

## ПОДГОТОВКА МЕРЗЛЫХ ПОРОД К ВЫЕМКЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗАБАЙКАЛЬСКОМ КРАЕ

Ю.В. Субботин<sup>1</sup>, Ю.М. Овешников<sup>1</sup>, П.Б. Авдеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет, Чита, Россия, e-mail: ogr\_chitgu@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрены способы ускорения естественного солнечно-радиационного оттаивания мерзлых пород при разработке месторождений россыпного золота расположенных в Забайкальском крае. Разработана методика подготовки мерзлых горных пород к выемке, позволяющая с высокой точностью прогнозировать параметры оттаивания мерзлого массива. Представлены варианты использования тепловых ванн, в частности, применение соляного солнечного бассейна для подготовки мерзлых горных пород к выемке. Обосновано применение тепловых ванн с активацией теплообмена в придонном слое соляного солнечного бассейна, что позволяет значительно сократить потери тепловой энергии на дезинтеграцию мерзлых золотосодержащих песков и рыхлых отложений пород вскрыши за счет снижения испарения воды с поверхности, уменьшения диффузии в его слоях. Для снижения потерь тепловой энергии, поступающей в водоем за счет солнечной радиации, разработаны и запатентованы способы оттаивания мерзлых пород, сочетающие в себе использование тепловых ванн с известной фильтрационно-игловой оттайкой, позволяющие значительно сократить затраты на нагнетание воды через иглы в скважины и повысить скорость оттаивания мерзлых пород. Применение соляных солнечных нагревателей повышает скорость оттаивания мерзлых горных пород, увеличивает коэффициент использования солнечной энергии, сокращает сроки подготовки мерзлых горных пород к выемке и в целом снижает себестоимость добычи россыпного золота.

**Ключевые слова:** золотосодержащие россыпные месторождения, теплообмен, сезонно- и многолетнемерзлые породы, подготовка мерзлых горных пород к выемке, способы оттаивания мерзлых пород, соляной солнечный бассейн.

**Для цитирования:** Субботин Ю. В., Овешников Ю. М., Авдеев П. Б. Подготовка мерзлых пород к выемке при разработке россыпных месторождений в Забайкальском крае // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 3. – С. 125–133. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-125-133.

## Preparation of frozen rocks for excavation in placer mining in Transbaikalia region

Yu.V. Subbotin<sup>1</sup>, Yu.M. Oveshnikova<sup>1</sup>, P.B. Avdeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Transbaikalia State University, 6720300, Chita, Russia, e-mail: ogr\_chitgu@mail.ru

**Abstract:** The critical review of different methods for melting seasonally frozen and permafrost rocks is performed with presentation of advantages and disadvantages of natural solar radiation thawing. The ways of accelerating natural solar radiation thawing of frozen rocks during placer mining in severe climatic conditions of Transbaikalia are considered. Based on the implemented research, the procedure is developed for preparation of frozen rocks for excavation with high accuracy prediction of thawing parameters in frozen rock mass. Possible variants of using thermal bathtubs and,

© Ю.В. Субботин, Ю.М. Овешников, П.Б. Авдеев. 2019.

in particular, salt solar pool for preparation of frozen rocks for excavation are described. The operation principle of the salt solar pool is shown. The substantiation is provided for using thermal bathtubs with activation of heat exchange in the bottom layer of the salt solar pool, which allows considerable reduction in thermal energy loss in disintegration of frozen gold-bearing sands and loose overburden due to decreased evaporation of water from the pool surface and attenuated diffusion in its layers. Developed in order to lower loss of thermal energy from solar radiation, the patented methods of frozen rock thawing combine thermal bathtubs and needle–leakage thawing, which makes it possible to considerably cut down costs of water injection through needles to wells and to increase the rate of thawing of frozen rocks to 20 m/year. The implemented researches and calculations show that use of salt solar heaters accelerates thawing of frozen rocks, increases efficiency of solar energy up to 0.70–0.75, reduces period of preparing frozen rocks for excavation and in general brings down placer gold mining cost. The simulation modeling results prove usability and high efficiency salt solar pools as accumulators of thermal energy for activation of frozen rock thawing during placer gold mining by dredging or hydraulic excavation in Transbaikalia.

