

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК

**КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ РУДНИКОВ
В КРИОЛИТОЗОНЕ СРЕДСТВАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА**

В.В. Неклюдов, С.А. Великин, А.В. Малышев

*Вилуйская научно-исследовательская мерзлотная станция
Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 678185, Мирнинский район, пос. Чернышевский,
квартал ВНИМС, 4, Республика Саха (Якутия), Россия; nviva@mail.ru*

В целях повышения эффективности контроля за деградацией мерзлоты в основаниях крупных рудников в криолитозоне предлагается новый подход к мониторингу мерзлотной обстановки на основе применения автоматизированных логгерных систем. Приведено описание действующего макета системы контроля деградации мерзлоты в грунтах фундамента инженерного объекта посредством регистрируемого температурного поля. Определены компоненты прямой и обратной связи этой системы. Показана оптимальность использования трехмерных изотермических поверхностей температурного поля фундамента объекта и их изменений для выявления особенностей теплового режима объекта.

Фундаменты, деградация мерзлоты, изотермическая поверхность, логгеры, системы управления, температурное поле

**CONTROL OF TEMPERATURE CONDITION OF MINE BASE
IN CRYOLITHOZONE BY MEANS OF AUTOMATED MONITORING**

V.V. Nekljudov, S.A. Velikin, A.V. Malyshev

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Viluj Research Permafrost Station,
678185, Mirny Region, pos. Chernyshevsky, VNIMS, Sakha, nviva@mail.ru*

In order to increase the efficiency of control of permafrost degradation in the basements of the large mines in cryolithozone a new approach to monitoring of state of frozen ground is suggested. This approach is based on using of the new temperature logger automated systems. The description of the operating model of the permafrost degradation control system in the ground of basement of the engineering object is provided. The control is carried out by registering the temperature field. The components of the direct and backfeed loop of this system are defined. It is demonstrated that using of the three-dimensional isothermal surfaces of the temperature field of the object base are optimal for detecting the thermal peculiarities of an object.

Basement, permafrost degradation, isothermal surface, loggers, control systems, temperature field

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения за температурой как основной характеристикой фазового состояния грунтов являются первичным звеном любой системы контроля деградации мерзлоты как в основании сооружений в криолитозоне, так и в их инженерно-геологическом окружении [Горелик и др., 1997; Камышев, 1999; Кондратьева, Коновалов, 1989; Дроздов и др., 2007; Павлов, 2008]. При этом для инженерных объектов в криолитозоне развитие технических измерительных средств позволяет дооборудовать фундаменты существующих рудников современными логгерными системами термоконтроля их состояния. Кроме того, меняется способ представления первичных данных. Если до

последнего времени первичная информация представлялась в виде простых температурных графиков, то сейчас на смену им приходят объемные температурные поля и их производные, причем в динамике. Это своего рода качественные изменения, которые требуют соответствующего освещения в специализированной литературе.

Сотрудниками Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станции (ВНИМС) разработана система термоконтроля, которая была опробована в технологическом цикле замораживания грунтов фундаментов рудников Мир и Интернациональный. Разработана и опробована также компьютерная программа "Термик" системы

управления мерзлотной обстановкой на фундаменте рудников (как макет), позволяющая осуществлять выдачу рекомендаций по переключению замораживающих колонок в полу- и автоматическом режиме.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МЕРЗЛОТНОЙ ОБСТАНОВКОЙ

Система управления мерзлотной обстановкой на фундаментах инженерных объектов в криолитозоне понимается как классическая система автоматизированного управления (САУ) (см., например, [Гальперин, 2004]), основными компонентами которой в нашем случае являются: 1) измерительная система термоконтроля; 2) замораживающая станция; 3) система управления мерзлотной обстановкой. Каждая из этих подсистем имеет свою надстройку управления.

