левой границе (на поверхности 1 слоя) при $r = R_0$:

$$-\lambda^1 \frac{\partial T^1}{\partial r} = q(\tau),\ r = R_0,\ 0 < \tau \le \tau_m, \quad (4)$$

где искомым параметром $u(\tau)$ является функция $q(\tau)$.

Для восстановления искомого параметра нужны дополнительные замеры температуры внутри исследуемого образца

$$T(r_i,\tau) = T_i^{\text{э}}(\tau),\ i = \overline{1,n_{\text{т}}}. \quad (5)$$

Данную задачу сформулируем как задачу оптимального управления: найти функцию $u(\tau)$ из минимума целевого функционала

$$J(u) = \sum_{i=1}^{n_{\text{т}}}\int_0^{\tau_m} p_i(\tau)\left(T(r_i,\tau) - T^{\text{э}}(r_i,\tau)\right)^2 d\tau, \quad (6)$$

где $p_i(\tau)$ – весовые множители с размерностью $К^{-2}\cdot с^{-1}$; $T(r_i,\tau), T^з(r_i,\tau)$ – расчетная и замеренная температуры в i-й точке мерзлого массива.

*Метод решения.* Минимизация целевого функционала производится с помощью градиентных методов. Выводим формулу для градиента функционала, соответствующую искомому параметру [1; 2].

В методе сопряженных градиентов итерационная последовательность строится с учетом предыдущего направления спуска по следующему закону:

$$u^{s+1} = u^s - \beta_s S^s, \quad s = 0,1,\ldots,$$
$$S^s = J'(u^s) - \gamma_s S^{s-1}, \quad S^0 = J'(u^0), \qquad \gamma_0 = 0. \quad (7)$$

Для модели скорейшего спуска итерационная последовательность строится по формуле

$$u^{s+1} = u^s - \beta_s J'(u^s), \quad s = 0,1,\ldots, \quad (8)$$

где $\beta_s > 0$ – длина шага спуска, которая определяется из условия

$$\min_{\beta\ge 0} J\left(u^s - \beta J'(u^s)\right). \quad (9)$$

Коэффициент $\beta_s$, определяющий глубину спуска при переходе к следующему приближению, находится из условия

$$\min_{\beta\ge 0} J(u^s - \beta S^s). \quad (10)$$

Параметр $\gamma_s$ задается различными способами в зависимости от свойств целевого функционала. Так, например, если вторая производная функция по Фреше изменяется мало, то параметр задается по формуле

$$\gamma_s = -\frac{\left(J'(u^s), J'(u^{s-1}) - J'(u^s)\right)_{R^{m_0}}}{\|J'(u^s)\|^2_{R^{m_0}}}. \quad (11)$$

Если минимизируемый функционал близок к квадратичному, то определяется по выражению

$$\gamma_s = -\frac{\|J'(u^s)\|^2_{R^{m_0}}}{\|J'(u^{s-1})\|^2_{R^{m_0}}}. \quad (12)$$

Величина шага $\beta_s$ метода скорейшего спуска и сопряженных градиентов находится по формуле

$$\beta_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_\tau}\int_0^{\tau_m} p_i(\tau)\nu_i(T_i - T_i^з)d\tau}{\sum_{i=1}^{n_\tau}\int_0^{\tau_m} p_i(\tau)\nu_i^2 d\tau}, \quad (13)$$

