

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139

DOI: 10.15372/KZ20210203

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
В СВЯЗИ С МЕХАНИЗМОМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СДВИЖКИ****Я.Б. Горелик<sup>1</sup>, А.Х. Хабитов<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; gorelik@ikz.ru*<sup>2</sup> *ПАО “Гипротюменнефтегаз”, 625000, Тюмень, ул. Республики, 62, Россия; prof.power@yandex.ru*

Выполнен анализ эффективности поверхностных способов охлаждения мерзлых грунтов на основе общетеоретических представлений о формировании температурной сдвижки при сезонных процессах в верхних слоях мерзлого грунта. По результатам анализа предложен способ охлаждения основания сооружения с проветриваемым подпольем, включающий слой теплоизоляции на поверхности грунта и естественно-конвективную охлаждающую систему с горизонтальным испарителем, трубы которого укладываются под теплоизоляционный слой. Конденсатор охлаждающей системы вынесен за пределы контура сооружения и в зимнее время обеспечивает температуру испарителя, близкую к температуре воздуха, независимо от условий внутри подполья. Методами математического моделирования показано, что предлагаемый способ обеспечивает значительное и быстрое понижение температуры в основании по сравнению с известными способами – на 1.0–2.5 °С за время не более 1.5 года вместо 3–5 лет. К испарителю системы временно, в течение одного летнего сезона, может быть подключен агрегат принудительного охлаждения, что позволяет получить дополнительное понижение температуры на 1.5 °С. Результаты расчетов позволяют предложить наилучшую последовательность подключения охлаждающих элементов системы на начальном этапе ее работы.

*Мерзлые грунты, слой сезонного оттаивания, температурный режим грунта, теплоизоляционный слой, система охлаждения “ГЕТ”, принудительное охлаждение, время релаксации к проектному температурному режиму*

**AFFECTIVITY OF SURFACE COOLING OF FROZEN GROUND IN CONNECTION  
WITH MECHANISM OF TEMPERATURE SHIFT FORMATION****J.B. Gorelik<sup>1</sup>, A.K. Khabitov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; gorelik@ikz.ru*<sup>2</sup> *Giprotymenneftegaz, Respubliki str. 62, Tyumen, 625000, Russia; prof.power@yandex.ru*

The analysis of affectivity of frozen soils surface cooling methods based on the theoretical understanding of temperature shift formation with seasonal processes in the upper ground layers is provided. The surface cooling method for the building with aerated underfloor space is suggested on the base of this analysis. This method includes heat-insulation layer ground surface and free convection cooling system with its horizontal evaporator under insulation layer. Condenser of the cooling system is out of the building contour and it makes evaporator temperature near to winter air temperature. The results of mathematical modelling demonstrate that suggested method provides a significant and rapid decrease of the ground temperature as compared to other methods (up to 1.0–2.5 °C for not more than 1.5 year instead of 3–5 years). An additional temperature decrease by 1.5 °C may be obtained by connecting of the forced cooling device to the cooling system for one summer season. The calculation results allow us to propose the best sequence for connecting the cooling elements of the system at the initial stage of its operation.

*Frozen soils, seasonal thawing layer, ground temperature regime, heat-insulation layer, GET cooling system, forced cooling, relaxation time to project temperature regime*

**ВВЕДЕНИЕ**

Регулирование температурного режима оснований сооружений, его стабилизация и восстановление широко применяются при строительстве и эксплуатации сооружений, а также при проведении ремонтных работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Техническая реализация этих мероприятий связана, как прави-

ло, с применением различного рода охлаждающих устройств. Части конструкций большинства из них (например, термостабилизаторов вертикальных и наклонных сезонного действия) для обеспечения работоспособности должны быть заглублены в грунтовое основание. Обеспечивая высокую эффективность работы, это существенно увеличи-

вает трудоемкость выполнения мероприятий, поскольку требует проведения буровых работ, которые часто приходится выполнять вручную на предварительно подготовленном свайном поле [Системы..., 2014].

Альтернативные способы поверхностного охлаждения грунта применяются на практике также достаточно давно. Наиболее важным из них является способ, основанный на применении вентрируемого подполья, который до сих пор считается главным для обеспечения проектного температурного режима оснований зданий и площадных сооружений, возводимых по I принципу, и для его поддержания в процессе эксплуатации. Однако возможности его применения зачастую оказываются недостаточными для достижения необходимых температур. Например, для открытых подполий высока вероятность снегонакопления на поверхности грунта в зимнее время, что влечет соответствующее снижение эффективности охлаждения. Для подполий с пониженным модулем вентилирования (с продухами в ограждающих конструкциях) эффективность охлаждения снижается вследствие уменьшения скорости тока воздуха, а также его нагрева от сантехнических коммуникаций и тепловыделений от перекрытия. Помимо уменьшения степени охлаждения, это приводит к увеличению времени достижения требуемого температурного режима основания [Вялов и др., 1979].

Для интенсификации процесса охлаждения грунтов с поверхности были предложены так называемые поверхностные теплопроводящие покрытия, конструкция которых обеспечивает асимметричный теплообмен через поверхность грунта в течение года: повышенный теплоотвод от основания зимой и существенное снижение теплоподвода к основанию летом [Макаров, 1985; Бубело, 2003]. Однако они не дали ожидаемого эффекта, вероятно потому, что на верхней поверхности этих устройств остаются действующими те же негативные факторы, что и на поверхности грунта в подполье.

Вместе с тем нетрудно заметить, что ни один из известных в настоящее время способов поверхностного охлаждения не исключает процессов сезонного промерзания–протаивания, и, следовательно, перспективы развития данных способов могут быть охарактеризованы путем оценки экстремальных значений температурной сдвижки [Достовалов, Кудрявцев, 1967; Основы..., 1974], возникающей при применении этой группы мероприятий. Как известно, важным параметром, определяющим величину и динамику изменения температурного режима в грунтовом массиве под действием поверхностных факторов, а также величину температурной сдвижки при заданной среднегодовой температуре поверхности грунта, явля-

ется среднегодовая температура на подошве деятельного слоя. Трудность анализа эффективности поверхностных способов охлаждения заключается в том, что вплоть до недавнего времени отсутствовали простые и в то же время обладающие достаточной общностью модели механизма формирования температурной сдвижки, позволяющие в простых аналитических выражениях получать оценки необходимых расчетных величин в зависимости от основной группы влияющих факторов. Такая модель предложена недавно в работе [Горелик, Земеров, 2020]. Прежде всего полезно будет рассмотреть простые оценки и выводы, получаемые на основе результатов этой работы в отношении эффективности поверхностных способов охлаждения.

#### Основные соотношения для динамики температуры в простейшей модели мерзлого основания

В качестве простейшей физической модели мерзлого основания предложен слой мерзлого грунта конечной толщины [Горелик, Земеров, 2020]. Это дает возможность при анализе сезонных процессов использовать квазистационарные соотношения для распределения температуры не только со стороны талой зоны (как это делалось ранее [Балобаев, 1964; Порхаев, 1970; Фельдман, 1977; Шур, 1988]), но и со стороны мерзлого основания. Такой подход позволяет получить достаточно простое выражение для среднегодовой температуры на подошве слоя сезонного оттаивания  $t_m$  [Горелик, Земеров, 2020] в следующем виде (эта величина формирует температуру грунта во всей толще ММГ ниже слоя сезонного оттаивания):

$$t_m = t_w \tau_w + t_s \tau_s \frac{\lambda_u}{\lambda_f}. \quad (1)$$

Здесь и далее:  $t_s, t_w, t_y$  – среднелетняя, средnezимняя и среднегодовая температура поверхности грунта под покровами любой природы, °C;  $\tau_s, \tau_w$  – относительная продолжительность периодов года с положительной и отрицательной среднесуточными температурами воздуха, д.е.;  $\lambda_u, \lambda_f$  – коэффициенты теплопроводности грунта в талом и мерзлом состояниях, Вт/(м·°C).

Указанные выше температуры поверхности, вообще говоря, должны быть установлены расчетом теплообмена поверхности грунта с атмосферным воздухом при заданных характеристиках почвенного покрова. Однако в некоторых случаях они могут быть оценены по своим экстремальным значениям. В соотношении (1) первое слагаемое отрицательное, второе – положительное. Соотношение (1) показывает, что температурная сдвижка  $\Delta t = t_m - t_y$  зависит как от теплофизических характеристик грунта, так и от климатических параметров заданного района, а также устанавливает характер этой зависимости. По-видимому, в более

ранних работах не акцентируется внимание на роли климатических факторов (хотя отмечается влияние разницы коэффициентов  $\lambda_u$  и  $\lambda_f$  [Достовалов, Кудрявцев, 1967; Основы..., 1974]), поскольку они остаются практически постоянными для значительных территорий, привязанных к конкретной метеостанции, в то время как свойства грунтов в ее пределах подвержены более резким изменениям. Однако с точки зрения инженерной геокриологии важны зависимость величины  $t_m$  от всей группы влияющих факторов, а также то, что каждый из параметров, входящих в соотношение (1), может быть изменен в пределах конкретной строительной площадки техническими средствами.