**Key words:** gold placer, heat exchange, seasonally frozen and permafrost rocks, preparation of frozen rocks for excavation, frozen rock thawing methods, salt solar pool.

**For citation:** Subbotin Yu. V., Ovshnikov Yu. M., Avdeev P. B. Preparation of frozen rocks for excavation in placer mining in Transbaikal region. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;3:125-133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-125-133.

Забайкальский край характеризуется суровым климатом и сложными горно-геологическими условиями разработки золотоносных россыпных месторождений. В связи с продолжительным зимним сезоном, незначительным снежным покровом и отрицательными среднегодовыми температурами атмосферного воздуха, глубина сезонного промерзания рыхлых отложений и золотоносных песков россыпей в северо-восточных районах Забайкалья достигает 4,0–5,0 м [5].

При фазовом переходе горных пород из талого в мерзлое состояние их теплофизические и механические свойства существенно изменяются. Они приобретают высокую прочность. Например, при понижении температуры пород до минус 1 °С их сопротивление резанию возрастает в 10–20 раз [8, 12].

Энергозатраты, необходимые для разрушения мерзлых пород, увеличиваются в 10–15 раз [10, 11].

Годовая производительность эксплуатируемых горных машин и оборудования снижается на 50–60%, а общие потери металла, разубоживание и себестоимость добычи золота возрастают в 2–3 раза [3,

9]. Поэтому без качественного проведения специальной подготовки мерзлых горных пород к выемке, разработка многолетне- и сезонномерзлых золотоносных россыпных месторождений Забайкальского края драгами, экскаваторами, бульдозерами и скреперами не эффективна или практически невозможна.

Из всего многообразия способов подготовки горных пород к выемке выделяют в основном: механическое рыхление; подготовку пород взрывом; оттайку мерзлых пород и предохранение оттаянных пород от сезонного промерзания [2, 4, 5].

При разработке мерзлых россыпей наименее затратным является оттаивание мерзлого массива. Причем для дезинтеграции и обеспечения фазового перехода горных пород из мерзлого в талое состояние используется, как правило, естественный источник энергии — солнечное тепло, т.к. более 60% территории России, включая районы Забайкальского края, характеризуются существенным среднегодовым поступлением солнечной энергии от 3,5 до 4,5 кВтч/м<sup>2</sup> в день [1, 7].

За счет естественного солнечно-радиационного оттаивания мерзлых по-

род ежегодно на горнодобывающих предприятиях России подготавливаются к выемке десятки миллионов кубометров горной массы. Однако естественная оттайка мерзлого массива, характеризуемая с одной стороны простотой и минимальной себестоимостью, с другой — имеет низкий коэффициент использования солнечной энергии и невысокую скорость перехода горных пород из мерзлого состояния в талое. Это обстоятельство затрудняет в сжатые сроки подготовить мерзлые породы для отработки, т.к. глубина солнечно-радиационного оттаивания в северо-восточных районах Забайкальского края за период года с положительными среднесуточными температурами атмосферного воздуха не превышает 2,2 м [11].

Повышение эффективности естественного оттаивания достигается за счет выполнения специальных инженерных мероприятий по регулированию теплового баланса — удаления снежного и растительного покрова, осушения горных пород, зачернения поверхности земли, проведения послойной вскрыши торфов и применения светопрозрачных пленочных покрытий. Например, при использовании полимерной пленки создается парниковый эффект, повышающий влажность породы, уменьшающий затраты тепла на испарение влаги с поверхности земли и обеспечивающий более мощный конвекционный поток тепла вглубь мерзлого массива. Применение полимерных пленок позволяет увеличить в 1,5 раза эффективность естественного солнечно-радиационного оттаивания мерзлых горных пород и ускорить время пуска драги в весенний период года на 1 месяц [3, 4, 12].

На практике при подготовке дражных полигонов успешно применяются и другие более интенсивные способы оттаивания мерзлых пород — фильтрационно-дренажный, игловая парооттайка, фильтрационно-игловой, дождевально-дренажный

и др. Однако эти способы характеризуются высокой себестоимостью и энергоемкостью [2, 11, 12].

