

УДК 622.015:622.221

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ  
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД КАРЬЕРОВ  
ПОСЛЕ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ**

**М. В. Каймонов, С. В. Панишев**

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
E-mail: gtf@igds.yzn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия*

На примере Кангаласского буроугольного месторождения проведены расчеты прогноза температурного режима массива многолетнемерзлых горных пород до и после взрывной отбойки. Показана взаимосвязь между периодом проведения взрывных работ и формированием температурного режима в развале взорванной горной массы. Полученные результаты послужат основой для прогноза производительности драглайна в различные периоды года и выбора эффективной схемы отработки взорванной горной массы.

*Карьер, криолитозона, многолетнемерзлые породы, смерзание, температура пород, драглайн, математическое моделирование*

Карьеры, расположенные в условиях месторождений зоны многолетней мерзлоты, являются сложными термодинамическими и горнотехническими системами. С точки зрения ресурсосбережения, повышения эффективности открытых горных работ при отработке месторождений полезных ископаемых здесь необходимо увязывать технологические решения со свойствами многолетнемерзлого массива, которые определяют способы выемки горной массы и производительность оборудования.

Разработка многолетнемерзлых вскрышных пород драглайном с предварительным буровзрывным рыхлением в условиях месторождений криолитозоны осложняется повторным смерзанием взорванного массива, причем прочность смерзания может достигать нескольких мегапаскалей. В этом случае взорванный массив представляет собой для драглайна почти непреодолимое препятствие. Основными факторами, обуславливающими процесс повторного смерзания пород, являются отрицательная температура и влага на поверхности кусков горной массы.

Процесс формирования температурного режима отбитых вскрышных пород определяется технологическим режимом вскрыши. Значительное техногенное воздействие на породный массив оказывается при проведении взрывных работ. Происходит разрушение породного массива, изменение его плотности и теплофизических параметров. Отбитая порода при взрыве практически не нагревается [1].

Существует большое количество работ по различным аспектам взрывных работ на карьерах. Тем не менее до сих пор нет удовлетворительной схемы для описания трансформации внутренней структуры массива под воздействием взрыва и связано это с недостаточной изученностью кинематики этого процесса. В настоящее время наибольшее распространение получила схема А. В. Гальянова [2]. Согласно этой схеме, отмечены следующие закономерности формирования развала при буровзрывных работах (рис. 1):

— наибольшая деформация внутренней структуры массива происходит при однорядном взрывании скважин;

— в деформации массива наблюдается расширение, сдвиг и ротация; последняя происходит неравномерно и имеет дифференциальный характер: нижние слои перемещаются в меньшей степени, чем верхние, прилегающие к середине откоса уступа, они “забрасываются” вперед и как бы заваливают нижние слои; поверхностный слой развала образован породами тех же зон, что и в целике, которые претерпевают деформацию сдвига и расширения;

— плотность рудной массы в развале увеличивается к границе развала;

— геометрические параметры зарядов определяют начальные условия движения среды под действием энергии газообразных продуктов взрыва.

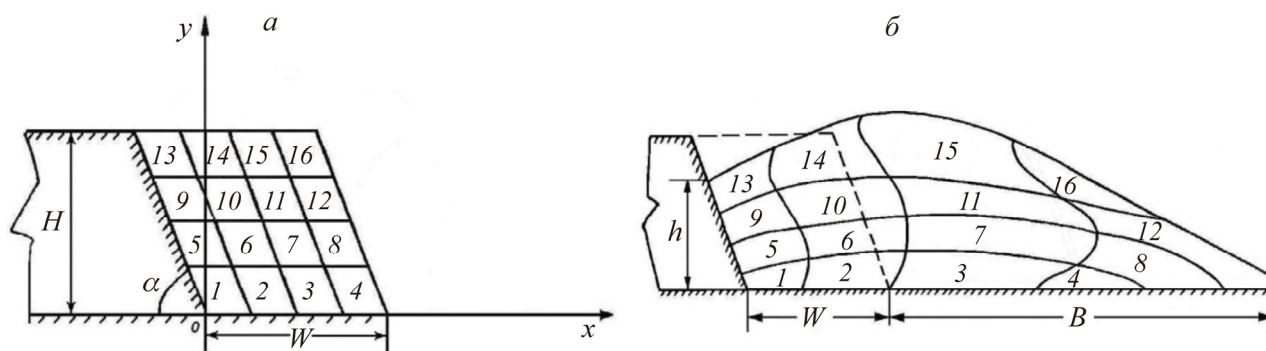


Рис. 1. Принципиальная схема деформации массива при буровзрывных работах в карьере: *a* — до взрыва; *б* — после взрыва