В частном случае, когда  $t_s = -t_w$ ,  $\tau_s = \tau_w = 1/2$  (либо  $t_y = 0$ ), выражение (1) переходит в следующее:

$$t_m = -\frac{t_e}{2} \left( 1 - \frac{\lambda_u}{\lambda_f} \right),$$

что дает зависимость от отношения коэффициентов теплопроводности грунта.

В соответствии с предложенной ранее методологией [Горелик, Паздерин, 2017] направленность изменения температуры мерзлого массива (ниже подошвы слоя сезонного оттаивания до глубины нулевых годовых амплитуд) устанавливается по отношению к начальному состоянию, которое определяется эмпирически на стадии инженерных изысканий по двум параметрам: глубине слоя сезонного оттаивания ( $\xi_m$ ) и температуре на глубине нулевых годовых амплитуд ( $t_0$ ).

При выводе соотношения, определяющего время формирования нового температурного режима, предполагается, что с началом использования технического способа поверхностного охлаждения

удовлетворяются условия теплообмена наружного воздуха с поверхностью массива изменяются достаточно быстро (скачкообразно). С учетом этого время формирования нового температурного режима  $\tau_f$  (характеризуемого температурой  $t_f$  на глубине нулевых годовых амплитуд  $z_0$ ) при действии изменившегося поверхностного фактора определяется соотношениями [Горелик, Земеров, 2020]:

$$\tau_f = \frac{z_0^2}{12\mu_f (1 - \sqrt{1-n})^2}, \quad n = \left| \frac{\delta t_{mf}}{\Delta t_{0m}} \right|, \quad (2)$$

$$\Delta t_{0m} = t_0 - t_m, \quad \delta t_{mf} = t_f - t_m.$$

Здесь  $\mu_f$  – температуропроводность мерзлого грунта;  $t_m$  определяется соотношением (1). Важно, что на глубине нулевых годовых амплитуд значение температуры  $t_m$  достигается в асимптотическом пределе бесконечного интервала времени, в то время как на подошве слоя сезонного протаивания она устанавливается уже в первый год после изменения условий на поверхности грунтового массива [Фельдман, 1977; Горелик, Земеров, 2020]. Величина  $\delta t_{mf}$  есть отклонение текущего значения температуры  $t_f$  (соответствующее моменту времени  $\tau_f$ ) от асимптотического значения  $t_m$ . Если с помощью первого из соотношений (2) выразить температуру  $t_f$  через время  $\tau_f$ , то можно также оценить динамику температуры на глубине  $z_0$  в течение срока эксплуатации сооружения.

Параметр  $n$  показывает степень приближения температуры к новому равновесному состоянию. При  $n = 0$  это состояние точно соответствует температуре  $t_m$ , но время его достижения равно бесконечности. При  $n = 1$  температура на глубине  $z_0$  только начинает изменяться, и время достижения этого момента совпадает со временем достижения радиусом теплового влияния глубины  $z_0$ . Принимая  $z_0 = 10$  м, получим зависимость времени  $\tau_f$  от параметра  $n$  (рис. 1). В частности, при  $n = 0.3$  получим  $\tau_f = 10.4$  года, при  $n = 0.5$  имеем  $\tau_f = 3.2$  года. Характерным можно принять значение  $n = 0.4-0.5$ , показывающее, что близость промежуточного состояния температуры (определяемого параметром  $\delta t_{mf}$ ) к новому стабильному соответствует примерно половине максимальной длины полного интервала изменений температуры (от значения  $t_0$  до  $t_m$ ). То есть  $\delta t_{mf} \approx (0.4-0.5)\Delta t_{0m}$ , и такое изменение происходит в течение 3–5 лет. Это соответствует скорости обычно наблюдаемых процессов [Вялов и др., 1979; Хрусталева, Никифоров, 1990]. Важной здесь является зависимость времени  $\tau_f$  от проектной (требуемой) температуры  $t_f$  и ее предельные значения  $t_0$  и  $t_m$ . Нетрудно видеть, что понижение величины  $t_m$  при фиксированных двух остальных параметрах приближает величину  $n$  к единице, а величина  $\tau_f$  при этом быстро снижается.

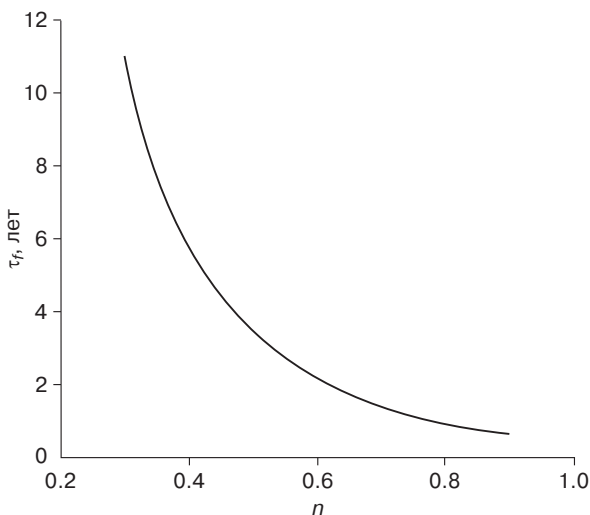


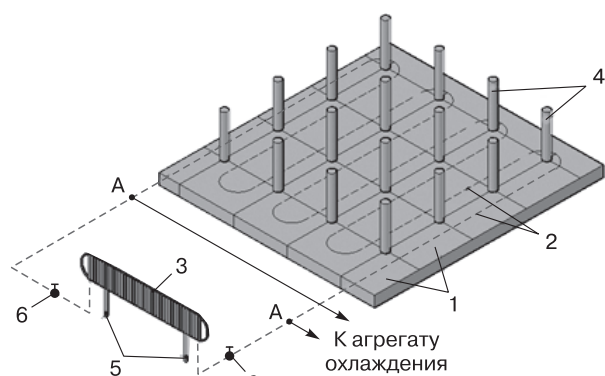
Рис. 1. Зависимость времени приближения  $\tau_f$  к новому температурному состоянию от параметра приближения  $n$ .

### Оценка эффективности предлагаемого способа охлаждения основания

Нетрудно убедиться, что при фиксированных значениях величин  $\tau_s$ ,  $\tau_w$  минимальная температура  $t_m$ , согласно соотношению (1), может быть достигнута при выполнении двух условий: а) минимизация среднелетней температуры  $t_s$  (в пределе – до  $0^\circ\text{C}$ ); б) достижение минимальной среднезимней температуры  $t_w$  (в пределе – по модулю равной температуре воздуха). При этом важно обеспечить условия, при которых величина  $t_w$  не зависит от побочных факторов (например, снеготаносимости поверхности, негативных тепловыделений в подполье и т. д.). Первое из этих условий может быть обеспечено применением слоя качественной теплоизоляции, которая минимизирует тепловой поток к поверхности в теплое время года. В конструкции теплоизоляционного слоя могут быть использованы стандартные теплоизоляционные панели легких ограждающих конструкций, имеющие внешний металлический корпус, защищающий от механических воздействий и выполняющий функции гидроизоляции. Второе условие можно обеспечить применением охлаждающей системы “ГЕТ” [Долгих и др., 2011], испарительный элемент которой уложен под слой теплоизоляции по всей поверхности грунта внутри контура сооружения (рис. 2). Принцип действия, конструкция и возможности применения горизонтальной охлаждающей системы “ГЕТ” кратко изложены в статье [Горелик, 2015]. Оптимальная плотность укладки труб должна быть рассчитана. Температура испарителя системы “ГЕТ” определяется только температурой наружного воздуха (по данным испытаний существующих конструкций, эта температура выше температуры воздуха примерно на  $5\text{--}6^\circ\text{C}$  и практически постоянна вдоль длины испарителя [Разработка..., 1989; Феклистов и др., 2008]). Независимость температуры испарителя от условий внутри подполья обеспечивается тем, что конденсатор устройства вынесен за контуры сооружения. Показанное на рис. 2 конструктивное оформление способа охлаждения должно быть особенно удобно при восстановлении температурного режима оснований, нарушенных в процессе эксплуатации сооружения. Применение в данном случае вертикальных термостабилизаторов наталкивается на дополнительные трудности их монтажа, связанные с ограничением высоты подполья. Для установки таких устройств применяются специальные конструкции с гибким испарителем [Абросимов и др., 2018], что, однако, не устраняет основных недостатков способа. Отметим, что в обычных способах применения охлаждающий элемент системы “ГЕТ” также заглубляется в грунт основания [Долгих и др., 2011].