При добыче драгоценного металла из россыпных месторождений, расположенных на севере и северо-востоке страны, и в частности в районах с неблагоприятным суровым климатом, например, в Забайкальском крае, их применение ограничено. Поэтому необходимо изыскание новых более экономичных способов оттайки.

На протяжении нескольких десятков лет сотрудниками кафедры открытых работ Забайкальского государственного университета под руководством д.т.н., проф. А.В. Рашкина выполнялись научно-исследовательские работы по изысканию путей интенсификации оттаивания мерзлых пород. За этот период нами был разработан, запатентован и апробирован в производственных условиях целый ряд новых, эффективных способов оттаивания мерзлых горных пород.

Одним из путей повышения эффективности солнечно-радиационной оттайки является применение тепловых ванн, создание которых требует минимальных трудозатрат на сооружение водоподпорных дамб. Однако, идеи тепловых ванн не нашли широкого практического применения из-за значительных потерь тепловой энергии в результате испарения воды с поверхности водоема и слоевой диффузии, под действием которой нагретые за счет солнечной радиации нижние слои воды, имея меньшую плотность, поднимаются к поверхности, а верхние — наоборот опускаются вниз, ко дну. Для снижения потерь тепловой энергии, поступающей в водоем за счет солнечной радиации, нами был разработан и запатентован способ оттаивания мерзлых пород сочетающий в себе использование тепловых ванн с известной фильтрационно-игловой оттайкой, позволяющий значительно сократить затраты на на-

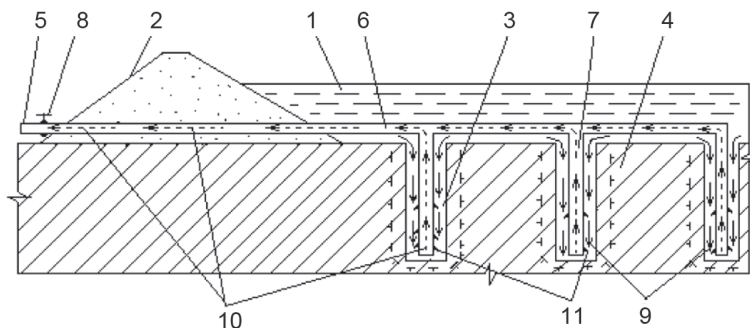


Рис. 1. Способ оттаивания мерзлых горных пород (патент 2295008 РФ): 1 — подогретая за счет солнечной энергии вода (теплоноситель); 2 — водоподпорная дамба; 3 — скважина; 4 — сезонно- и многолетнемерзлые породы; 5 — водосбросный патрубок; 6 — магистральный трубопровод; 7 — водозаборный патрубок; 8 — вентиль; 9 — направление движения теплоносителя; 10 — направление движения охлажденной воды; 11 — металлические пластины

Fig. 1. Frozen rock melting method (RF Patent No. 2295008): 1—solar energy-heated water (heat carrier); 2—water retention dam; 3—well; 4—seasonally frozen rocks and permafrost; 5—water discharge pipe; 6—main pipe line; 7—water intake pipe; 8—valve; 9—heat carrier flow direction; 10—cool water flow direction; 11—metal plates

гнетание воды через иглы в скважины и повысить скорость оттаивания мерзлых пород до 20 м/год (рис. 1).

При этом способе подача теплоносителя к мерзлым породам происходит за счет гравитации непосредственно по скважине, а охлажденная вода удаляется самотеком из забоя скважины по водозаборному патрубку. Ускорение оттаивания пород происходит за счет повышения кондуктивно-конвективной теплоотдачи солнечной энергии, аккумулярованной водой, мерзлым породам.