Задача формулируется следующим образом. На карьере угольного месторождения с установившимся тепловлажностным режимом горных пород в результате взрывной отбойки вскрыши образуется развал с заданным профилем. Необходимо выявить динамику температурного поля развала пород вскрыши в процессе ведения горных работ.

Для прогноза температурного режима породного целика и развала после взрывной отбойки разработана математическая модель, которая учитывает теплофизические характеристики пород, фазовые переходы влаги, изменение температуры атмосферного воздуха, температуру, влажность и плотность пород, мощность вскрыши, технологическую схему отработки блока, углы формируемых откосов, а также особенности технологии ведения буровзрывных работ в карьере.

При разработке математической модели исследуемого процесса приняты следующие упрощающие допущения:

— теплообмен на поверхности массива горных пород карьера с атмосферным воздухом определяется по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена  $\alpha$ ;

— фильтрация воды в целике и развале отсутствует;

— за время отработки блока геометрические размеры развала изменяются согласно технологической схеме.

Расчетная схема математической модели прогноза температурного режима породного целика и развала горных пород карьера приведена на рис. 2.

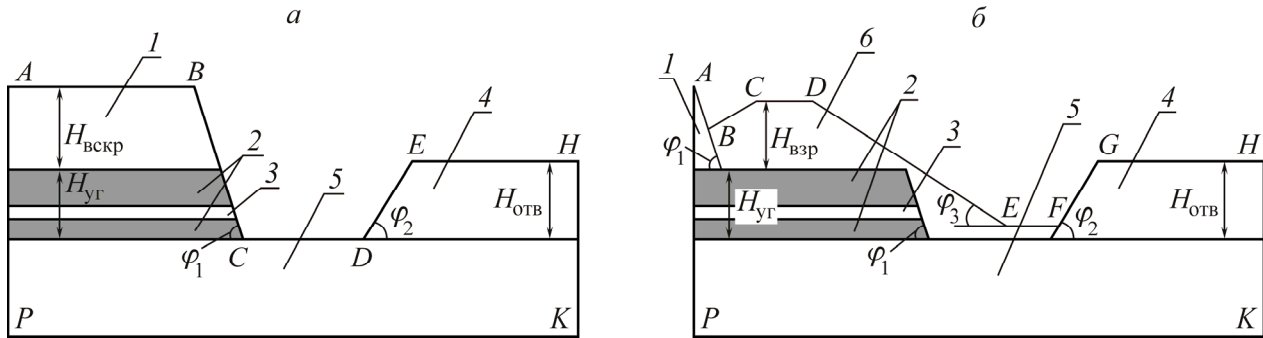


Рис. 2. Схема расчета целика (а) и развала (б) горных пород на карьере: 1 — вскрыша (целик); 2 — угольный пласт; 3 — пропласток; 4 — отвал; 5 — почва нижнего угольного пласта; 6 — развал

Расчет двумерного температурного поля многолетнемерзлых горных пород карьера до и после буровзрывной отбойки, а также при отработке блока при нестационарном режиме сводится к решению системы дифференциальных уравнений теории теплопроводности [3]:

$$\left[ C(T, x, y) + L_1 W(x, y) \rho \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right];$$

$$C(T, x, y) = \begin{cases} c_1(x, y) \rho_1(x, y), & T < T^*; \\ c_2(x, y) \rho_2(x, y), & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T, x, y) = \begin{cases} \lambda_1(x, y), & T < T^*; \\ \lambda_2(x, y), & T > T^*; \end{cases}$$

$$x \in D_x, \quad y \in D_y, \quad t > 0,$$

где  $T$  — температура породы, °С;  $T^*$  — температура фазовых переходов влаги в породе, °С;  $t, x, y$  — временная (с) и пространственные координаты (м);  $L_1$  — скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг;  $W$  — влажность породы, доли единицы;  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1, \rho_1, \lambda_1$  ( $c_2, \rho_2, \lambda_2$ ) — удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород;  $\delta(T - T^*)$  — функция Дирака.

Начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y).$$

Граничные условия (рис. 2):

на  $ABCDEFGH$ :  $\lambda(T, x, y) (\partial T / \partial n) = \alpha(T(x, y, t) - T_{air}(t)) - Q_R(t) + L_2 E, \quad t > 0;$

на  $AP, HK$ :  $\partial T / \partial n = 0, \quad t > 0;$

на  $PK$ :  $\partial T / \partial n = T_e, \quad t > 0,$

где  $\alpha$  — коэффициент теплообмена воздуха с грунтом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q_R$  — тепловой поток от солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $L_2$  — удельная теплота испарения воды, Вт·с/кг;  $E$  — интенсивность испарения, равная плотности диффузионного потока влаги в атмосферу, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Годовой ход среднемесячной температуры воздуха  $T_{air}$  может быть аппроксимирован гармонической функцией, например косинусоидой [4]:

$$T_{air}(t) = A_a \cos(2\pi t / t_0 + \varepsilon) + T_{0,a}, \quad t > 0,$$

здесь  $A_a$  — годовая амплитуда колебаний температуры воздуха, °C;  $T_{0,a}$  — средняя годовая температура воздуха, °C;  $t$  — время;  $t_0$  — период колебаний равный одному году;  $\varepsilon$  — начальная фаза колебаний.

Коэффициент теплообмена  $\alpha$  атмосферного воздуха с поверхностью массива горных пород в зимний период зависит от толщины снежного покрова и определяется по формуле [5]:

$$\alpha = \left( \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} \right)^{-1},$$

где  $\delta_s$ ,  $\lambda_s$  — толщина (м) и коэффициент теплопроводности снега (Вт/(м·К));  $\alpha_0$  — эмпирический коэффициент конвективного теплообмена (Вт/(м<sup>2</sup>·К)), рассчитываемый по формуле [5]:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 6.16 + 4.19v, & 0 < v \leq 5; \\ 7.56v^{0.78}, & 5 < v \leq 30, \end{cases}$$

$v$  — скорость ветра, м/с.

Для расчета коэффициента теплообмена  $\alpha$  необходимы данные по месяцам о коэффициенте теплопроводности ( $\lambda_s$ ) и высоте ( $\delta_s$ ) снежного покрова. На основе большого объема экспериментальных материалов в работе [4] получены следующие осредненные зависимости для нахождения расчетных значений  $\lambda_s$ :

$$\lambda_s = \begin{cases} 1.165\rho_s, & T_s > -10^\circ\text{C}; \\ 1.035\rho_s, & -10^\circ\text{C} \geq T_s \geq -20^\circ\text{C}; \\ 0.907\rho_s, & T_s < -20^\circ\text{C}, \end{cases}$$

где  $T_s$ ,  $\rho_s$  — соответственно температура и плотность снежного покрова, г/см<sup>3</sup>.

Отметим, что плотность снега не является постоянной величиной и быстро меняется в период весеннего таяния: от 0.35 г/см<sup>3</sup> в начале, 0.45 — в середине и 0.6 г/см<sup>3</sup> — в конце снеготаяния. Расчет плотности снега проводится по формуле Э. Г. Коломыца [6]:

$$\rho_s = 0.182 + 0.18\delta_s.$$

Расчеты температурного режима массива многолетнемерзлых горных пород до и после взрывной отбойки выполнены методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы [7].

На основе разработанной программы для ПЭВМ проведены численные расчеты теплового режима уступа и развала горных пород карьера криолитозоны для условий Кангаласского бурогоугольного месторождения, расположенного на территории Якутского района Республики Саха (Якутия). На рис. 3–5 представлены изолинии температур в блоке вскрышных пород до и после взрывной отбойки для некоторых вариантов численных расчетов.

