

Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы

Н. Н. Мельников¹, академик РАН, П. В. Амосов², кандидат технических наук, С. А. Гусак³, кандидат технических наук, Н. В. Новожилова⁴, С. Г. Климин⁵
Горный институт Кольского научного центра РАН

Представлен анализ результатов численных экспериментов по оценке теплового состояния многолетнемерзлых горных пород с учетом фазового перехода «лед-вода» для подземной атомной станции малой мощности. Рассмотрена возможность размещения реакторной установки малой мощности в труднодоступных северных регионах Восточной Сибири (Якутия, Чукотка).

Ключевые слова: атомные станции малой мощности, многолетнемерзлые горные породы, численное моделирование, фазовый переход, тепловое воздействие.

Введение

В ряде многочисленных исследований современного состояния экономики и топливно-энергетического комплекса Восточной Сибири и Дальнего Востока определенное место уделяется возможному использованию атомных станций малой мощности (АСММ). Например, в статье [10], подготовленной специалистами Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН и ОАО «Магадан-энерго», представлена карта-схема конкретных мест размещения перспективных источников малой мощности в восточных регионах, в том числе и АСММ. В частности, по оценкам авторов указанной статьи перспективными до 2030 г. площадями размещения на Востоке России атомных станций малой мощности являются:

- в Республике Саха (Якутия):
 - ▶ село Юрюнг-Хая (36 МВт) для освоения Томторского ниобий-редкоземельного месторождения;
 - ▶ село Усть-Куйга (30 МВт) для разработки Кючусского месторождения золота;

- ▶ поселок Тикси (12 МВт) для обеспечения энергетических нагрузок при возобновлении функционирования Северо-Восточного морского пути (заметим, что последнее становится весьма актуальным в связи с разработанным проектом государственной программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», внесенным в конце 2013 г. Министерством регионального развития для утверждения в Правительство РФ [5]);
- в Чукотском автономном округе:
 - ▶ поселок Песчаное (30 МВт) для освоения одноименного полиметаллического месторождения.

Одной из важных проблем применения атомных станций является обеспечение их безопасности и оценка потенциального воздействия на окружающую среду. Горный институт Кольского научного центра РАН наряду с другими институтами Академии наук имеет определенный научный потенциал и задел в решении вопросов обеспечения комплексной безопасности радиационно опасных объектов [6]. На рубеже 80—90-х годов прошлого столетия Горный институт в качестве головной организации при сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими

¹ e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

² e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru.

³ e-mail: gusnat@goi.kolasc.net.ru.

⁴ e-mail: nat1966kis@mail.ru.