Приведем здесь некоторые оценки для случая восстановления нарушенного в процессе эксплу-

атации температурного режима основания. Пусть текущая температура в основании сооружения на глубине нулевых годовых амплитуд достигла значения  $t_0$ , которое превысило проектное значение  $t_f$ . В качестве примера примем длительность зимнего периода 8 месяцев:  $\tau_w = 8/12 = 2/3$ . Считая теплоизоляцию идеальной, пренебрегаем в формуле (1) вторым членом. Принимая  $t_w = -15^\circ\text{C}$ , по формуле (1) приближенно получим  $t_m \approx t_w \tau_w = -15(2/3) = -10^\circ\text{C}$ . Пусть  $t_0 = -0.7^\circ\text{C}$ ,  $t_f = -2.0^\circ\text{C}$ , тогда  $\Delta t_{0m} = 9.3^\circ\text{C}$ ,  $\delta t_{mf} = 8.0^\circ\text{C}$ ,  $n = 0.86$ . По графику рис. 1 находим, что требуемый температурный режим достигается примерно через один год охлаждения. В другом примере примем  $t_0 = -2^\circ\text{C}$ ,  $t_f = -3^\circ\text{C}$ ,  $\tau_w = 2/3$ , тогда  $\Delta t_{0m} = 8^\circ\text{C}$ ,  $\delta t_{mf} = 7^\circ\text{C}$ ,  $n = 0.88$ . Соответственно находим, что в этом случае требуемый температурный режим также достигается примерно через один год охлаждения. Указанное время отсчитывается от начала первого летнего сезона, к моменту наступления которого на поверхности грунта должны быть уложены слой теплоизоляции и охлаждающие элементы системы “ГЕТ” (см. расчетный вариант 1б в разделе “Результаты расчета и обсуждение”). Важно, что скорость достижения проектной температуры определяется низкой среднегодовой температурой грунта на подошве деятельного слоя, а также значительным увеличением продолжительности охлаждающего импульса [Горелик, Земеров, 2020]. Еще большей эффективности описанного способа можно добиться, если в летний период первого года его применения к трубам испарителя подключить установку принудительного охлаждения. В этом случае длительность летнего периода обращается в нуль, а длительность зимнего совпадает с продолжительностью года ( $\tau_s = 0$ ,  $\tau_w = 1$ ), при



**Рис. 2. Схема размещения элементов системы “ГЕТ” вблизи подполья (надфундаментные конструкции не показаны):**

1 – плиты теплоизоляции; 2 – труба испарителя (охлаждающий элемент); 3 – конденсатор системы “ГЕТ”; 4 – сваи фундамента; 5 – опорные стойки конденсатора; 6 – вентили отсечения конденсатора от испарителя. А – точки подсоединения агрегата охлаждения к испарителю.

этом  $t_w$  понижается соответствующим образом. Температура  $t_m$  также понизится, а время  $\tau_f$  еще более уменьшится (при прежних значениях  $t_f$  и  $t_0$ ). По окончании первого летнего сезона установка принудительного охлаждения может быть демонтирована без всякого ущерба, и необходимость ее дальнейшего применения на данном сооружении отпадет.

Следует, однако, помнить, что приведенные выше способы оценки температуры  $t_m$ , а также промежутка времени  $\tau_f$ , хотя и удобны, но являются приближенными, и с их помощью можно понять только основные тенденции. Количественные отличия от точных значений предсказать трудно, поскольку в оценках не учитываются многие важные детали конкретных конструктивных решений способов охлаждения. Для получения достоверных результатов необходимо применять строгие расчетные процедуры. Помимо повышения точности за счет самой процедуры, эти методы позволяют учесть динамику температуры воздуха, реальные свойства применяемой теплоизоляции, плотность укладки труб испарителя, неоднородность свойств грунтов, изменения температурного поля в пространстве и другие факторы. В следующем разделе приводятся результаты расчета динамики восстановления температурного режима в основании здания с подпольем с применением строгих численных методов для двух рассмотренных выше примеров.

**Процедура расчета охлаждения грунта с применением системы “ГЕТ”**

Расчеты динамики восстановления температуры в грунтах основания при поверхностном способе охлаждения с применением системы “ГЕТ” выполнены для здания с подпольем с размерами в плане 12 × 24 м. Конструкция и расположение элементов системы охлаждения в пределах свайного поля представлены на рис. 2. Трубы испарителя системы “ГЕТ” уложены змеевиком вдоль большей оси здания и покрыты выравнивающим слоем песка. Стандартные теплоизолирующие панели уложены встык по выравнивающему слою (с необходимой подрезкой в местах обхода свай) в пределах всей поверхности подполья. Конденсатор

системы “ГЕТ” размещается на специальной площадке вне контура здания на опорных стойках. При необходимости подключения агрегата принудительной циркуляции хладагента конденсатор отсекается от испарителя с помощью специальных вентилялей.

Расстояние между осями соседних труб испарителя по горизонтали  $L$  принято в двух вариантах – 1.0 и 0.7 м, диаметр труб  $D = 37$  мм. Толщина теплоизоляции стандартной панели  $h = 100$  мм, коэффициент теплопроводности материала  $\lambda_i = 0.03$  Вт/(м·°С).

Основные тенденции в поведении температурных полей могут быть установлены для однородного по теплофизическим характеристикам массива грунта. С неоднородностью этих свойств могут быть связаны лишь локальные количественные отклонения от общего тренда в динамике температуры, не влияющие принципиально на общий характер ее изменения. Ниже для всех вариантов расчета приняты следующие характеристики грунта (талый грунт обозначен индексом  $u$ , мерзлый – индексом  $f$ ): коэффициенты теплопроводности (Вт/(м·°С)):  $\lambda_u = 1.75$ ,  $\lambda_f = 1.80$ ; объемная теплоемкость (Дж/(м<sup>3</sup>·°С)):  $C_u = 2.68 \cdot 10^6$ ,  $C_f = 2.20 \cdot 10^6$ ; объемный вес скелета грунта  $\gamma_s = 1500$  кг/м<sup>3</sup>; влажность  $w = 0.2$ . Переход единицы объема мерзлого грунта в талое состояние характеризуется величиной скрытой объемной теплоты  $q_v = \kappa \gamma_s w$ , где  $\kappa = 3.34 \cdot 10^5$  Дж/кг ( $\kappa_v = 10^8$  Дж/м<sup>3</sup>). Влажность грунта за счет незамерзшей воды  $w_u = 0$ . Температура начала замерзания грунта  $t_b = 0$  °С. Ход температуры воздуха в течение года принят в виде кусочно-постоянной функции среднемесячных температур. Данные по температуре воздуха приняты по метеостанции “Уренгой” (см. таблицу).

Начальная температура грунта в основании в состоянии нарушения проектного теплового режима, как и выше, принималась в двух вариантах:  $t_0 = -0.7$  и  $-2.0$  °С. В соответствии с методологией работы [Горелик, Паздерин, 2017] расчетные значения летнего ( $\alpha_s$ ) и зимнего ( $\alpha_w$ ) коэффициентов теплообмена воздуха с подстилающей поверхностью оказываются равными (Вт/(м<sup>2</sup>·°С)): для первого варианта  $\alpha_s = 23.2$ ,  $\alpha_w = 1.12$ ; для второго варианта  $\alpha_s = 23.2$ ,  $\alpha_w = 1.39$ . Соответствующие значения проектной температуры для этих двух вариантов:  $t_f = -2.0$  и  $-3.0$  °С.

Граничное условие на стенке трубы испарителя в активный период работы устройства выбрано на основе опытных данных по испытанию устройства [Разработка..., 1989; Феклистов и др., 2008] в виде задания ее температуры условием первого рода:

$$t_t(\tau) = t_a(\tau) + 6,$$

где  $t_a(\tau)$  – температура воздуха (°С), заданная функция времени  $\tau$  (см. таблицу). Прерывание

**Годовой ход температуры воздуха по метеостанции “Уренгой”**

Месяц	Средняя температура воздуха, °С	Месяц	Средняя температура воздуха, °С
Январь	-26.4	Июль	15.4
Февраль	-26.4	Август	11.3
Март	-19.2	Сентябрь	5.2
Апрель	-10.3	Октябрь	-6.3
Май	-2.6	Ноябрь	-18.2
Июнь	8.4	Декабрь	-24.0

работы устройства в пассивный период определяется нарушением условия стока тепла  $q_t$  от грунта к стенке испарителя:  $q_t < 0$ .

Граничное условие на верхней поверхности массива грунта задается условием третьего рода:

$$\alpha(t_a(\tau) - t_s) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_s.$$

Здесь  $z$  – вертикальная координата;  $t_s$  – температура поверхности грунта (определяется в процессе счета);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта, который в зависимости от его состояния принимает значения  $\lambda_u$  либо  $\lambda_j$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена поверхности покрытия грунта с воздухом, принимает значения  $\alpha_s$  либо  $\alpha_w$  в соответствующие сезонные отрезки времени. В пределах подполья массив грунта рассматривается как двухслойный по вертикали, где верхний слой соответствует теплоизоляции с указанными выше характеристиками.