На рис. 3а приведены изолинии температур в блоке вскрышных пород до взрывной отбойки на 1 января. Температура воздуха  $t_v$  составляет  $-46.7^\circ\text{C}$ . Видно, что в целике уступа сформирована зона охлажденных горных пород  $t_n$ , равная  $-8^\circ\text{C}$ . Наличие более низких значений температур пород уступа в сравнении с естественной температурой массива подтверждается и натурными данными [8–10]. В зоне расположения угольного пласта температура пород  $t_{y,пл}$  находится в пределах от  $-3$  до  $-4^\circ\text{C}$  внутри массива и от  $-14$  до  $-35^\circ\text{C}$  со стороны склона.

На рис. 3б показаны изолинии температур в блоке вскрышных пород после взрывной отбойки 1 января. Видно, что вскрышные породы, слагающие нижнюю часть склона уступа, в результате действия взрыва (по схеме А. В. Гальянова) перемещаются вправо и заваливают склон усту-

па угольного пласта и дно карьера ( $x$  изменяется в диапазоне от 50 до 80 м,  $h$  — от 0 до 15 м), формируя переохлажденную область угольного пласта и взорванного массива. Согласно технологической схеме обработки блока Кангаласского бурогоугольного месторождения, вскрышные породы, перемещенные действием взрыва на дно карьера (на рис. 3б это область  $x$  от 50 до 60 м,  $h$  — от 0 до 15 м), являются нижней частью предотвала, который образуется при обработке вскрышного уступа, и в дальнейшем экскавируются драглайном в конечный контур отвала [10].

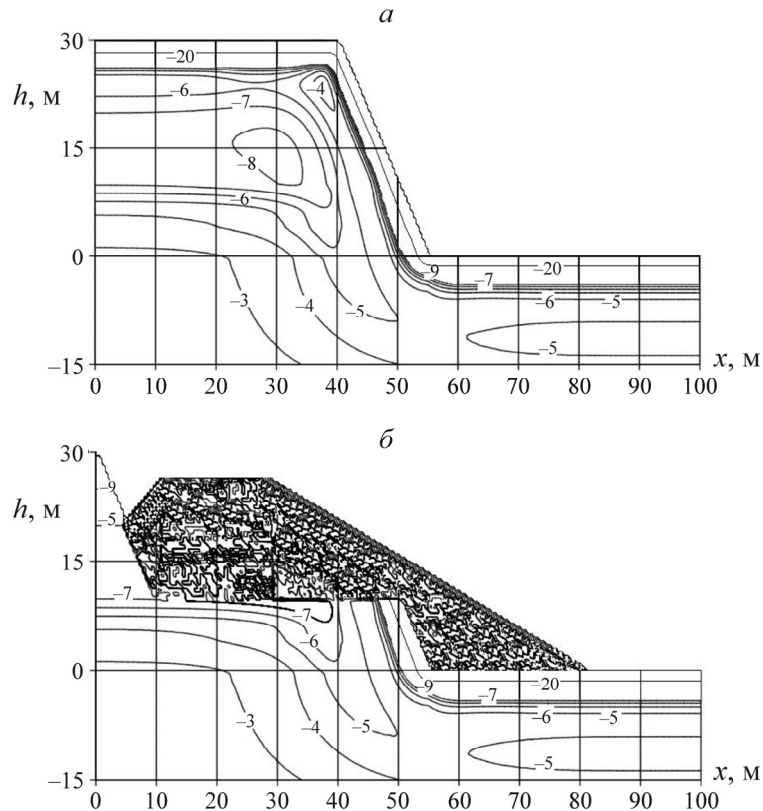


Рис. 3. Изолинии температур в блоке вскрышных пород на 1 января до взрывной отбойки (а) и после нее (б)