где $\nu_i = \nu_i(r,\tau)$ – решение краевой задачи для приращения

$$c^\beta\rho\frac{\partial\nu^\beta}{\partial\tau} = A_1^\beta\frac{\partial^2\nu^\beta}{\partial r^2} + A_2^\beta\frac{\partial\nu^\beta}{\partial r} + A_3^\beta\nu^\beta,$$
$$R_{\beta-1} < r < R_\beta, \quad 0 < \tau \le \tau_m, \quad (14)$$

$$\frac{\partial\lambda^\beta\nu^\beta}{\partial r} = 0, \quad r = R_n, \quad 0 < \tau \le \tau_m, \quad (15)$$

$$\nu^\beta(r,0) = 0, \quad R_{\beta-1} \le r \le R_\beta, \quad (16)$$

$$\nu^\beta\big|_{r_i^-} = \nu^{\beta+1}\big|_{r_i^+}, \quad \left.\frac{\partial\lambda^\beta\nu^\beta}{\partial r}\right|_{r_i^-} = \left.\frac{\partial\lambda^\beta\nu^\beta}{\partial r}\right|_{r_i^+},$$
$$\beta = \overline{1,m-1} \quad (17)$$

Граничные условия при $r = R_0$ имеет вид

$$-\frac{\partial\lambda^1\nu^1}{\partial r} = \Delta q, \quad , \quad 0 < \tau \le \tau_m. \quad (18)$$

Градиент функционала $J'(u^s)$ имеет вид

$$\frac{\partial J}{\partial b_\alpha} = \int_0^{\tau_m}\psi^1 B_\alpha(\tau)|_{r=R_1}d\tau, \quad (19)$$
$$\alpha = -1,0,1,\ldots,m_0+1,$$

где $\psi^1 = \psi^1(r,\tau)$ – решение сопряженной задачи

$$-c^\beta\rho^\beta\frac{\partial\psi^\beta}{\partial\tau} = \frac{\partial^2 A_1^\beta\psi^\beta}{\partial r^2} - \frac{\partial A_2^\beta\psi^\beta}{\partial r} + A_3^\beta\psi^\beta, \quad (20)$$
$$R_{\beta-1} < r < R_\beta, \quad 0 < \tau \le \tau_m,$$

$$\lambda^\beta r^\nu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\psi^\beta}{r^\nu}\right) = 0, \quad r = R_\beta, \quad 0 < \tau \le \tau_m, \quad (21)$$

$$\psi^\beta(r,\tau_m) = 0, \qquad R_{\beta-1} \le r \le R_\beta, \quad (22)$$

$$\left.\begin{array}{c}\psi^\beta\big|_{r_i^-} = \psi^\beta\big|_{r_i^+},\\ \lambda^\beta r^\nu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\psi^\beta}{r^\nu}\right)\Big|_{r_i^-} - \lambda^\beta r^\nu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\psi^\beta}{r^\nu}\right)\Big|_{r_i^+} = 2p_i(\tau)(T_i - T_i^з), \quad i = \overline{1,n_\tau},\\ 0 < \tau \le \tau_m,\end{array}\right\} \quad (23)$$

где

$$A_1^\beta = \lambda^\beta, \qquad A_2^\beta = \frac{\partial\lambda^\beta}{\partial r} + \frac{1}{r_\nu}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda^\beta r^\nu\right),$$

$$A_3^\beta = \frac{1}{r^\nu}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial\lambda^\beta}{\partial T}r^\nu\frac{\partial T^\beta}{\partial r}\right) - \frac{\partial c^\beta}{\partial T}\gamma\frac{\partial T^\beta}{\partial\tau}.$$

Граничные условия при $r = R_1$, соответствующие искомым параметрам, имеют вид

$$-\lambda^1 r^\nu \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\psi^1}{r^\nu}\right) = 0, \quad 0 < \tau \le \tau_m, \qquad (24)$$

Граничная обратная задача промерзания-протаивания мерзлого грунта является нелинейной, и минимизация функционала невязки осуществляется методом сопряженных градиентов, который относится к классу итерационных регуляризирующих численных алгоритмов.

*Объекты исследования.* Для восстановления искомых параметров проведены специальные натурные наблюдения на теплобалансовых стационарах [3; 5–6].