Система координат расположена в горизонтальной плоскости, совпадающей с поверхностью массива грунта, ее центр совпадает с геометрическим центром здания в плане. Ось  $Oz$  направлена вертикально вниз, оси  $Ox$  и  $Oy$  лежат в горизонтальной плоскости и направлены соответственно вдоль длинной и короткой осей здания. Размеры расчетной области вдоль каждой из осей определяются радиусом теплового влияния [Горелик, Паздерин, 2017], и при расчете не более чем на 5-летний срок этот радиус не превышает 35 м. Таким образом, границы расчетной области должны быть удалены на 35 м от границ контура подполья в плане и на такое же расстояние в глубь массива по вертикали. На этих границах задается нулевое значение теплового потока.

Использованная здесь расчетная процедура основана на численных методах, неоднократно тестирована на разных задачах и описана в [Горелик и др., 2019; Горелик, Хабитов, 2019а,б].

### Результаты расчета и обсуждение

При проведении расчетов рассмотрены две технологические схемы охлаждения: а) с использованием только сезонно действующей системы “ГЕТ”; б) с дополнительным подключением к трубам испарителя агрегата принудительного охлаждения в течение одного летнего сезона. При этом следует иметь в виду, что подключение различных элементов системы охлаждения можно осуществить в различные моменты времени годового цикла, что может сказаться на эффективности охлаждения. Целью расчетов было, в том числе, определение оптимального момента времени подключения систем охлаждения. Приведем краткую характеристику рассматриваемых вариантов технологических схем и их обозначения.

*Вариант Ia:* система “ГЕТ” вместе с теплоизоляцией монтируется в конце летнего сезона; сезонноталый слой сформирован под влиянием естественных факторов (его мощность близка к среднемноголетнему значению); система “ГЕТ” включается с наступлением зимнего сезона и автоматически выключается в конце зимы; второй и все последующие циклы протаивания сезонноталого слоя происходят под влиянием теплоизоляции. Этот процесс циклически повторяется со второго года во все последующие.

*Вариант Ib:* система “ГЕТ” вместе с теплоизоляцией монтируется в конце зимнего сезона; сезонноталый слой формируется под влиянием естественных факторов и теплоизоляции (его мощность близка к минимальному значению); система “ГЕТ” включается с наступлением зимнего сезона и автоматически выключается в конце зимы; первый и все последующие циклы протаивания сезонноталого слоя происходят под влиянием теплоизоляции. Этот процесс циклически повторяется с первого года во все последующие.

*Вариант IIa:* монтаж и начало работы системы “ГЕТ” до конца первого зимнего периода аналогичны варианту Ia; в начале лета к трубе испарителя подключается агрегат принудительного охлаждения, который работает в течение лета; в конце лета принудительное охлаждение отключается и демонтируется (более не используется); далее в зимний сезон работает система “ГЕТ” совместно с теплоизоляцией; второй и все последующие циклы происходят под влиянием теплоизоляции и зимнего включения системы “ГЕТ”.

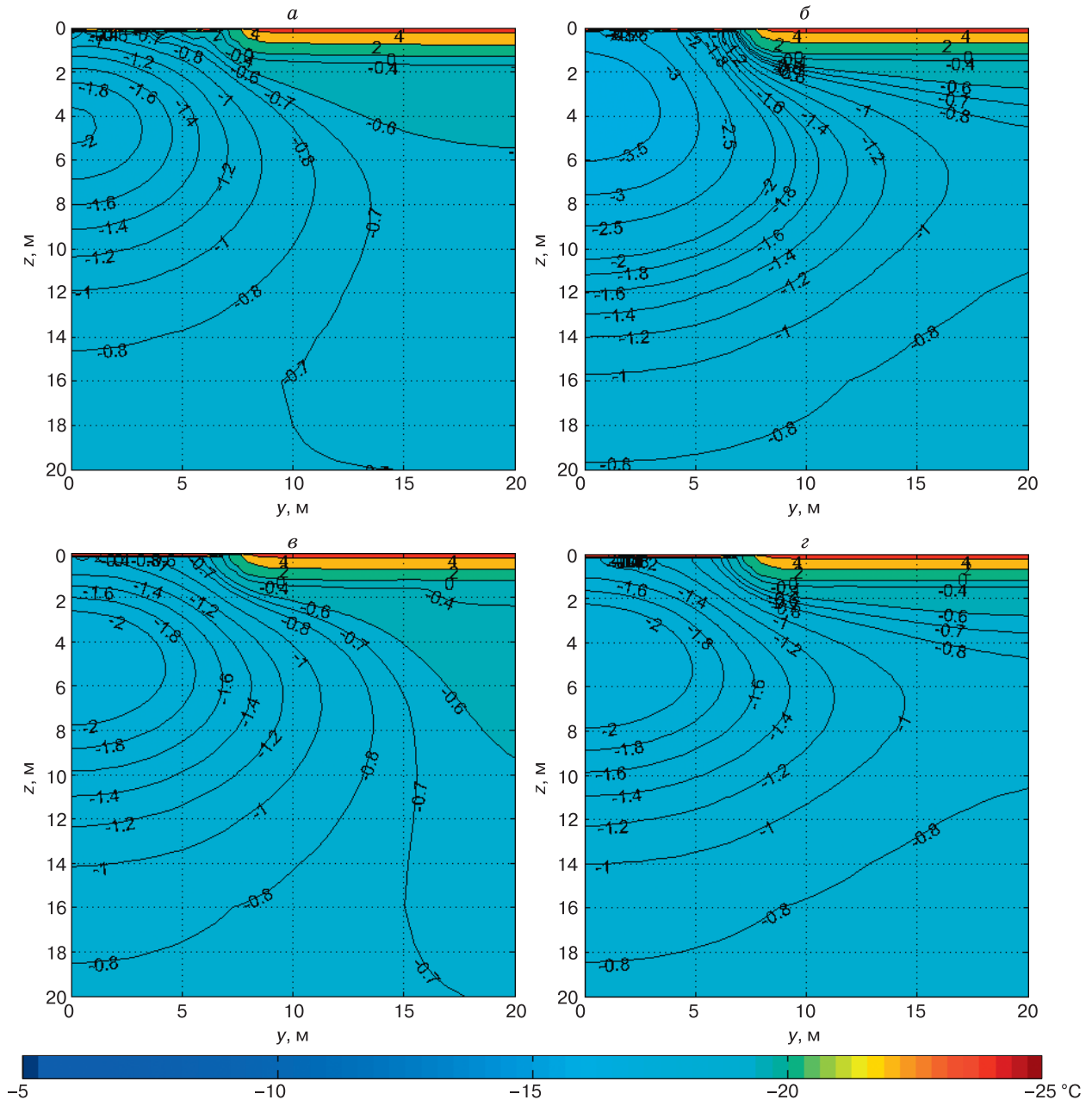
*Вариант IIб:* система “ГЕТ” монтируется аналогично варианту Ib; с началом летнего сезона подключается агрегат принудительного охлаждения, который работает в течение лета; в конце лета принудительное охлаждение отключается и демонтируется (более не используется); далее работает только система “ГЕТ” совместно с теплоизоляцией.

*Вариант IIв:* система “ГЕТ” монтируется аналогично варианту Ib; агрегат принудительного охлаждения подключается с началом второго летнего сезона, который работает в течение лета; в конце второго лета принудительное охлаждение отключается и демонтируется (более не используется); далее работает только система “ГЕТ” совместно с теплоизоляцией.

Первые два варианта соответствуют схеме без применения принудительного способа охлаждения, три последующих включают этот способ. Каждый из представленных вариантов характеризуется дополнительным набором параметров: начальной температурой грунта  $t_0$ ; расстоянием между параллельными участками труб испарителя  $L$ ; координатой  $x$  поперечного сечения основа-

ния, в котором рассматриваются результаты расчета; промежуток времени  $\tau$  от начала работы системы охлаждения, который соответствует представленным результатам расчета. Результаты расчетов по вариантам Ia и Ia выводятся на конец первого, второго и т. д. годовых циклов. Результаты расчетов по вариантам Ib, Ib и Ib выводятся на конец второго, третьего и т. д. летних сезонов (при продолжительности летнего сезона в 5 месяцев – примерно через 1.4, 2.4 ... года от момента

монтажа охлаждающей системы). Вывод результатов соответствует максимальной температуре грунта (в конце летнего сезона). Результаты расчетов представлены на рис. 3–8. Линии в поле рисунка отображают положение изотерм в рассматриваемом сечении основания, цифры вдоль линии обозначают соответствующую температуру изотерм. Цветовая шкала в нижней части рисунков показывает соответствие определенного цвета в поле рисунка расчетному значению температуры.