Общие затраты тепла на нагревание и оттаивание всего участка мерзлых пород ( $Q_{\text{общ}}$ , кДж/м<sup>3</sup>) определяются по формуле

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{YA}} \times S \times H_{\text{от}} \quad (1)$$

где  $S$  — площадь участка оттайки, м<sup>2</sup>;  $H_{\text{от}}$  — глубина оттаивания, м;  $Q_{\text{YA}}$  — удельные затраты энергии на нагревание и оттаивание 1 м<sup>3</sup> мерзлых пород, кДж/м<sup>3</sup> [2, 3]

$$Q_{\text{YA}} = c_n \times \rho_n [1 - (G/\rho_n)] (t_t - t_m) + G(-t_m \times c_n + t_t \times c_b + L) \quad (2)$$

где  $\rho_n$ ,  $\rho_n$  — соответственно плотность пород и льда, кг/м<sup>3</sup>;  $c_n$ ,  $c_n$ ,  $c_b$  — соответственно удельная теплоемкость пород, льда и

воды, кДж/(кг·°C);  $G$  — льдистость горных пород, кг/м<sup>3</sup>;  $t_t$ ,  $t_m$  — температуры талых и мерзлых пород, °C;  $L$  — скрытая теплота плавления льда, равная 334 кДж/кг.

Время оттаивания мерзлых пород затопленного участка ( $T$ , сут.) определяется по формуле

$$T = 0,866 \times b^2 \times H_{\text{от}} \times Q_{\text{YA}} / (24 \times c_b \times \rho_b \times W \times K_6 \times t_b) \quad (3)$$

где  $b$  — расстояние между скважинами в ряду, м;  $c_b$  — удельная теплоемкость воды,  $c_b = 4,187$  кДж/(кг·°C),  $\rho_b = 1000$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воды;  $W$  — расход воды на выходе водосбросного патрубка, м<sup>3</sup>/ч;  $K_6$  — средний коэффициент относительной боковой теплоотдачи воды нисходящего фильтрационного потока в талике цилиндрической формы,  $K_6 = 0,4-0,5$ ;  $t_b$  — температура воды на затопленном участке, °C.

При соблюдении технологии ведения открытых работ и расхода воды от 0,5 до 2,5 м<sup>3</sup>/ч скорость оттаивания мерзлых пород достигает 10–20 м за сезон.

Применение тепловых ванн с активацией теплообмена в придонном слое соляного солнечного бассейна (ССБ) позволяет значительно сократить потери теп-

ловой энергии за счет снижения испарения воды с поверхности, уменьшения диффузии в его слоях и повысить коэффициент использования солнечной энергии до 0,70–0,75 [3, 4].

ССБ — это водоем глубиной 1–2 м с концентрированным рассолом в придонном слое. Для его создания сооружают водоподпорную плотину или дамбу (рис. 2).

Мерзлые горные породы оттаиваемого участка, предварительно покрытого слоем черной полиэтиленовой пленки, заливают слоями водных растворов соли (более двух слоев) со ступенчатым понижением ее концентрации от нижних слоев к верхним [5].

В нижней, придонной, части бассейна размещают слой рассола с максимальной концентрацией реагента в воде, вышерасположенный изолирующий слой, а он может быть представлен несколькими прослойками, заполняют водным раствором с повышающейся к низу концентрацией. Верхний слой соляного солнечного бассейна заполняется пресной водой с нулевой концентрацией реагента.

Принцип работы соляного солнечного бассейна — аккумуляция тепловой солнечной энергии слоями водных

растворов солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  или технической соли магния  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Благодаря созданию в водоеме вертикального градиента плотности возникает температурный градиент, способствующий повышению температуры рассола в придонном слое. В процессе преобразования солнечной энергии в тепловую к.п.д. соляного солнечного бассейна значительно снижается за счет процесса испарения воды с поверхности водоема. При этом потери энергии в 1,5–2 раза выше общих потерь энергии, теряемых водоемом за счет теплообмена с окружающей средой. Поэтому для снижения испарения воды на поверхность водоема наносится тонкий молекулярный слой технического масла.