Стационар Туймаада расположен на второй надпойменной террасе р. Лена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. На разнотравном лугу мощность сезонноталого слоя ($\xi$) грунтов за период 1995–2016 гг. изменяется от 1,82 до 1,90 м, среднегодовая температура грунтов на глубине 10 м ($t_0$) варьируется от –2,3 до –1,4 $^0$С.

Естественная площадка организована на разнотравном лугу. Снежный покров сохранялся в ненарушенном состоянии. Литологический разрез грунтов в слое годовых теплооборотов следующий: до 0,2...0,3 м – дерново-растительный слой; 0,3...0,6 м – легкий суглинок; 0,6...2,2 м – мелкозернистый песок; 2,2...8,5 м – мелкозернистый песок с растительным детритом; 8,5...10,0 м – песок гравелистый.

На оголенной площадке удален верхний дерново-растительный слой, в холодный период года регулярно счищался снежный покров по мере его выпадения.

Обе площадки характеризуются одинаковым литологическим составом, но различаются распределением влажности по глубине и по времени. В начале ноября 2014 г. на территории Института мерзлотоведения СО РАН начаты наблюдения за гидротермическим режимом и глубиной сезонного протаивания грунтов на двух экспериментальных площадках: первая на разнотравно-злаковом лугу, вторая – с удалением снежного и напочвенного покровов.

В результате выполненных работ получен полный объем данных о гранулометрическом составе, плотности, влажности и теплофизических характеристиках грунтов низкой надпойменной террасы р. Лена для типичных геокриологических и климатических условий Центральной Якутии. Влажность, плотность и основные теплофизические свойства грунтов являются осредненными за теплый период года с мая по сентябрь (табл. 1).

Таблица 1/ Table 1

**Теплофизические характеристики почвогрунтов/Soil thermophysical characteristics**

| Глубина, м/Depth, m | Разрез/Open-cast | Влажность, %/ Humidity, % | Плотность грунта, кг/м$^3$/ Density of soil, kg/m$^3$ | Теплопроводность, Вт/(м·К)/ Thermal conductivity, W/(m·K) | | Объемная теплоемкость, С·10$^{-3}$ кДж/(м$^3$·К)/ Volumetric heat capacity, C·10$^{-3}$kJ/(m$^3$ · K) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $\lambda_т^*$ | $\lambda_м$ | $C_т$ | $C_м$ |
| 0,0...0,3 | Почвенно-растительный слой/ Soil-vegetative layer | 17 | 1280 | 0,35 | 0,44 | 1,88 | 1,46 |
| 0,3...0,6 | Супесь (алевриты)/ Sandy loam (silt) | 9 | 1420 | 0,81 | 0,95 | 1,76 | 1,67 |
| 0,6...2,2 | Песок мелкозернистый/ Fine-grained sand | 10 | 1420 | 1,20 | 1,43 | 1,55 | 1,25 |
| 2,2...8,5 | Песок мелкозернистый мерзлый/ Sand fine-grained frozen | 25 | 1450 | 1,95 | 2,45 | 2,42 | 1,69 |
| 8,5...10,0 | Песок гравелистый мерзлый/ Sand gravelly frozen | 20 | 1500 | 1,95 | 2,45 | 2,30 | 1,65 |

В непосредственной близости от площадок на расстоянии 100 м расположена метеостанция Северо-Восточного федерального университета и ИМЗ СО РАН, исходные данные которых по температуре воздуха и осадкам использовались в работе (табл. 2).