⁵ e-mail: klimin@goi.kolasc.net.ru

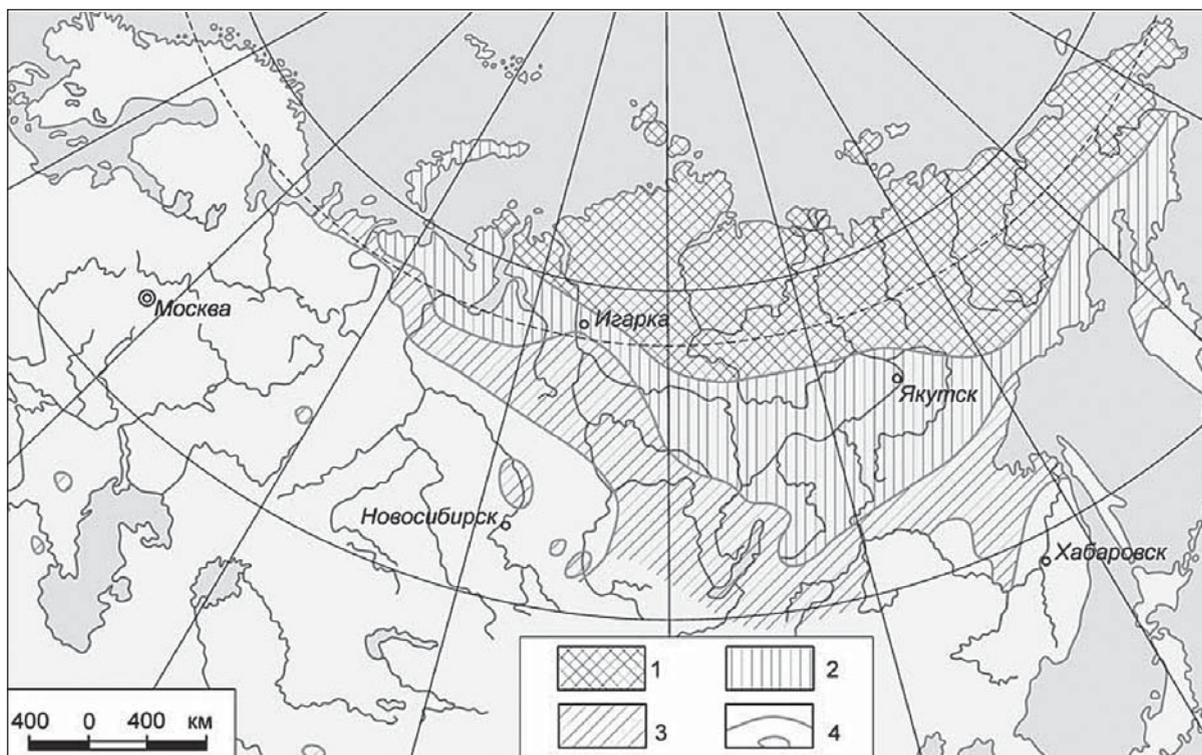


Рис. 1. Схематическая карта распространения вечной мерзлоты и преобладающих температур вечномерзлой толщи [1]: 1 – районы сплошной вечной мерзлоты с температурами на глубине 10–15 м от -10° до -5°C ; 2 – районы с таликами и температурами грунта на глубине 10–15 м от -5° до $-1,5^{\circ}\text{C}$; 3 – районы с преобладанием таликов (на юге только острова вечной мерзлоты) и с температурами грунта на глубине 10–15 м выше $-1,5^{\circ}\text{C}$; 4 – граница области и островов вечной мерзлоты

и технологическими организациями страны выполнил комплексные научно-исследовательские работы (НИР), направленные на обоснование основных положений концепции создания в СССР подземных атомных станций в рамках государственной научно-технической программы «Экологически чистая энергетика».

В настоящее время в Горном институте проводятся исследования, цель которых — разработка концепции и обоснование научных и инженерных основ проектирования и строительства заглубленных и подземных атомных станций малой мощности модульного типа для энергоснабжения горно-промышленных предприятий и населенных пунктов в труднодоступных регионах России. Сотрудники Горного института рассматривают некоторые районы размещения АСММ [7], предназначенные для энергоснабжения горнопромышленных предприятий на перспективных месторождениях полезных ископаемых, которые в основном совпадают с площадками, указанными в статье специалистов Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН [10].

Российские специалисты в качестве базовых и перспективных для исследований по выбору технологий АСММ рассматривают различные проекты реакторов малой мощности, например, КЛТ-40С

мощностью 150 МВт (тепл.), ВК-50 (150 МВт), АБВ-6М (38 МВт) и «УниTERM» (15—50 МВт) [11]. Анализ позволяет сделать вывод, что проводившиеся на протяжении последних 20—25 лет многочисленные разработки различных реакторных установок (РУ) для малой энергетики так и не продвинули распространение ядерных источников в этот сектор энергопотребления. Специалисты делают вывод, что основные причины лежат не в сфере проектных решений, а в области планирования, организации, инфраструктуры, эксплуатации и обслуживания, ответственности и владения реакторными установками [4; 12]. Так, в частности, на начало 2012 г. из базовых и перспективных РУ лицензию Госатомнадзора получила только установка КЛТ-40С для плавучей атомной станции. Из сообщения от 27 ноября 2013 г. [9] стало известно, что результаты инженерных изысканий в рамках запланированного строительства опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВБР-100) прошли государственную экспертизу. По мнению генерального директора ОАО «АКМЭ-инжиниринг» Владимира Петроченко, полученное заключение позволяет перейти к государственной экспертизе проектной документации на строительство энергоблока.