**Рис. 3. Результаты расчетов температуры грунта при охлаждении с применением только системы “ГЕТ” при  $t_0 = -0.7$  °C:**

a – вариант Ia ( $L = 0.7$  м,  $x = 0$  м, 1 год); б – вариант Ib ( $L = 1.0$  м,  $x = 0$  м, 1.4 года); в – вариант Ia ( $L = 0.7$  м,  $x = 12$  м, 2 года); z – вариант Ib ( $L = 1.0$  м,  $x = 12$  м, 1.4 года).

На рис. 3, 4 представлены результаты расчетов температуры грунта при использовании систем охлаждения по вариантам Ia и Ib для двух значений его начальной температуры ( $-0.7$  и  $-2.0$  °C). Как видно из сравнения температур грунта, от поверхности до глубины нулевых годовых амплитуд (10 м) эффективность охлаждения во втором варианте существенно выше, чем в первом. Ориентируясь на приведенные выше в примерах значения проектной температуры  $t_f = -2$  и

$-3$  °C для соответствующих начальных температур грунта, можно утверждать, что для варианта Ib проектные значения достигаются для центрального сечения (см. рис. 3, б; 4, б) и достигаются с небольшим недостатком для краевого сечения (см. рис. 3, з; 4, з) спустя один цикл работы системы охлаждения (1.4 года) при стандартном расстоянии между трубами испарителя ( $L = 1$  м). Из распределения температуры в варианте Ia следует, что как в центральном, так и в крайнем сечениях

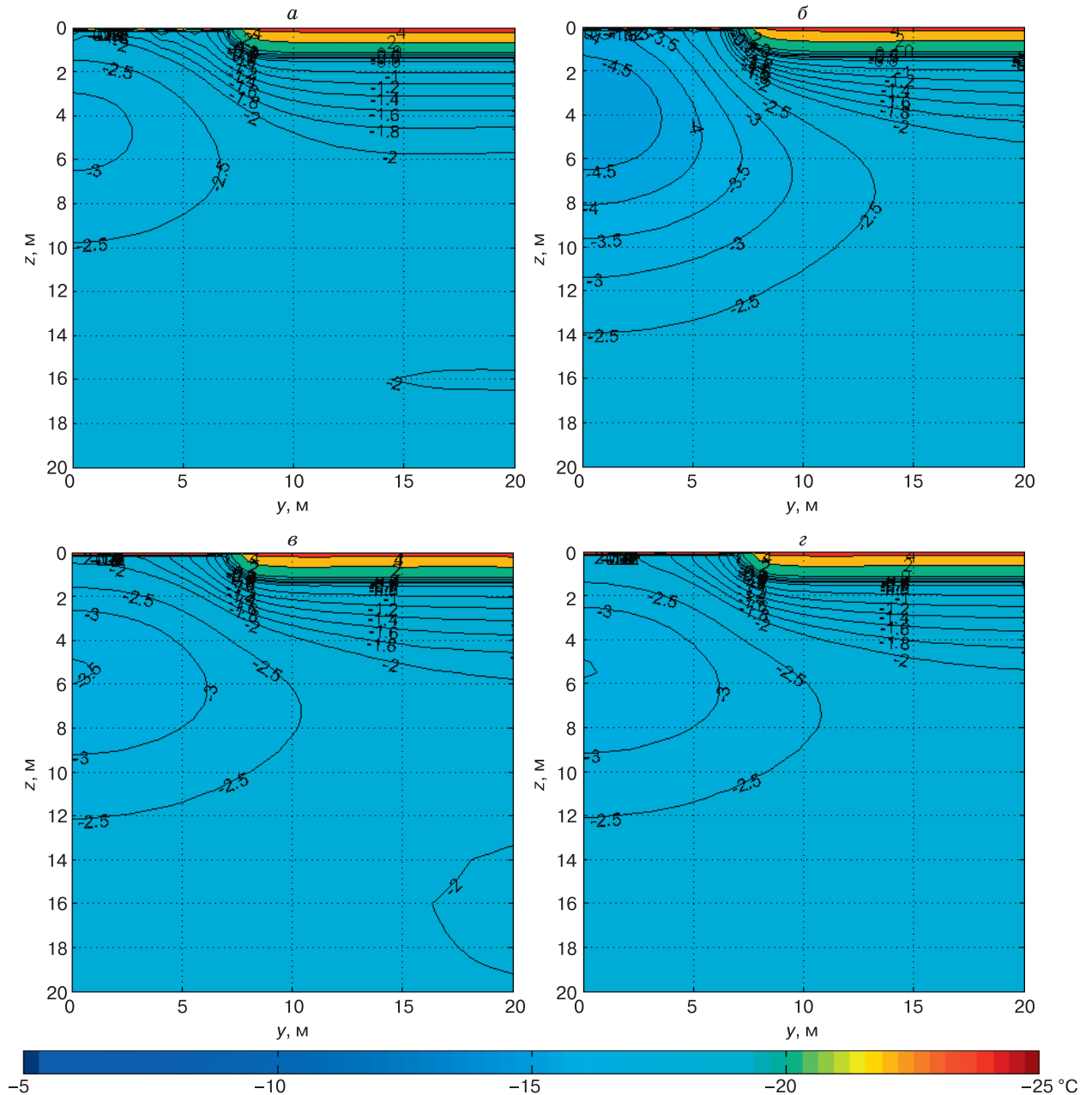


Рис. 4. Результаты расчетов температуры грунта при охлаждении с применением только системы “ГЕТ” при  $t_0 = -2.0$  °C:

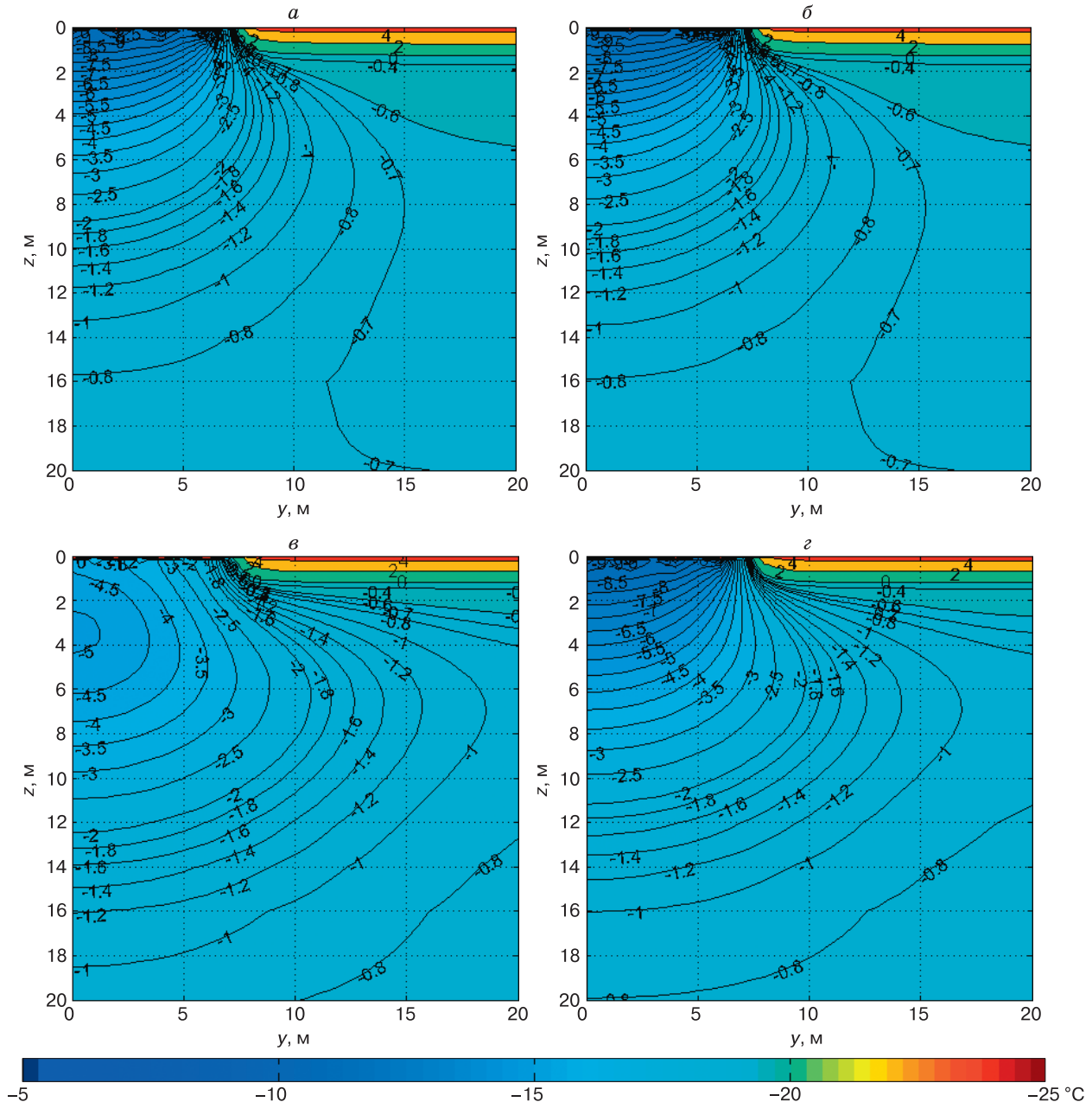
a – вариант Ia ( $L = 0.7$  м,  $x = 0$  м, 1 год); б – вариант Ib ( $L = 1.0$  м,  $x = 0$  м, 1.4 года); в – вариант Ia ( $L = 0.7$  м,  $x = 12$  м, 2 года); з – вариант Ib ( $L = 1.0$  м,  $x = 12$  м, 1.4 года).