Таблица 2/Table 2

**Температура воздуха (°С) и высота снега (м) на площадке «Луг» стационара Туймаада/ Air temperature (0C) and snow depth (m) at the meadow plot, Tyumaada station**

| Годы/ Years | Месяцы/Months | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | X | XI | XII | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
| Температура воздуха/Air temperature | | | | | | | | | | | | |
| 1970/71 | –11,7 | –29,1 | –41,8 | –43,3 | –37,7 | –21,3 | –6,7 | 8,8 | 16,3 | 19,8 | 14,8 | 7,0 |
| 2015/16 | –7,0 | –24,6 | –34,3 | –34,8 | –35,0 | –14,8 | –0,1 | 7,6 | 16,0 | 18,1 | 13,4 | 6,9 |
| Высота снега/Height of snow | | | | | | | | | | | | |
| 1970/71 | 0,09 | 0,28 | 0,38 | 0,39 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | – | – | – | – | – |
| 2015/16 | 0,03 | 0,15 | 0,23 | 0,27 | 0,31 | 0,30 | 0,07 | – | – | – | – | – |

*Результаты и обсуждение численного решения.* Пример 1. Рассмотрено влияние восстановления плотности теплового потока при различных неоднородностях грунта. Грунт состоит из пяти слоев (табл. 1), где размещены термические датчики на разных глубинах. В реальных условиях исходные теплофизические и механические характеристики грунтов задаются с неопределенной погрешностью. Целью численного моделирования является изучение влияния погрешности входных данных на точность восстановления.

На рис. 1 приведено восстановление плотности теплового потока при различных значениях теплопроводности первого слоя. Как видно из рис. 1, при понижении коэффициента теплопроводности значение теплового потока увеличивается, а при повышении – уменьшается.

В реальных условиях влажность почвы зависит от метеорологических условий, а теплофизические характеристики имеют нелинейную зависимость от влажности. На рис. 2 представлены плотности теплового потока при различных усредненных влажностях почвы. Из рис. 2 видно, что процесс восстановления зависит от влажности грунта.

Распределение плотности теплового потока от плотности грунта представлено на рис. 3. Видно, что плотность теплового потока зависит от плотности почвенного массива при повышении его значения.

Пример 2. Рассмотрено восстановление теплового потока на стационаре Туймаада. Начальное распределение температуры соответствует фактическим наблюдениям на стационаре. В качестве $T^{з}(r_i, \tau)$ приведены измерения температуры на глубине 0,2 м.

Приведен график восстановления теплового потока на поверхности разнотравного луга и оголенной площадки (рис. 4).

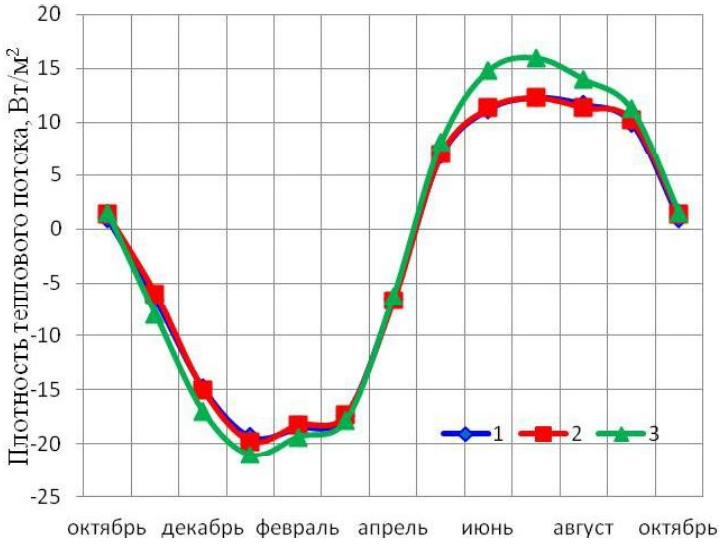



*Рис. 1. Плотность теплового потока при различных значениях теплопроводности поверхностного слоя: 1 – $(\lambda - 0{,}1 * \lambda)$; 2 – $\lambda$; 3 – $(\lambda + 0{,}1 * \lambda)$*

*Fig. 1. Heat flux density for different values of thermal conductivity of the surface layer: 1 – $(\lambda - 0{,}1 * \lambda)$; 2 – $\lambda$; 3 – $(\lambda + 0{,}1 * \lambda)$*