Снижение энергозатрат тепла на конвективный перенос и испарение дает возможность значительно повысить температуру массива мерзлых горных пород, увеличить скорость оттаивания и в целом усилить теплотехнический эффект соляного солнечного бассейна в 1,5–2 раза. Для снижения тепловых потерь за счет диффузии в отдельно взятом слое и на контакте между слоями толщина одного слоя принимается минимально возможной (от 0,20 до 0,35 м). Сум-

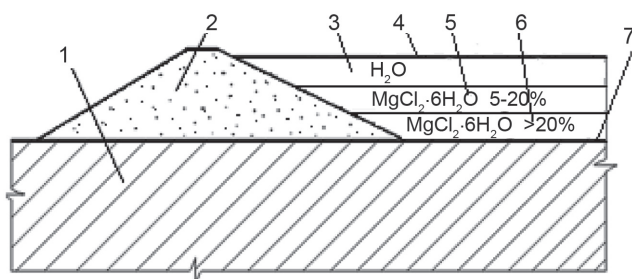


Рис. 2. Способ оттаивания мерзлых горных пород и грунтов (патент 2376236 РФ): 1 — мерзлые горные породы; 2 — водоподпорная плотина; 3 — слой пресной воды; 4 — тонкий слой технического масла; 5 — изолирующий (градиентный) слой с увеличивающейся книзу концентрацией водного раствора технической соли магния; 6 — слой горячего рассола с максимальной концентрацией; 7 — зачерненное дно водоема

Fig. 2. Method of melting frozen rocks and soil (RF Patent No. 2376236): 1—frozen rocks; 2—water retention dam; 3—fresh water layer; 4—thin layer of industrial oil; 5— isolation (gradient) layer with downward growing concentration of magnesium chloride solution; 6—layer of maximum-concentration hot brine; 7—blackened bottom of water body

марная мощность (толщина) всех слоев соляного солнечного бассейна не должна превышать 1,0–2,0 м.

Селективно прозрачные для коротковолнового и длинноволнового излучений водные растворы солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  практически полностью пропускают поглощаемую поверхностью оттаиваемых горных пород коротковолновую солнечную радиацию и вместе с тем задерживают длинноволновое излучение от поверхности оттаиваемых горных пород. Поэтому техническим результатом применения соляного солнечного бассейна является повышение скорости оттаивания мерзлых горных пород, которое происходит за счет повышения температуры придонного слоя под действием солнечной радиации. Физической основой повышения температуры воды вблизи дна бассейна является подавление конвекции, т.к. известно, что пресная вода по мере нагрева под действием архимедовой силы всплывает вверх, а ее место замещает холодная. Устанавливается непрерывный процесс конвекции с переносом теплоты от нагретого солнцем дна вверх [1, 5, 6].

В соляном солнечном бассейне тепловой конвекции не происходит, потому что у крутосоленого рассола, находящегося у дна, по мере нагрева плотность повышается из-за роста растворимости соли и этот эффект пересиливает действие расширения жидкости. Следовательно, при нагреве придонного слоя кристаллы соли быстрее переходят в рассол, увеличивая его плотность.

По результатам исследований новозеландских ученых К. Уэллмана и А. Уилсона озеро Ванда (Антарктида) прогревается за счет лучистой энергии Солнца до самого дна на глубину 70 м через прозрачный лед толщиной 4 м. Температура воды у дна составляет  $27^\circ\text{C}$ , что на  $47^\circ\text{C}$  больше среднегодовой температуры атмосферного воздуха. Коротковолновая солнечная радиация практически беспрепятственно проникает через очень прозрачный лед, воду и нагревает дно. От дна отражается уже длинноволновая радиация, которая поглощается водой, нагревая ее [1, 7].

На кафедре открытых горных работ Забайкальского государственного университета создана модель соляного сол-

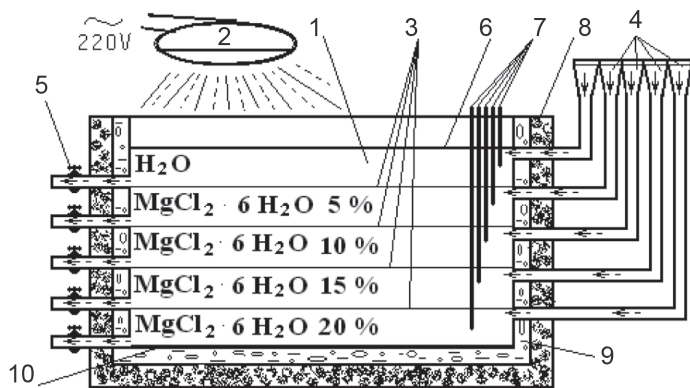


Рис. 3. Модель соляного солнечного бассейна: 1 — слой воды; 2 — светильник; 3 — тонкие пластины перфорированного оргстекла; 4 — воронки для подачи водных растворов технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  с различной концентрацией; 5 — вентиль; 6 — пленка специального масла; 7 — термометры; 8 — теплоизолятор (пенопласт толщиной 0,08 м); 9 — емкость ССБ; 10 — зачерненное дно