При непосредственном участии сотрудников Института мерзлотоведения (ИМЗ) им. П.И. Мельникова СО РАН на руднике Мир начата эксплуатация новой цифровой термометрической системы, позволяющей регистрировать во времени температурное поле с частотой, необходимой в текущих инженерно-геокриологических условиях типа непредвиденного заводнения фундамента грунтовыми водами. Система представляет собой скважинную сеть из датчиков логгерных гирлянд, размещаемую в фундаменте рудника. Сеть имеет интерфейс (шину) с центральным блоком управления и др. На данную систему составлен “Акт испытаний средства измерений в целях утверждения системы измерительного контроля температуры криолитозоны”, СКТК-ПР, представленный ВНИМС ИМЗ СО РАН (Якутск, 2011 г.), а также получено “Свидетельство об утверждении типа изготовителя средств измерений” ВНИМС ИМЗ СО РАН.

СКТК представляет собой иерархическую четырехуровневую систему. Первый уровень состоит из многозонных погружных зондов, в каждый из которых входит до 16 преобразователей температуры, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга. Второй уровень системы состоит из электронных модулей, предназначенных для съема информации с зондов. При этом к одному модулю может подключаться до семи зондов. Обмен данными выполняется по шине 1-Wire, реализованной на основе экранированного кабеля длиной не более 100 м. Третий уровень включает электронные модули, выполняющие роль преобразователя интерфейса и предназначенные для съема данных с электронных модулей второго уровня и обмена данными с компьютером по линиям последовательного интерфейса USB. Максимальное количество подключаемых к WAD-LAN/RS232/USB/RS485-BUS модулей второго уровня – 10 шт.

Применение замораживающих станций в подземном строительстве широко распространено и освещено, например, в [Трунак, 1974]. Циркуляция хладагента обеспечивает замораживание грунта до некоторого критического значения, равного разности температур (ΔT) вмещающего грунта и хладагента. При достижении этой разностью нулевого значения станция переводится в пассивный режим (с поглощением только земного теплопритока). Специальные вопросы эффективности применения замораживающей станции для рудника Мир рассмотрены в [Лобанов и др., 2005].

Автоматизированная система управления мерзлотной обстановкой является наименее разработанным звеном. На большинстве рудников в криолитозоне РФ управление замораживающими станциями до настоящего времени осуществляется через систему письменных рекомендаций, заверенных подписью ответственного лица по смене режима работы станции.

Разрабатываемый ВНИМС программный комплекс открытой архитектуры “Термик” позволяет реализовать автоматизированное управление мерзлотной обстановкой путем своевременной смены режима работы замораживающих колонок с целью поддержания оптимального (по заданным критериям) режима несущих способностей грунтов основания инженерного сооружения. Здесь прямая связь (как элемент САУ) реализуется посредством поступления температурных данных скважинной сети на вход программного комплекса для их обработки. Обратная связь реализуется через канал с замораживающей станцией, по которому отсылаются команды для изменения режима ее работы.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ МОНИТОРИНГ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Геокриологическая устойчивость грунтов фундаментов инженерных сооружений понимается прежде всего как сохранение несущей способности свай фундамента [Растегаев, 2011]. Однако для расчета последних необходимо знание распределения температур грунтов вдоль каждой сваи свайного поля фундамента, а также их заводнения и засоленности, физических свойств грунтов и т. п. Поскольку сеть термометрических скважин рудника редкая и не совпадает с положением несущих свай, возникает проблема точного определения температур вдоль этих свай (ошибки их определения могут привести к ошибкам расчета несущих способностей).

Решить такую задачу аналитически проблематично, поэтому была использована программа “Термик” для построения объемных температурных полей общей аксиальной симметрии на основе интерполяционных алгоритмов. С помощью

этой программы по данным измерений системы термоконтроля получены объемные температурные поля как первичный и основной элемент общего мерзлотного мониторинга. На всех приведенных ниже рисунках построения выполнены до глубины 20 м. Для скипового ствола рудника Мир результаты приведены на рис. 1–3.