температура остается значительно выше проектного значения (см. рис. 3, а; 4, а; 3, в; 4, в) даже для более плотной укладки труб ( $L = 0.7$  м) и при более длительном (двухлетнем) цикле работы системы охлаждения. Такое отличие имеет простое объяснение, которое заключается в том, что первое включение системы “ГЕТ” в варианте Ia расходуется на весьма энергоемкий процесс замораживания слоя сезонного протаивания, который в этом варианте имеет максимальное значение. В резуль-

тате длительность охлаждающего импульса, определяющего процесс охлаждения основания [Достовалов, Кудрявцев, 1967; Фельдман, 1977; Горелик, Земеров, 2020], оказывается существенно сниженной. Вариант Ib свободен от этого недостатка, поскольку слой сезонного оттаивания формируется под влиянием теплоизоляции и имеет минимальное значение.

Результаты кратковременного применения принудительной системы охлаждения в сочетании



**Рис. 5. Результаты расчетов температуры грунта при охлаждении с использованием принудительного охлаждения и системы “ГЕТ” для центрального сечения ( $x = 0$  м) при  $t_0 = -0.7$  °С:**

а – вариант Ia ( $L = 1.0$  м, 1 год); б – вариант Ia ( $L = 0.7$  м, 1 год); в – вариант Ib ( $L = 1.0$  м, 1.4 года); з – вариант Ib ( $L = 1.0$  м, 1.4 года).

с теплоизоляцией и системой “ГЕТ” приведены на рис. 5–8. Представленные результаты показывают, что применение технологических вариантов Пб и Пв во всех случаях обеспечивает достижение проектной температуры как для центрального, так и краевого сечений в основании спустя один цикл работы системы охлаждения (1.4 года) при стандартном расстоянии между трубами испарителя ( $L = 1$  м). При этом в варианте Пб эта температура достигается с заметным запасом в

0.5–1.0 °С (см. рис. 5, в, з; 6, в, з; 7, в, з; 8, в, з). Фрагменты этих же рисунков (см. рис. 5, а, б; 6, а, б; 7, а, б; 8, а, б) показывают, что схема Па не обеспечивает достижения проектной температуры в минимальные сроки ее работы. Причина недостаточной эффективности варианта Па аналогична той, что изложена при сравнении вариантов Ia и Ib. Наиболее высокая эффективность работы системы охлаждения в варианте Пб обусловлена тем, что длительность непрерывно действующего ох-

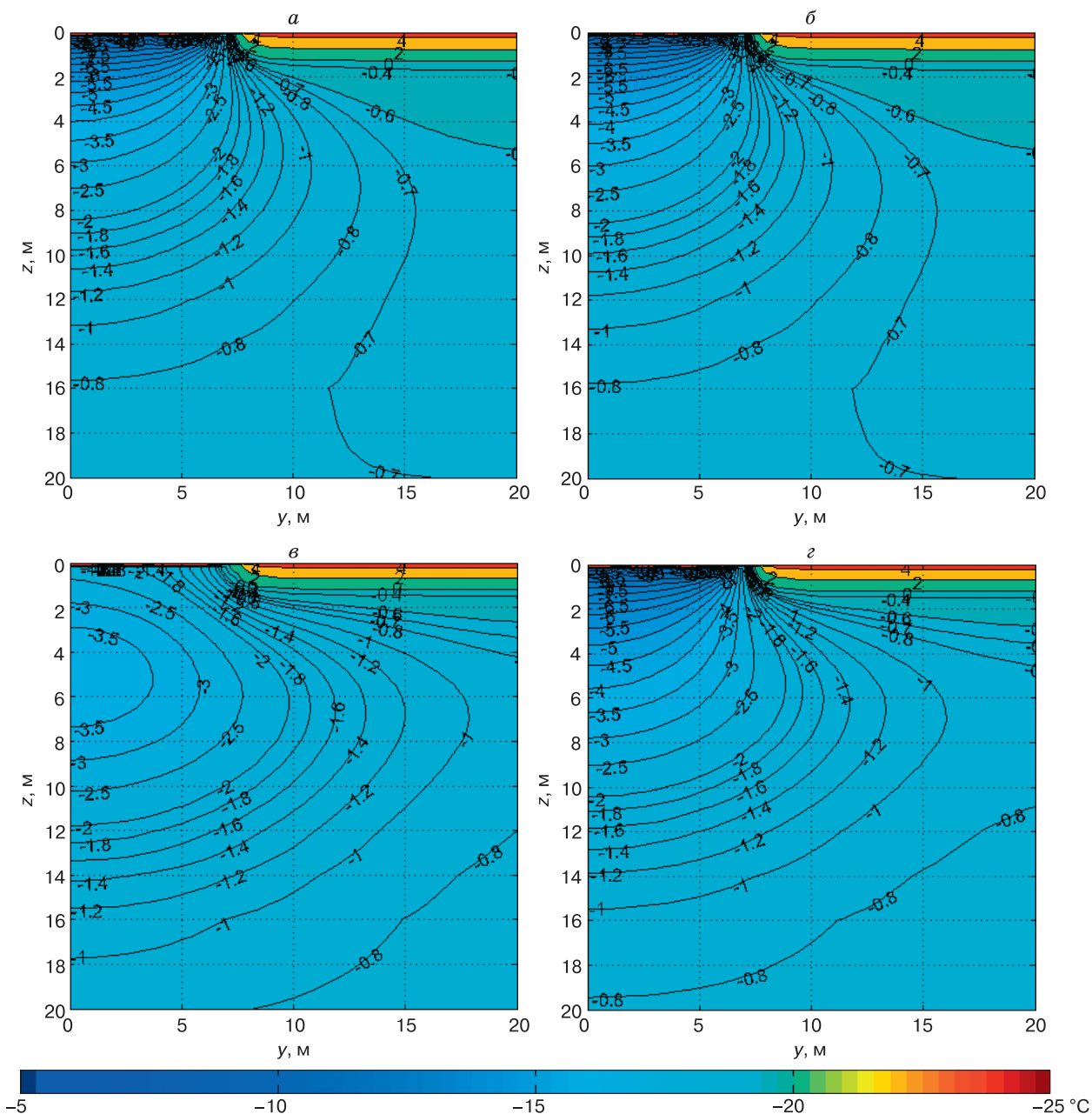
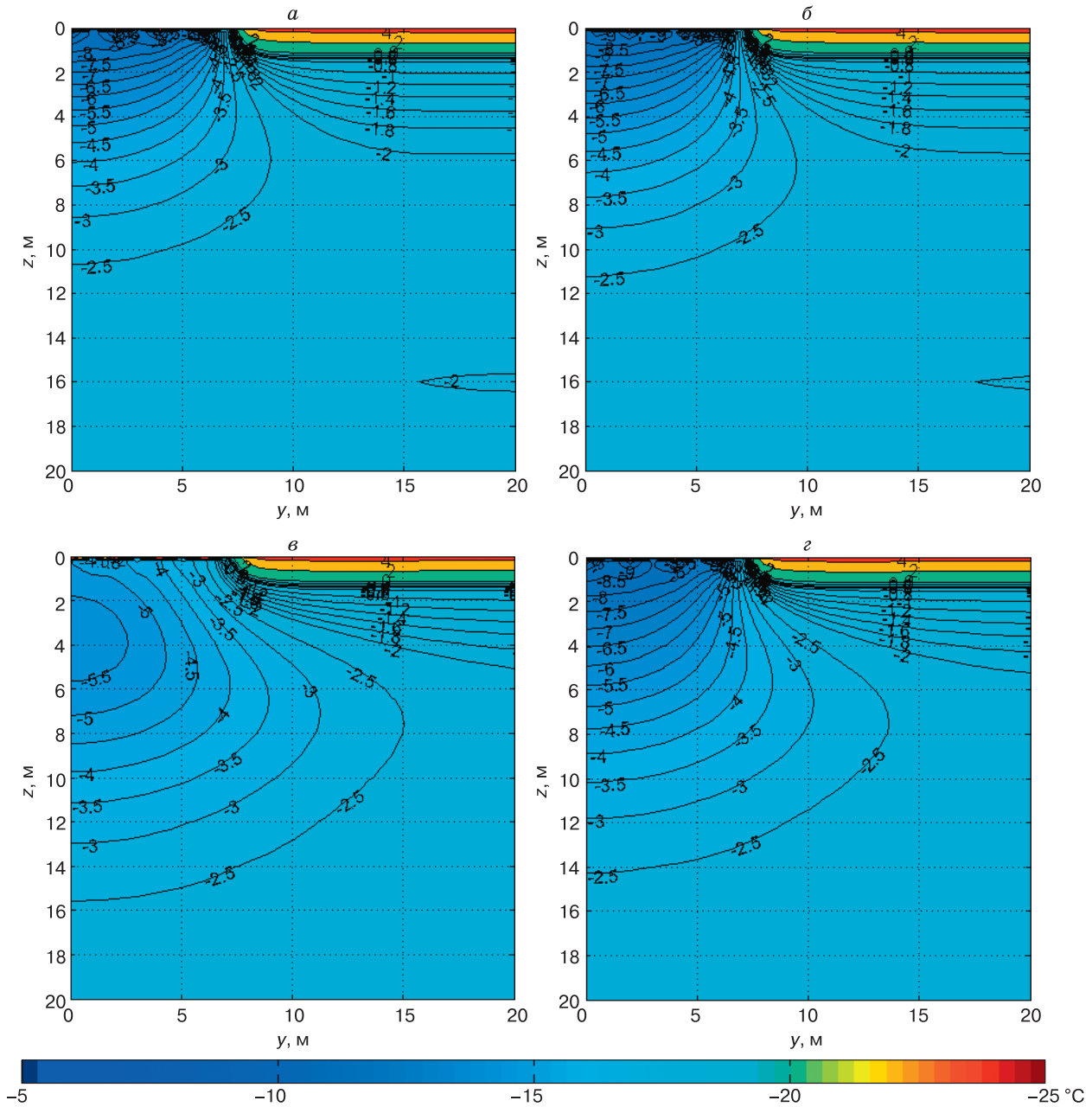