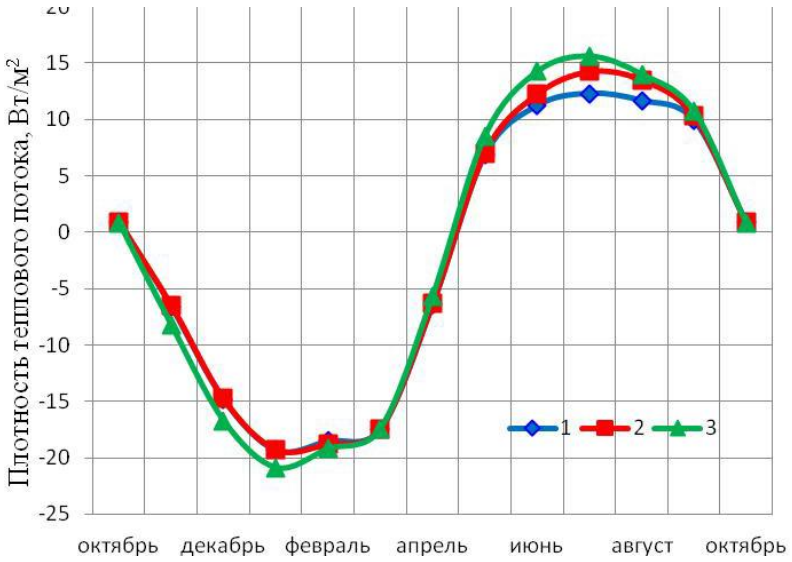



*Рис. 2. Динамика плотности теплового потока при различных значениях усредненной влажности поверхностного слоя: 1 – 9 %; 2 – 13 %; 3 – 19 %*

*Fig. 2. Dynamics of the heat flow density for different values of the average moisture content of the surface layer: 1 – 9 %; 2 – 13 %; 3 – 19 %*

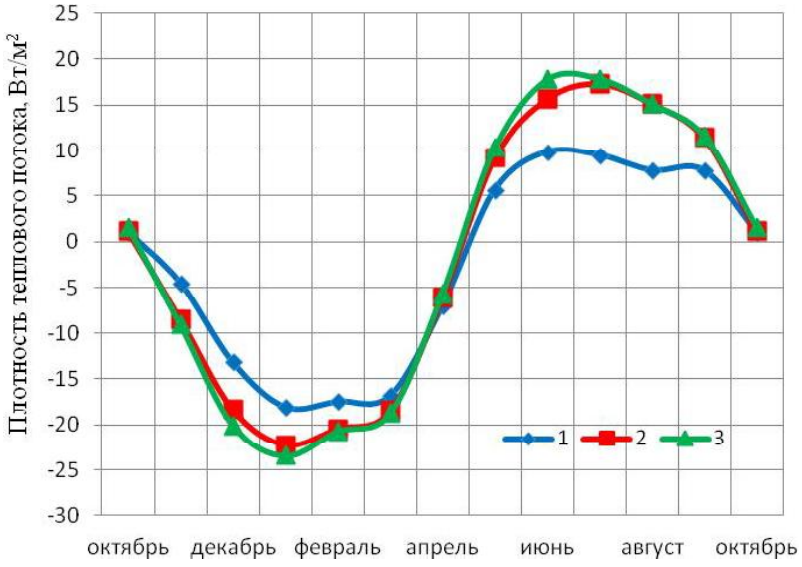



*Рис. 3. Динамика теплового потока при различных значения плотности поверхностного слоя: 1 – 920 кг/м³; 2 – 1220 кг/м³; 3 – 1420 кг/м³*

*Fig. 3. Dynamics of heat flow for different values of the density of the surface layer: 1 – 920 kg / m³; 2 – 1220 kg / m³; 3 – 1420 kg / m³*