Программа “Термик” автоматически определяет наличие растепленных участков как во всем объеме температурного поля фундамента, так и вдоль каждой сваи. Для каждого такого участка определяется величина превышения его температуры над допустимой температурой (согласно Мерзлотной инспекции) и автоматически находится ближайшая к нему замораживающая колонка (см. рис. 2). Заметим, что на рис. 2 приведено не точное температурное поле, а некоторая его обработка, несущественно его искажающая. Данная информация (величина температурной аномалии и номер ближайшей колонки) по всем участкам отсылается на пульт управления замораживающей станции для увеличения мощности этих колонок с целью компенсации растепления. Аналогично находятся перемороженные участки грунтов фундамента; информация о номере(имени) ближайшей колонки с величиной температурной аномалии также отсылается на пульт замораживающей станции для снижения мощности этих колонок. Время работы замораживающей станции в новом режиме может оцениваться с учетом реактивности замораживающих импульсов, фактически по текущей скорости промораживания. Ско-

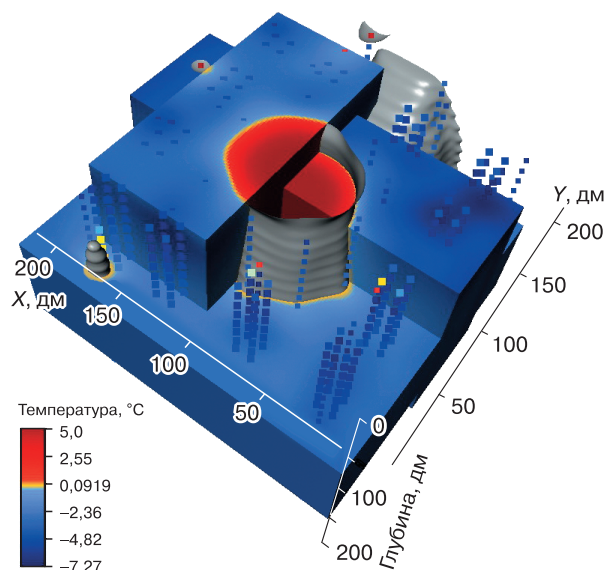


Рис. 1. Температурное поле грунтов фундамента скипового ствола с вентканалом рудника Мир.

Серый цвет – нулевая изотермическая поверхность; столбики – сваи фундамента.

рость промораживания грунтов в “Термик” определяется напрямую, численно, как скорость смещения нулевой изотермы за данный период времени (здесь не приводится).

При необходимости объемное температурное поле (с учетом увлажнения, засоленности, типа