Рис. 6. Результаты расчетов температуры грунта при охлаждении с использованием принудительного охлаждения и системы “ГЕТ” для краевого сечения ( $x = 12$  м) при  $t_0 = -0.7$  °С:

а – вариант Па ( $L = 1.0$  м, 1 год); б – вариант Па ( $L = 0.7$  м, 1 год); в – вариант Пб ( $L = 1.0$  м, 1.4 года); з – вариант Пв ( $L = 1.0$  м, 1.4 года).



**Рис. 7. Результаты расчетов температуры грунта при охлаждении с использованием принудительного охлаждения и системы “ГЕТ” для центрального сечения ( $x = 0$  м) при  $t_0 = -2.0$  °С:**

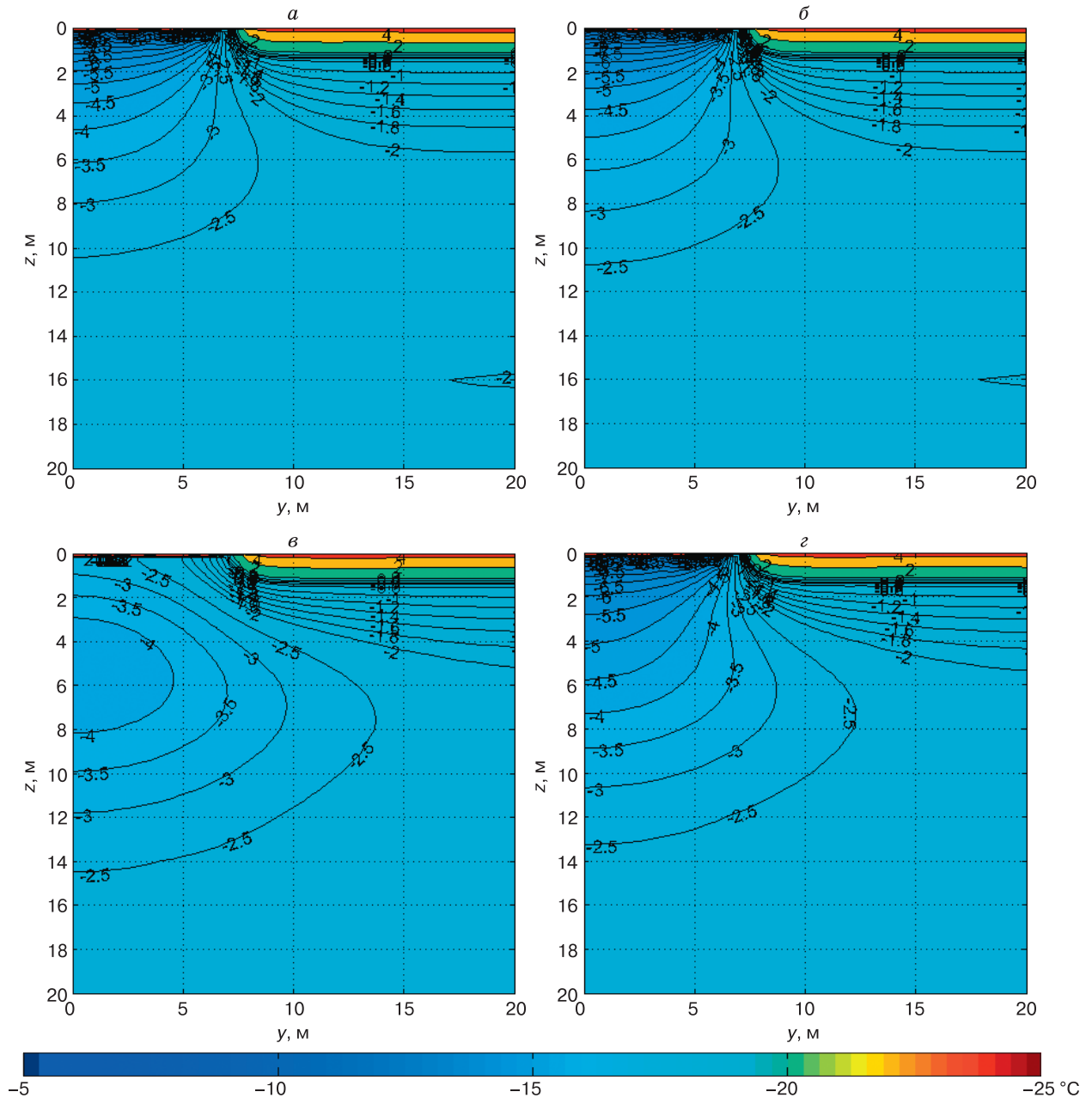
*a* – вариант П<sub>а</sub> ( $L = 1.0$  м, 1 год); *б* – вариант П<sub>а</sub> ( $L = 0.7$  м, 1 год); *в* – вариант П<sub>б</sub> ( $L = 1.0$  м, 1.4 года); *г* – вариант П<sub>в</sub> ( $L = 1.0$  м, 1.4 года).

лаждающего импульса в этом случае оказывается максимально высокой. Это время  $\tau_f$  определяется суммой:

$$\tau_f = \tau_{w1} + \tau_s + \tau_{w2}, \quad (3)$$

где  $\tau_{w1}$  – длительность импульса в зимний период, предшествующий моменту сборки системы “ГЕТ” (действуют естественные факторы охлаждения);

$\tau_s$  – длительность летнего периода (в течение которого действует принудительное охлаждение);  $\tau_{w2}$  – продолжительность последующего зимнего периода (в течение которого действует система “ГЕТ”). Длительность охлаждающего импульса в варианте П<sub>в</sub> меньше значения, определяемого по формуле (3), на величину  $\tau_{w1}$ . Фактически зимние условия на поверхности грунта в варианте П<sub>б</sub> непрерывно существуют около полугода.



**Рис. 8. Результаты расчетов температуры грунта при охлаждении с использованием принудительного охлаждения и системы “ГЕТ” для краевого сечения ( $x = 12$  м) при  $t_0 = -2.0$  °С:**

*a* – вариант П<sub>а</sub> ( $L = 1.0$  м, 1 год); *б* – вариант П<sub>а</sub> ( $L = 0.7$  м, 1 год); *в* – вариант П<sub>б</sub> ( $L = 1.0$  м, 1.4 года); *г* – вариант П<sub>в</sub> ( $L = 1.0$  м, 1.4 года).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты математического моделирования процесса формирования температурного поля в массиве мерзлого грунта при поверхностном способе охлаждения с применением рассмотренных технических средств позволяют сделать следующие выводы.

1. Предлагаемый способ поверхностного охлаждения оснований сооружений (с применением теплоизоляции, системы “ГЕТ” и принудительного способа охлаждения (при необходимости кратковременно)) позволяет понизить температуру грунтов на 1.0–2.5 °С до глубины нулевых годовых амплитуд, что во многих случаях достаточно для обеспечения их твердомерзлого состояния.