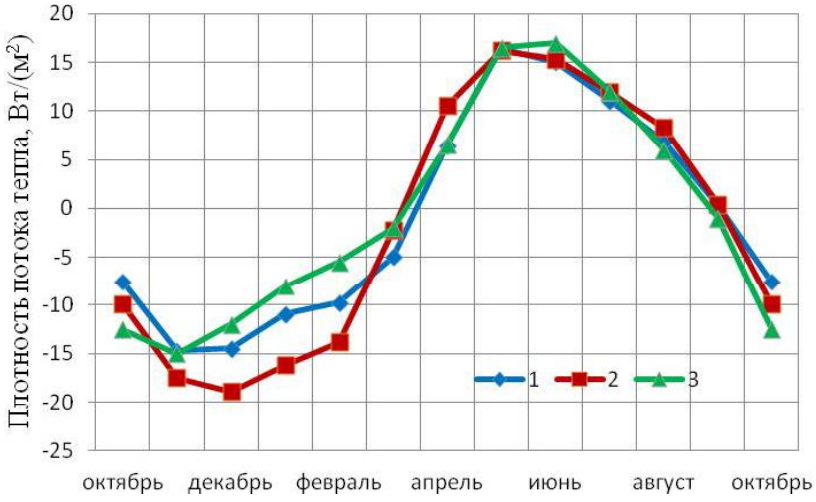



*Рис. 4. Годовой ход тепловых потоков на поверхности разнотравного луга (1), оголенной площадки (2) и по многолетним данным (3)*

*Fig. 4. The annual course of heat fluxes on the surface of the meadow grass (1), the exposed area (2) and long-term data (3)*

Из рис. 4 видно, что на оголенной площадке процесс промерзания (кривая 1) идет более интенсивно в зимнее время по сравнению с разнотравным лугом (кривая 2). В марте-апреле идет интенсивное поступление теплового потока на оголенном участке, а в летнее время интенсивность потока практически одинакова. Кривая 3, отражающая плотность теплового потока по многолетним данным, определена численным методом по данным теплобалансовых наблюдений (Павлов, 1979).

Из рис. 4 видно, что в зимнее время абсолютное значение теплового потока по данным А. В. Павлова, ниже по сравнению с результатами наших наблюдений. При этом интенсивность теплового потока зависит от теплоизоляционных свойств снега, который определяется высотой, плотностью и структурой снежного покрова. Структура снежного покрова зависит от плотности, температуры, водяного пара и т.д. В летний период плотности теплового потока сильно не отличаются из-за затеняющих влияний растительности.

*Выводы.* Достоверность восстановления плотности теплового потока сильно зависит от теплофизических и механических характеристик, влажности подстилающих грунтов.

Годовой ход тепловых потоков определяется динамикой параметров снежного покрова и температуры воздуха.

Предложенную методику восстановления теплового потока в мерзлых грунтах, при моделировании термического состояния урбанизированных территорий можно использовать при меняющихся климатических условиях.

**Список литературы**

1. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.

2. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.

3. Жирков А. Ф., Варламов С. П., Железняк М. Н. Результаты годичного цикла наблюдений температурного режима грунтов в естественных условиях и при нарушении покровов // Материалы V конференции геокриологов России. М.: Университетская книга. Ч. 6. 2016. С. 52–58.

4. Костецкая Г. С., Радченко Т. Н. Методы математической физики. Уравнение теплопроводности. Ростов-н/Д., 2016. 47 с.

5. Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Книжное изд-во, 1975. 304 с.

6. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.

7. Павлов А. В., Перльштейн Г. З., Типенко Г. С. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // Криосфера земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 3–12.

8. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 480 с.

9. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.

**References**

1. Alifanov O. I. *Obratnye zadachi teploobmena* [Inverse Heat Transfer Problems]. Moscow: Mechanical Engineering, 1988. 280 p.

2. Alifanov O. M., Artyukhin E. A., Rumyantsev S. V. *Ekstremalnye metody resheniya nekorrektnyh zadach* [Extreme methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Science, 1988. 288 p.