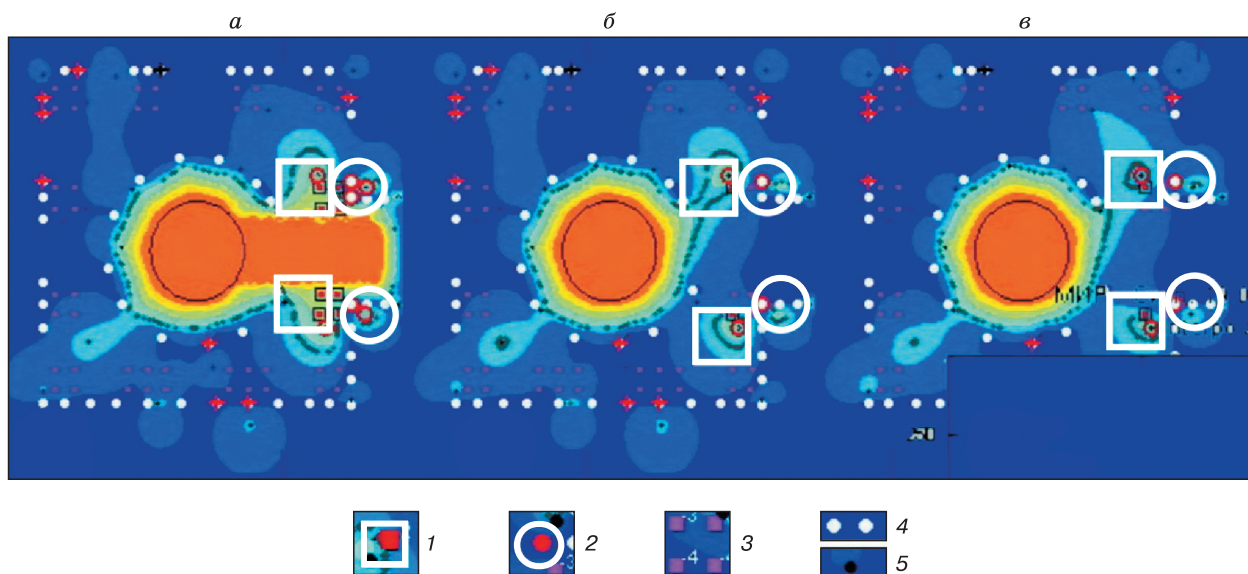


Рис. 2. Примеры (а–в) автоматического нахождения растепленных свай и ближайших к ним замораживающих колонок.

1 – найденные аварийные сваи; 2 – вычисленные ближайшие аварийные колонки; 3 – свайное поле; 4 – замораживающая система; 5 – термометрическая система.

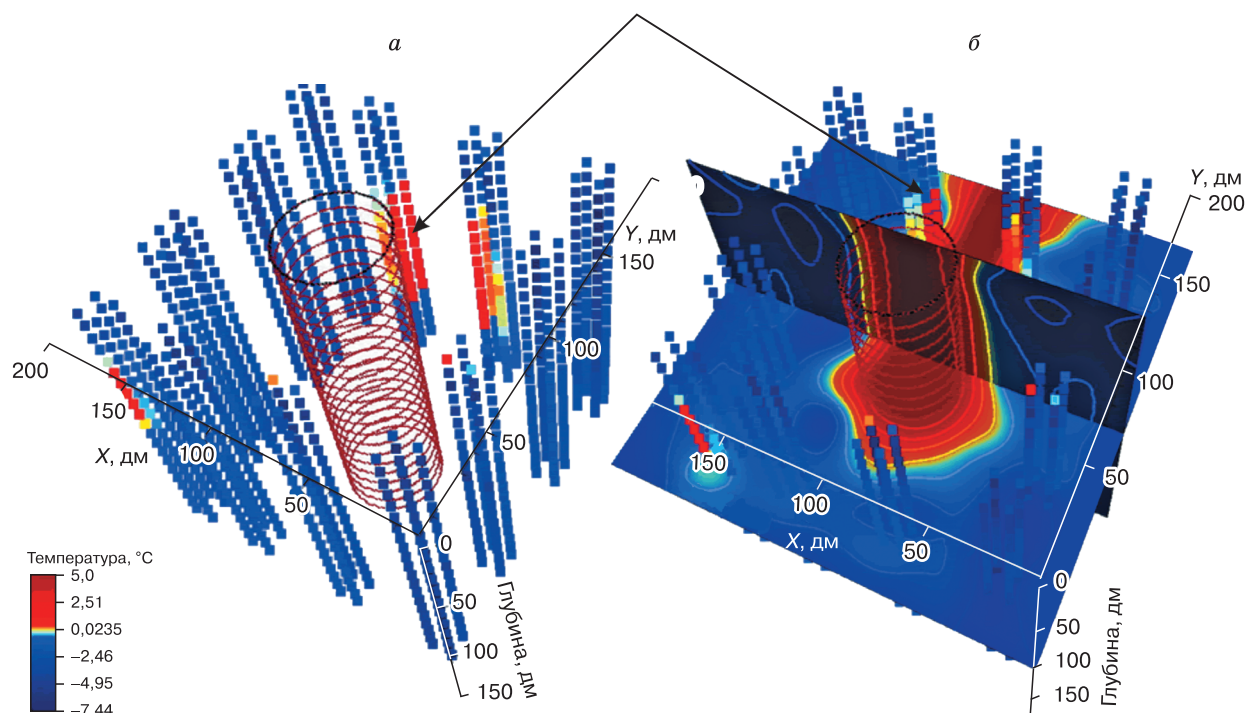


Рис. 3. Температурные сваи до глубин фундамента скипового ствола рудника Мир (а) и сечения его температурного поля (б).