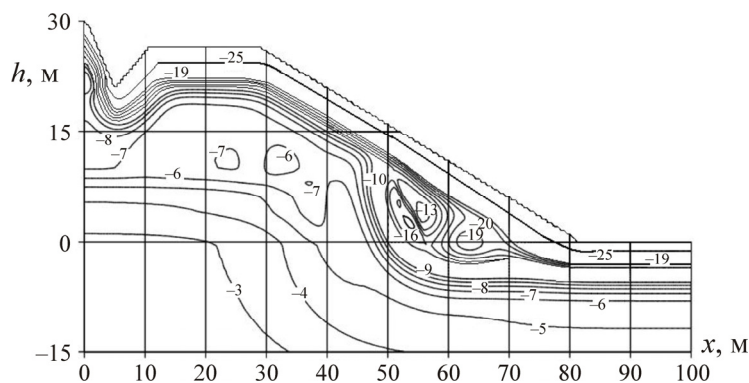


Рис. 4. Изолинии температур в блоке вскрышных пород на 1 февраля после взрывной отбойки 1 января

На рис. 4 представлены изолинии температур в блоке вскрышных пород через месяц после взрывной отбойки 1 января. Температура взорванных вскрышных пород над угольным пластом  $t_n$  в целом сохраняет среднее значение от  $-3$  до  $-4$  °С. Отмечено локальное понижение темпе-

ратуры взорванных пород вглубь массива в месте их сопряжения с уступом ( $x$  — от 5 до 10 м,  $h$  — от 15 до 20 м). Из вскрышных пород, на дне карьера попадающих в проектный контур предотвала ( $x$  — от 50 до 60 м,  $h$  — от 0 до 13 м), формируется зона устойчивых отрицательных температур ( $t_n$  изменяется от  $-7$  до  $-20^\circ\text{C}$ ), которая в условиях склонности пород к вторичному смерзанию может представлять трудность для экскавации драглайном.

Так же формируется зона устойчивых отрицательных температур в угольном пласте и породном пропластке ( $t_{y.пл}$  изменяется от  $-7$  до  $-16^\circ\text{C}$  со стороны склона), накрытыми сброшенной взрывом породой вскрышного уступа.