3. Zhirkov A. F., Varlamov S. P., Zheleznyak M. N. *Materialy pyatoy konferentsii geokriologov Rossii* (Proceedings of the 5th Conference of Geocryologists of Russia). Moscow: University Book, part 6, 2016. pp. 52–58.

4. Kostetskaya G. S., Radchenko T. N. *Metody matematicheskoy fiziki. Uravnenie teploprovodnosti* [Methods of mathematical physics. Equation of heat conductivity]. Rostov-n / D., 2016. 47 p.

5. Pavlov A. V. *Teploobmen pochvy s atmosferoy v severnyh i umerennyh shirotah territorii SSSR* [Heat exchange of soil with the atmosphere in the northern and temperate latitudes of the USSR]. Yakutsk: Book Publishing House, 1975. 304 p.

6. Pavlov A. V. *Teplofizika landshaftov* [Thermal physics of landscapes]. Novosibirsk: Science, 1979. 284 p.

7. Pavlov A. V., Perlshtein G. Z., Tipenko G. S. *Kriosfera zemli* (Cryosphere of Earth), 2010, vol. XIV, no. 1, pp. 3–12.

8. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. *Chislennye metody resheniya obratnyh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Publishing house LCI, 2009. 480 p.

9. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnyh zadach* [Methods for solving of ill-posed problems]. Moscow: Science, 1979. 288 p.

## *Коротко об авторах*

**Пермяков Петр Петрович,** д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия. Область научных интересов: методология численного решения задач тепломассообмена в мерзлых грунтах и сопутствующих экзогенных процессов (осадка, пучение, термокарст и т.д.) при техногенном загрязнении
permyakov2005@mail.ru

**Афанасьева Татьяна Александровна,** аспирант, инженер, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия. Область научных интересов: обратные задачи теплопроводности, моделирование теплового режима мерзлых грунтов
tatyana_umka91@mail.ru

**Варламов Степан Прокопьевич,** канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия. Область научных интересов: теплофизические исследования грунтов и горных пород, мониторинговые геотермические исследования, температурный режим грунтов
vsp@mpi.ysn.ru

**Скрябин Павел Николаевич,** канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия. Область научных интересов: теплофизические исследования грунтов и горных пород, мониторинговые геотермические исследования, температурный режим грунтов
vsp@mpi.ysn.ru

## *Briefly about the authors*

**Petr Permyakov,** doctor of physico-mathematical sciences, leading research scientist, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V. P. Larionov, SB RAS, Yakutsk, Russia. Sphere of scientific interests: methodology for computer modelling of heat and mass transfer processes in contaminated frozen soils
**Tatyana Afanasyeva,** postgraduate, technical assistant, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia. Sphere of scientific interests: inverse problems of heat conductivity, modeling of thermal regime of frozen soils

**Stepan Varlamov,** candidate of geographical sciences, senior research scientist, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia. Sphere of scientific interests: permafrost thermal research of soils and rocks, monitoring geothermal researches, temperature regime of soil

**Pavel Skryabin,** candidate of geographical sciences, leading research scientist, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia. Sphere of scientific interests: permafrost thermal research of soils and rocks, monitoring geothermal researches, temperature regime of soil

## *Образец цитирования*

*Пермяков П. П., Афанасьева Т. А., Варламов С. П., Скрябин П. Н. Об эффективности восстановления граничных условий при моделировании теплового режима мерзлых грунтов // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2017. Т. 23. № 5. С. 27–35. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-5-27-35.*

*Permyakov P., Afanasyeva T., Varlamov S., Skryabin P. On the efficiency of boundary conditions restoration when modeling of the thermal regime of frozen soils // Transbaikal State University Journal, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 27–35. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-5-27-35.*

Дата поступления статьи: 04.05.2017 г.
Дата опубликования статьи: 31.05.2017 г.