Стрелками указаны anomalно растепленные сваи у вентканала

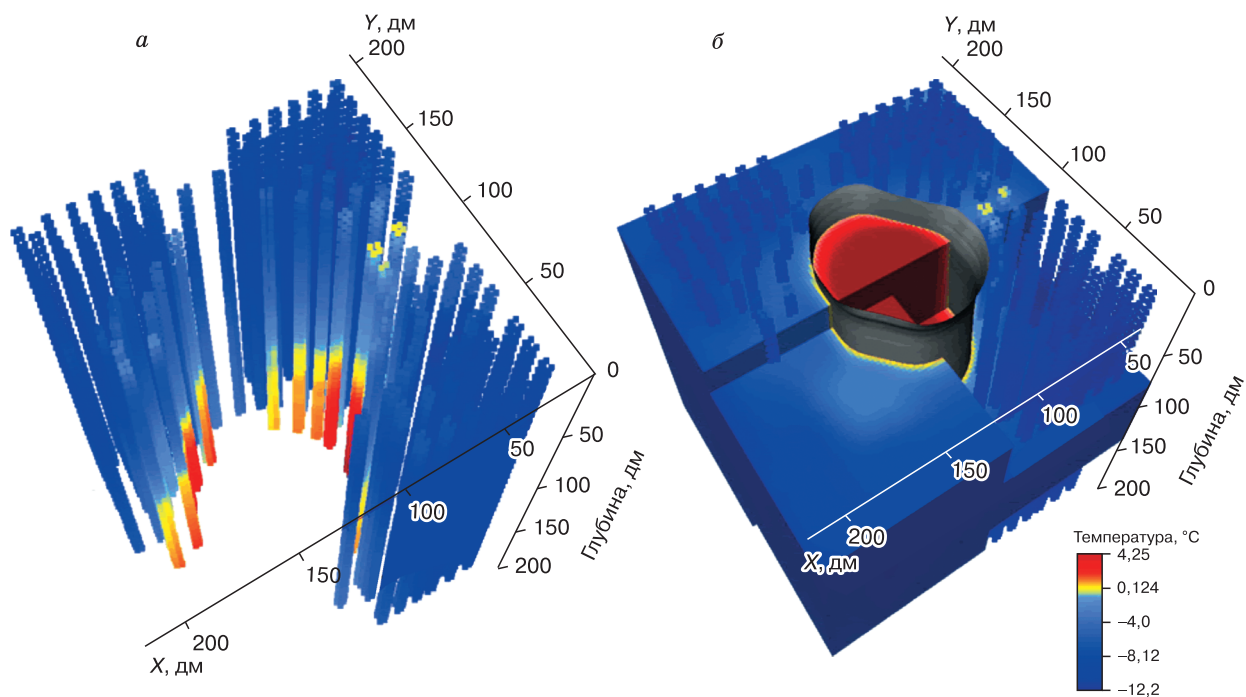


Рис. 4. Температурные сваи рудника Интернациональный (а) и температурное поле его фундамента с нулевой изотермической поверхностью (б).

грунтов и параметров свай) может быть пересчитано в несущие способности свай на основе известных формул, согласно нормативным документам. Переключение замораживающей системы осуществляется при достижении несущими способностями грунтов некоторого предела согласно нормативным документам (СНиП). Из методических соображений вне зоны действия СНиП нами используется температурный критерий, согласно которому температурное распределение вдоль свай рассматривается как первое приближение к критерию по несущим способностям. Интервал температур от -2 до 0 °C считается диапазоном потери сваями своих несущих способностей. Далее под термином “температурная свая” понимается цифровой температурный аналог реальной свай, получаемый как среднее по граням свай от выборки из температурного куба вдоль четырех граней свай. Для фундамента рудника Мир на рис. 3 для сравнения приведены температурные свай и сечения температурного поля фундамента.