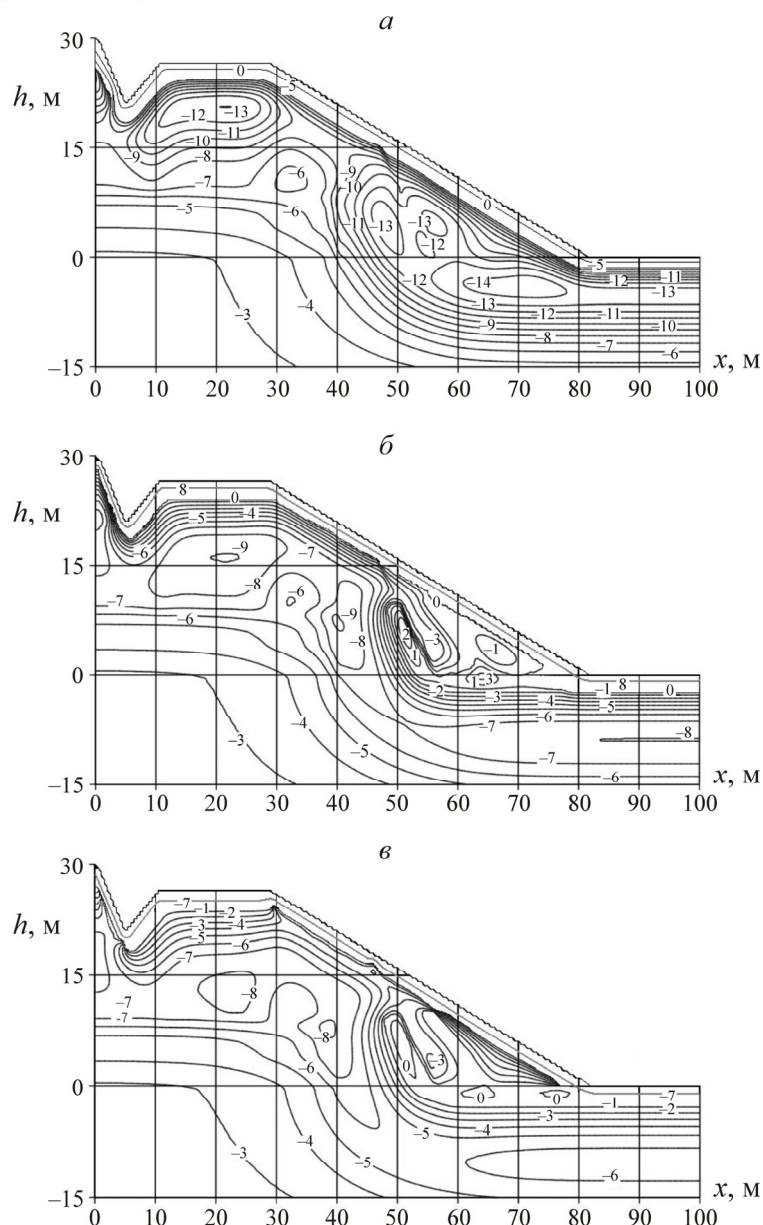


Рис. 5. Изолинии температур в блоке вскрышных пород через месяц после взрывной отбойки 1 мая (а), 1 августа (б), 1 октября (в)

Расчеты различных вариантов по времени проведения взрывных работ показали, что при взрывной отбойке в первой половине года, когда поверхностный слой пород вскрыши на глу-

бину до 2 м и более имеет температуру ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ , после взрыва и перемещения пород на дно карьера в контур предотвала здесь формируется зона низких отрицательных температур, которая сохраняется несколько месяцев.

При взрывной отбойке во второй половине года, когда поверхностный слой пород вскрыши прогревается под действием солнечной инсоляции и температуры атмосферного воздуха и имеет температуру выше  $0^{\circ}\text{C}$ , после взрыва и перемещения пород на дно карьера в контур предотвала здесь формируется зона устойчивых положительных температур, которая сохраняется достаточно долгое время.

На рис. 5 приведены изолинии температур в блоке вскрышных пород через месяц после взрывной отбойки 1 мая, 1 августа и 1 октября соответственно. Прослеживается четкая закономерность формирования температур вскрышных пород, перемещенных под действием взрыва на дно карьера в контур предотвала и в зоне сопряжения взорванных пород с вновь образованным уступом.

### ВЫВОДЫ

Как показывают расчеты, на формирование температурного поля во взорванном массиве горных пород оказывает влияние температурно-климатический период проведения взрывных работ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что схемы отработки взорванного массива драглайном могут различаться в различные периоды года.

Разработанная методика и математическая модель позволяют обосновать период эффективной работы драглайна, схему отработки развала взорванной горной массы, а также рациональные параметры бестранспортной разработки взорванной горной массы в различные периоды года в условиях месторождений области многолетней мерзлоты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курилко А. С., Каймонов М. В. К вопросу вторичного смерзания минерального сырья в процессе его добычи на рудниках Севера // ГИАБ. — 2005. — Региональное приложение Якутия. Вып. 3. — С. 290–297.
2. Гальянов А. В., Рождественский В. Н., Блинов А. Н. Трансформация структуры горных массивов при взрывных работах на карьерах. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. — 139 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 736 с.
4. Павлов А. В., Оловин Б. А. Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей. — Новосибирск: Наука, 1974. — 182 с.
5. Перльштейн Г. З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. — Новосибирск: Наука, 1979. — 304 с.
6. Гаврильев Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. — 146 с.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
8. Панишев С. В., Ермаков С. А., Каймонов М. В. Исследование влияния температурного режима взорванных многолетнемерзлых пород Кангаласского месторождения на производительность драглайна // ГИАБ. — 2010. — № 7. — С. 146–150.
9. Панишев С. В., Ермаков С. А. Влияние температурного режима на эффективность разработки вскрышных пород месторождений криолитозоны // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 132–138.
10. Панишев С. В., Ермаков С. А., Каймонов М. В., Козлов Д. С., Максимов М. С. Комплексный мониторинг температурного режима многолетнемерзлых горных пород Кангаласского угольного разреза // ГИАБ. — 2013. — № 9. — С. 62–69.

Поступила в редакцию 2/Х 2015