Fig. 3. Model of salt and solar pool (SSP): 1—water layer; 2—illuminant; 3—thin perforated organic glass plates; 4—feed funnels for different concentration  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  solution; 5—valve; 6—special oil film; 7—thermometer; 8—thermal insulant (foam plastic 0.08 m thick); 9—SSP reservoir; 10—blackened bottom

нечного бассейна с зачерненным дном (рис. 3) [3, 4].

Модель соляного солнечного бассейна представляет собой емкость, выполненную из органического стекла высотой 0,3 м, длиной 0,5 м, шириной 0,3 м, заполненную пятью слоями водного раствора технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  различной концентрации, но одинаковой толщины равной 0,05 м. Верхний слой модели заполнялся чистой водой. Общая глубина ССБ составляет 0,25 м.

Концентрация водного раствора технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  в каждом слое сохранялась постоянной. Придонный слой соляного солнечного бассейна заполняли раствором технической соли магния 20% концентрации. В вышерасположенных слоях концентрация раствора изменялась ступенчато с шагом 5%. Слои водных растворов технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  разделяли тонким перфорированным оргстеклом.

В опытах были использованы светильники с люминесцентными лампами типа ЛБУ, лампой накаливания и ксеноновой короткодуговой — типа ДКсТВ-6000.

В процессе опытов применялись стандартные методика и приборы: температура воды и раствора в каждом слое на глубине 0,05 м, 0,10 м, 0,15 м, 0,20 м, 0,25 м измерялась ртутными термометрами, температура воздуха — термографом М-16. Самую высокую температуру в процессе нагревания ССБ приобретает нижний придонный слой раствора, т.к. лучистая энергия поглощается зачерненным дном и передается в жидкость нижнему слою. За 12 ч работы ксеноновой короткодуговой лампы ДКсТВ-6000 температура придонного слоя водного раствора технической соли магния  $6\text{H}_2\text{O} \cdot \text{MgCl}_2$  увеличилась на 38–40 °С. При этом ее абсолютное значение в придонном слое ССБ достигло 50–60 °С (рис. 4).

Корреляционный анализ выполненных исследований позволил установить

корреляционные связи и подобрать функцию изменения температуры придонного слоя ССБ в зависимости от времени нагревания и вида применяемого источника излучения тепловой энергии (таблица).

Данное регрессионная зависимость имеет высокую степень надежности (аппроксимации): коэффициенты корреляции более 0,91, а стандартные отклонения — доверительные границы (по Стьюденту с вероятностью  $P = 0,95$ ) не превышают  $\pm 3$ . Результаты проведенных опытов подтверждают возможность и высокую эффективность применения соляного солнечного бассейна как аккумулятора тепловой энергии, которая может быть использована для оттаивания мерзлых пород при разработке золотоносных россыпных месторождений.

Анализ методов решения задач оттаивания-промерзания горных пород показывает, что для оценки способов оттаивания с применением соляного солнечного бассейна приемлемы аналитические решения задачи Стефана на основе при-

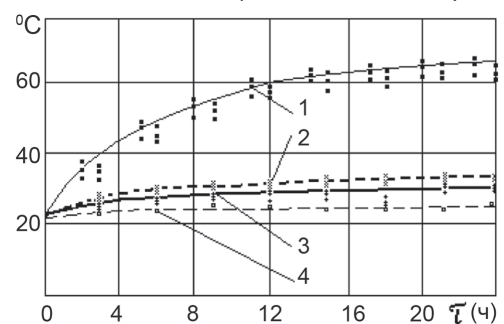


Рис. 4. Изменение температуры придонного слоя ССБ и атмосферного воздуха: 1, 2, 3 — температура придонного слоя при нагревании ССБ соответственно ксеноновой короткодуговой лампы ДКсТВ-6000; лампой накаливания мощностью 250 Вт; светильником с люминесцентными лампами ЛБУ; 4 — температура атмосферного воздуха