При этом значительно сокращаются сроки достижения проектного значения температуры по сравнению с иными способами (1.5 года вместо 3–5 лет). Способ характеризуется снижением трудоемкости по установке и монтажу систем охлаждения в силу отсутствия необходимости выполнения буровых и других тяжелых земляных работ.

2. Эффективность применения предлагаемого способа наиболее высока, если включение активных элементов системы охлаждения (“ГЕТ”, агрегата принудительного охлаждения) осуществляется в момент, когда слой сезонного протаивания находится в полностью промерзшем состоянии. В этом случае длительность охлаждающего импульса, формирующего температуру грунта до глубины нулевых амплитуд, более одного года.

3. Предложенные ранее [Горелик, Земеров, 2020] простые количественные оценки времени достижения проектной температуры в грунтовом массиве на основе существующих представлений о механизме формирования температурной сдвижки в целом соответствуют результатам расчета, полученным строгими численными методами.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания (АААА-А17-117051850061-9).*

### Литература

- Абросимов А.И., Тепляков А.В., Залетаев С.В. и др. Увеличение несущей способности свай путем установки в проветриваемое подполье охладителей грунта // Сб. докл. расширенного заседания Совета по криологии Земли (Москва, 15–16 мая 2018 г.). М., МГУ, 2018, т. 2, с. 24–31.
- Балобаев В.Т. Влияние поверхностного слоя на тепловой режим и глубину протаивания мерзлых горных пород // Тепловые процессы в мерзлых горных породах. М., Наука, 1964, с. 7–38.
- Бубело Р.В. Стабилизация отрицательной температуры мерзлых грунтов основания с помощью поверхностных аккумуляторов холода: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003, 23 с.
- Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г. Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай // Инженерное мерзлотоведение. М., Наука, 1979, с. 72–91.
- Горелик Я.Б. Причины неустойчивой работы двухфазного естественно-конвективного охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 81–93.
- Горелик Я.Б., Земеров И.В. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 1, с. 10–40.
- Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 49–59.
- Горелик Я.Б., Романюк С.Н., Хабитов А.Х. Учет совместного теплового действия скважин в кусте при расчете параметров области протаивания мерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 79–87.
- Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Роль теплоизоляции скважин при определении расстояния между устьями в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2019а, т. 5, № 2, с. 10–26.
- Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2019б, т. 5, № 3, с. 25–46.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н., Вельчев С.П. Этапы, проблемы и технические решения по строительству оснований на вечномерзлых грунтах // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению (Тюмень, 7–10 нояб. 2011 г.). Тюмень, НПО “Фундаментстройаркос”, 2011, с. 12–23.
- Достовалов Б.Н. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., МГУ, 1967, 403 с.
- Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 169 с.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1974, 432 с.
- Порхаев В.Г. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с мерзлыми грунтами. М., Наука, 1970, 208 с.
- Разработка природоохранных мероприятий, экологически безвредных технологий и оборудования для освоения газовых и газоконденсатных месторождений полуострова Ямал: Отчет о НИР / Под ред. Г.М. Долгих, С.Н. Окунева. Тюмень, Гипротюменнефтегаз, 1989, 152 с.
- Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне // Тр. ученых и специалистов ООО НПО “Фундаментстройаркос” за 2010–2014 гг. / Под ред. Г.М. Долгих. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2014, 218 с.
- Феклистов В.Н., Долгих Г.М., Окунев С.Н., Паздерин Д.С. Исследование охлаждающей системы типа ГЕТ для термостабилизации грунтовых оснований // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, ТГНГУ, 2008, т. 2, с. 165–168.
- Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск, Наука, 1977, 102 с.
- Хрусталева Л.Н. Стабилизация вечномерзлых грунтов в основании зданий / Л.Н. Хрусталева, В.В. Никифоров. Новосибирск, Наука, 1990, 209 с.
- Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.

### References

- Abrosimov A.I., Teplyakov A.V., Zaletaev S.V. et. al. The increezing of pile stability by employment of cooling sistems in the wind underground. In: Proceeding of Council of Earth's Cryology (Moscow, May 15–16, 2018). Moscow, 2018, vol. 2, p. 9–15 (in Russian).
- Balobaev V.T. Influence of the surface layer to thermal regime and to depth of seasonal thaw penetration of the frozen ground. In: Teplovye protsessy v merzlykh gornyx porodakh [Thermal Processes in the Frozen Ground]. Moscow, Nauka, 1964, p. 7–38 (in Russian).
- Bubelo R.V. Stabilization of Negative Temperature in the Base's Frozen Soils by Surface Cold Accumulators: Thesis of PhD dissertation. Moscow, 2003, 23 p. (in Russian).

- Vyalov S.S., Alexandrov Yu.A., Mirenburg Yu.S., Fedosev Yu.G. Artificial cooling of the ground with employment of the thermal piles. In: Inzhenernoe merzlotovedenie [Engineering Geocryology]. Moscow, Nauka, 1979, p. 72–90 (in Russian).
- Gorelik J.B. Operation of two-phase thermosyphons with horizontal evaporation tubes: causes of instability. Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 74–83.
- Gorelik J.B., Zemerov I.V. Influence of the surface water reservoir to the thermal regime of frozen ground. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2020, vol. 6, No. 1, p. 10–40 (in Russian).
- Gorelik J.B., Pazderin D.S. Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems of forecasting temperature field dynamics in the ground base of structures on permafrost. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 45–54.
- Gorelik J.B., Romanyuk S.N., Khabitov A.H. Constraining thaw boundary around multiple wells with regard to their joint thermal effect. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 67–73.
- Gorelik J.B., Khabitov A.K. The influence of the boreholes' heat insulation on the determination of the minimal distance between its outfalls at permafrost. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2019a, vol. 5, No. 2, p. 10–26 (in Russian).
- Gorelik J.B., Khabitov A.K. About efficiency of adaptation of the thermostabilizers for building activity in permafrost. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2019b, vol. 5, No. 3, p. 25–46 (in Russian).
- Dolgikh G.M., Okunev S.N., Velchev S.P. Stages, problems and technical decisions for building activity in permafrost. In: Proceeding of International Conference of XX Year of NPO "Fundamentstroiarkos" (Tyumen, November 7–10, 2011). Tyumen, NPO "Fundamentstroiarkos", 2011, p. 12–23 (in Russian).
- Dostovalov B.N., Kudryavtsev V.A. Obshchee merzlotovedenie [General Geocryology]. Moscow, MSU, 2017, 403 p. (in Russian).
- Makarov V.I. Termosifony v severnom stroitel'stve [Thermosyphons in High-Latitude Construction Engineering]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 169 p. (in Russian).
- Kudryavtsev V.A. (Ed.). Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh [Bases of Prognoses for Permafrost at Engineering and Geological Investigations]. Moscow, MSU, 1974, 432 p. (in Russian).
- Porkhaev V.G. Teplovoe vzaimodeistvie zdaniy i sooruzhenii s merzlymi gruntami [Thermal Interaction of Buildings with Permafrost]. Moscow, Nauka, 1970, 208 p. (in Russian).
- Dolgikh G.M., Okunev S.N. (Eds.). The Elaboration of Ecologically Acceptable Technologies and Devices for Development of Gas and Gas-Condensate Deposits of Yamal Peninsula. Scientific Report. Tyumen, Gyprotyumenneftegas, 1989, 152 p. (in Russian).
- Dolgikh G.M. (Ed.). Systems for Thermal Stabilization of Permafrost. Collection of Papers by Specialists from Fundamentstroiarkos R&D Company for 2010–2014. Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2014, 218 p. (in Russian).
- Feklistov V.N., Dolgikh G.M., Okunev S.N., Pazderin D.S. The investigation of cooling system of type as GET for thermostabilization of ground bases. In: Proceeding of International Conference "Cryogenic Resources of Polar and Alpine Regions. State and Outlook of Engineering Geocryology". Tyumen, TGNGU, 2008, vol. 2, p. 165–168 (in Russian).
- Feldman G.M. Prognoz temperaturnogo rezhima i razvitiya kriogennykh protsessov [Prognoses of Temperature Regime for Grounds and Evolution of Cryogenic Processes]. Novosibirsk, Nauka, 1977, 102 p. (in Russian).
- Khrustalev L.N., Nikiforov V.V. Stabilizatsiya vechnomerzlykh gruntov v osnovanii zdanii [A Stabilization of the Building's Bases in Permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1990, 209 p. (in Russian).
- Shur Yu.L. Verkhny gorizont tolshchi merzlykh porod i termokarst [Upper Layer of Frozen Ground and Thermokarst]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 213 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 5 мая 2020 г.,  
после доработки – 9 ноября 2020 г.,  
принята к публикации 5 декабря 2020 г.*