Рудник Интернациональный представлен в цилиндрическом приближении, без конструкций типа вентканала (рис. 4), так как температурное поле цилиндрического теплового источника изучено наиболее полно. Тепловые аномалии (от -2 до 0 °C и выше) на температурных сваях прямо указывают на участки, на которые при расчете несущих способностей необходимо обратить особое внимание. Аналогично находятся перемороженные участки грунтов фундамента, а информация о номере ближайшей колонки с величиной температурной аномалии передается на пульт замораживающей станции для снижения мощности этой колонки.

Программа “Термик” ориентирована на цифровую версию системы термоконтроля, замеряющую температуры грунтов с произвольной, в том числе переменной, частотой. Для инженерной геокриологии это технически новый тип температурных данных, возможно телеметрических, с обработкой в режиме реального (или текущего) времени.

Комплекс контроля температурного состояния оснований сооружений позволяет решать следующие задачи.

1. Основная задача комплекса – оповещение системы геокриологической безопасности предприятия о наличии или непредвиденном возникновении растепленных грунтов участков свайного поля непосредственно по термометрическим скважинам и шпурам.

2. Опасность образования тепловых очагов, равноудаленных от термометрических скважин, состоит в том, что они могут развиваться по вертикали и не выявляются до тех пор, пока влияние уже сформировавшегося теплового источника в грунтах фундамента не распространится до бли-

жайшей измерительной скважины. Поэтому задача наилучшей интерполяции температурного поля по редким данным с целью обнаружения растепления всегда является актуальной.

3. Задача термостабилизации грунтов фундамента с учетом реактивного характера замораживающих импульсов [Порхаев, 1970] рассматривается как классическая задача САУ с прямой связью по температурным измерениям и обратной связью по режиму замораживающей станции. Вариант ее решения был описан выше.

При этом следует учитывать, что если для насыпных грунтовых плотин и дамб требуется глухая ледовая завеса, то на фундаментах рудников необходимо защитить ряд бетонных конструкций от перемораживания. Последнее обстоятельство приводит к необходимости поддержания несущих способностей свай в относительно узком интервале отрицательных температур. Кроме того, такая задача более сложна из-за реактивности замораживающих импульсов, наличия возможных участков засоления, значительной неравномерности промораживания объема грунтов фундамента (скорости промерзания).

4. Задача поддержания равномерного режима промораживания решается автоматизированным (программным) мониторингом скорости промерзания.

5. На основе пополняемой базы данных объемных температурных полей (“температурной истории”) комплекс “Термик” может проводить построение срезов температурного поля фундамента в произвольных сечениях при разных темпах его изменения во времени, характеризующих динамику так называемых “запасов холода” в грунтах фундамента. Кроме этого осуществляются прогноз динамики температурного поля и сверка текущей динамики температуры с ее прогнозными значениями.

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В настоящее время отчетность Мерзлотной инспекции большинства ГОКов в криолитозоне, как правило, ведется на уровне простейших температурных графиков. Но если свая находится в неопределенной зоне фазовых переходов, то при отсутствии пространственных температурных данных оценить вероятность ее геокриологической неустойчивости в случае необходимости будет очень сложно.

Трехмерные изотермические поверхности (трехмерное распределение фазовых переходов в объеме фундамента) в производственном процессе являются относительно новым инструментом, имеющим большие преимущества. Они дают целостное представление об особенностях распределения областей фазовых переходов сразу по всему