Fig. 4. Variation in temperature of SSP bottom layer and atmospheric air: 1, 2, 3—bottom layer temperature under SSP heating by, respectively, xenon short-arc lamp DKsTV-600, 250 W filament lamp, illuminant with LBU luminescent lamps; 4—temperature of atmospheric air

**Коэффициенты функций парной корреляции температуры придонного слоя соляного солнечного бассейна**

*Coefficients of pair correlation functions for bottom layer temperature of salt and solar pool*

Вид применяемого источника тепловой энергии, регрессионная зависимость	Коэффициент корреляции	Погрешность аппроксимации	Коэффициенты регрессии	
			A	B
Ксеноновая лампа	0,96	± 2,96	23,63	13,21
Лампа накаливания	0,93	± 1,35	21,29	4,68
Люминесцентная лампа $t = A + B \cdot \lg(\tau)$	0,91	± 1,11	22,40	3,09

лиженных методов, а также численные решения с использованием конечно-разностных методов и методы математического моделирования.

Скорость оттаивания мерзлых пород ( $\xi$ , м/сут) при использовании соляного солнечного бассейна в основном зависит от температуры придонного слоя раствора и воздуха, льдистости горных пород и периода оттайки

$$\xi = \delta \sqrt{\frac{2 \times \lambda_{\tau} \times t_n \times \tau \times K}{Q_{\phi}}} \quad (4)$$

где  $\delta$  — коэффициент, учитывающий замедление скорости сезонного оттаивания пород из-за оттока тепла в мерзлый грунт, изменяется от 0,6 до 1,0;  $\lambda_{\tau}$  — коэффициент теплопроводности талых пород, Вт/(м · °С);  $t_n$  — температура придонного слоя соляного солнечного бассейна, °С;  $\tau$  — период оттаивания, сут;

$K$  — коэффициент учитывающий неоднородность рыхлых отложений;  $Q_{\phi}$  — тепло фазового перехода, Дж/м<sup>3</sup>

$$Q_{\phi} = 93 \times G \quad (5)$$

где  $G$  — льдистость горных пород, кг/м<sup>3</sup>.

Аналитические расчеты показали, что при температуре придонного слоя 50–60 °С скорость оттаивания мерзлых пород достигает 10–15 м/год. Применение тепловых ванн в совокупности с фильтрационно-игловой оттайкой, а также использование соляного солнечного бассейна позволит существенно уменьшить тепловые потери солнечной энергии на дезинтеграцию мерзлых золотоносных песков и рыхлых отложений пород вскрыши, сократить сроки подготовки мерзлых горных пород к выемке и в целом снизить себестоимость добычи россыпного золота дражным и гидромеханизированным способами в Забайкальском крае.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осадчий Г. Б.* Солнечная энергия, ее производные и технологии их использования (Введение в энергетику ВИЭ). — Омск: ИПК *Макшеевой Е. А.*, 2010. — 572 с.
2. *Потемкин С. В.* Оттайка мерзлых пород. — М.: Недра, 1991. — 160 с.
3. *Рашкин А. В., Авдеев П. Б., Субботин Ю. В.* Тепловая и водная подготовка горных пород при разработке мерзлых россыпей. — М.: Изд-во «Горная книга», 2004. — 353 с.
4. *Субботин Ю. В., Овешников Ю. М.* Новые технологии и способы оттаивания сезонных и многолетнемерзлых пород // Горный журнал. — 2011. — № 4. — С. 85–89.
5. *Субботин Ю. В., Овешников Ю. М., Корешков С. В.* Повышение эффективности дражной разработки россыпи «Средняя Борзя» путем применения нового способа оттайки горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 5. — С. 67–73.
6. *Усманов Ю. У., Елисеев В. Н., Умаров Г. Я.* Экспериментальные исследования процесса теплосъема из соляного солнечного бассейна // Гелиотехника. — 1973. — № 6. — С. 23–26.
7. *Янтовский Е. И.* Потоки энергии и эксергии. — М.: Наука, 1988. — 144 с.
8. *Dumas M. C.* Electrical resistivity and dielectric constant of frozen rocks. — Colorado School of Mines, 2016.
9. *Kodama J. et al.* The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013, Vol. 62, pp. 1–13.