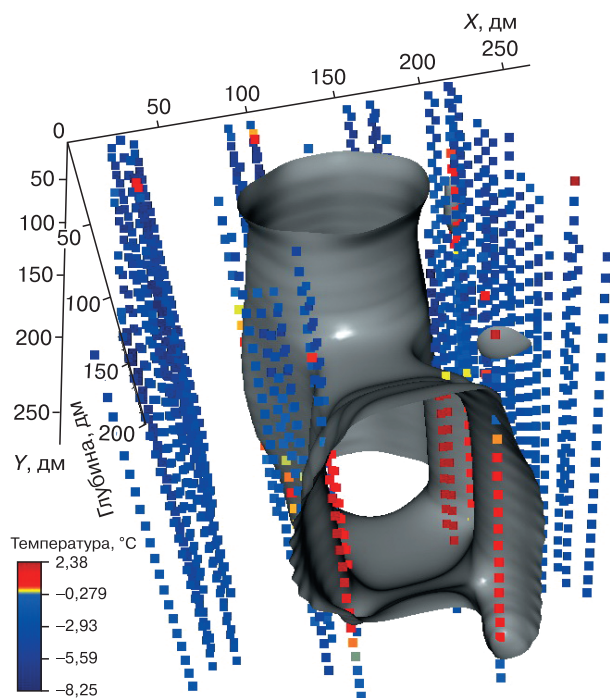


Рис. 5. Температурные сваи и изотермическая поверхность грунтов фундамента рудника Мир (скиповый ствол с вентканалом).

объему фундамента (рис. 5) и позволяют решать задачи, например, Мерзлотной инспекции на качественно новом уровне.

ВЫВОДЫ

Эксплуатацию фундаментов рудников в криолитозоне целесообразно осуществлять на основе систем термостабилизации грунтов фундаментов с применением современных логгерных термометрических систем, допускающих произвольную частоту измерений в зависимости от текущей инженерно-криогидрогеологической обстановки в грунтах [Лобанов и др., 2005]. По полученным данным предлагается строить объемные температурные поля и их производные (в частности, изотермические поверхности) в динамике. По температурным сваям необходимо выявлять (программно, автоматически) участки растепления (от -2°C и выше) как области потери реальными сваями своих несущих способностей. Эффективность, оперативность и надежность (исключается человеческий фактор) мониторинга мерзлотной обстановки на фундаментах рудников можно повысить за счет автоматизированной настройки режима замораживающей станции по прямой и обратной связи.

Возможные недостатки предлагаемого подхода, связанные, в частности, с большим объемом трехмерных данных, легко преодолеваются использованием общедоступной ЭВТ производственных организаций со стандартным программным обеспечением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были изложены технические характеристики системы термоконтроля, описан макет программного комплекса управления мерзлотной обстановкой фундаментов рудников Мир и Интернациональный (как прообраз специализированной САУ), а также приведены типичные объемные температурные поля и их особые области (температурные сваи, сечения, участки растепления и др.).

Авторы надеются, что представленные материалы будут полезны при разработке новых подходов к мониторингу мерзлотной обстановки на инженерных объектах в криолитозоне.

Литература

- Гальперин М.В. Автоматическое управление / М.В. Гальперин. М., Форум–Инфра–М, 2004, 223 с.
- Горелик Я.Б., Феклистов В.Н., Нестеров А.Н. Термостабилизация свайных фундаментов локального сооружения на мерзлых грунтах // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 4, с. 54–58.
- Дроздов А.В., Шубин Г.В., Кирюшин Д.И. Изменение температурных полей в криолитозоне при отработке алмазных месторождений Западной Якутии открытым способом (на примере трубки Удачной) // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 3–14.
- Камышев А.П. Методы и технологии мониторинга природно-технических систем севера Западной Сибири / А.П. Камышев. М., ВНИПИгаздобыча, 1999, 230 с.
- Кондратьева К.А., Коновалов А.А. Принципы управления мерзлотным процессом при освоении Средней Сибири // Геокриология СССР Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 409 с.
- Лобанов В.В., Мищенко Ю.В., Целлер Е.В., Сороченко М.К., Филатов А.П. Гидродинамические исследования эффективности замораживания интервала подмерзлотного водоносного комплекса при проходке клетьевого ствола рудника “Мир” // Горн. информ.-аналит. бюл., 2005, № 1, с. 177.
- Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны / А.В. Павлов. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 224 с.
- Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами / Г.В. Порхаев. М., Наука, 1970, 203 с.
- Растегаев И.К. Основы разработки грунтов и строительства фундаментов в криолитозоне. Т. 1. Строительные свойства грунтов криолитозоны / И.К. Растегаев. М., СИП РИА, 2001, 143 с.
- Трупаков Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве / Н.Г. Трупаков. М., Недра, 1974, 275 с.

Поступила в редакцию
17 июня 2012 г.