10. Krautblatter M., Funk D., Gunzel F.K. Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space // *Earth Surface Processes and Land-forms*. 2013, Vol. 38, no 8, pp. 876–887.

11. Rashkin A.V., Subbotin Yu.V., Avdeyev P.B. Thermophysical and ecologo-economical effectiveness of Hydraulic-Blast and Hydro-Burst Methods of Frozen Soil Thawing / *Geocryological problems of construction in Eastern Russia and Northern China*. Yakutsk, 1998, pp. 38–41.

12. Rashkin A.V., Subbotin Yu.V. Permafrost placer mining // *Russian mining*. 2004, no 5, pp. 19–24. **IVAB**

## REFERENCES

1. Osadchiy G.B. *Solnechnaya energiya, ee proizvodnye i tekhnologii ikh ispol'zovaniya (Vvedenie v energetiku VIE)* [Solar energy and its derivatives and technologies of using (Introduction to power of RES)], Omsk, IPK Maksheevoy E. A., 2010, 572 p.

2. Potemkin S.V. *Ottayka merzlykh porod* [Frozen rocks thawing], Moscow, Nedra, 1991, 160 p.

3. Rashkin A.V., Avdeev P.B., Subbotin Yu.V. *Teplovaya i vodnaya podgotovka gornyx porod pri razrabotke merzlykh rossypey* [Thermal and water preparation of rocks at developing frozen gravel deposit], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2004, 353 p.

4. Subbotin Yu.V., Oveshnikov Yu.M. New technologies and ways of thawing of seasonal and permafrost rocks. *Gornyy zhurnal*. 2011, no 4, pp. 85–89. [In Russ].

5. Subbotin Yu.V., Oveshnikov Yu.M., Koreshkov S.V. Increase in efficiency of gold gravel deposit Srednaya Borzha by application of a new way of an thawing of rocks. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 5, pp. 67–73. [In Russ].

6. Usmanov Yu.U., Eliseev V.N., Umarov G.Ya. Pilot studies of process of heat removal of the salt solar pool. *Geliotekhnika*. 1973, no 6, pp. 23–26. [In Russ].

7. Yantovskiy E.I. *Potoki energii i eksergii* [Energy and exergy streams], Moscow, Nauka, 1988, 144 p.

8. Dumas M.C. *Electrical resistivity and dielectric constant of frozen rocks*. Colorado School of Mines, 2016.

9. Kodama J. et al. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, Vol. 62, pp. 1–13.

10. Krautblatter M., Funk D., Gunzel F.K. Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Land-forms*. 2013, Vol. 38, no 8, pp. 876–887.

11. Rashkin A.V., Subbotin Yu.V., Avdeyev P.B. Thermophysical and ecologo-economical effectiveness of Hydraulic-Blast and Hydro-Burst Methods of Frozen Soil Thawing. *Geocryological problems of construction in Eastern Russia and Northern China*. Yakutsk, 1998, pp. 38–41.

12. Rashkin A.V., Subbotin Yu.V. Permafrost placer mining. *Russian mining*. 2004, no 5, pp. 19–24.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Субботин Юрий Викторович<sup>1</sup> — доктор технических наук, доцент, профессор,  
Овешников Юрий Михайлович<sup>1</sup> — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой,  
Авдеев Павел Борисович<sup>1</sup> — доктор технических наук, профессор,  
декан горного факультета,

<sup>1</sup> Забайкальский государственный университет,

Для контактов: Субботин Ю.В., e-mail: ogr\_chitgu@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.V. Subbotin<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor,

Yu.M. Oveshnikov<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair,

P.B. Avdeev<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Mining Faculty,

<sup>1</sup> Transbaikal State University, 6720300, Chita, Russia,

Corresponding author: Yu.V. Subbotin, e-mail: ogr\_chitgu@mail.ru.