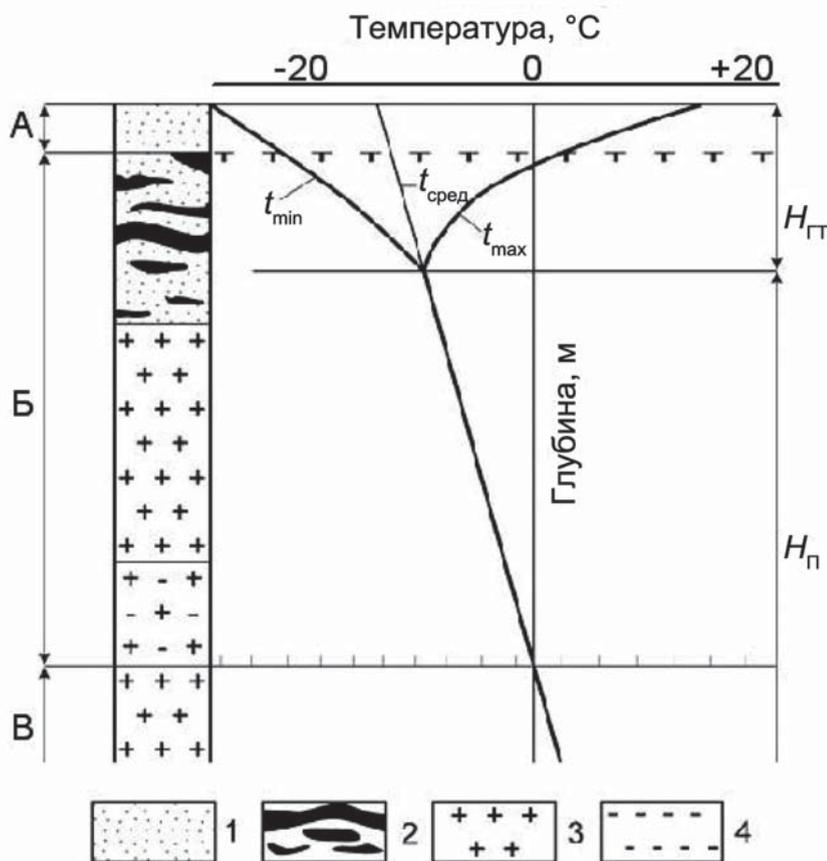


Рис. 2. Изменение температуры горных пород с глубиной и основные параметры криолитозоны и теплового поля верхних горизонтов литосферы [3]:
 1 – рыхлые грунты;
 2 – ледяные включения;
 3 – скальные породы;
 4 – рассолы;
 А – слой сезонного промерзания и оттаивания (деятельный слой);
 Б – криолитозона (вечная мерзлота);
 В – горные породы с положительной температурой, °С;
 $H_{ГТ}$ – мощность слоя годовых теплооборотов;
 $H_{п}$ – мощность слоя с постоянной температурой в конкретной точке

Одной из исследовательских задач в рамках НИР, выполняемой Горным институтом, является оценка теплового воздействия АСММ на вмещающие породные массивы. Речь идет о размещении АСММ в геологических формациях скальных и многолетнемерзлых горных пород (ММГП) в условиях режима нормальной эксплуатации объекта с учетом фазовых переходов и климатических особенностей регионов потенциальных районов. Очевидно, что с научных позиций более интересна задача, когда тепловой источник (в данном случае это модули АСММ) располагается в многолетнемерзлых горных породах (необходим учет фазового перехода «лед-вода»). Некоторые результаты выполненных изысканий представлены ниже.

Обсуждение исходных параметров модели атомной станции малой мощности и многолетнемерзлых горных пород

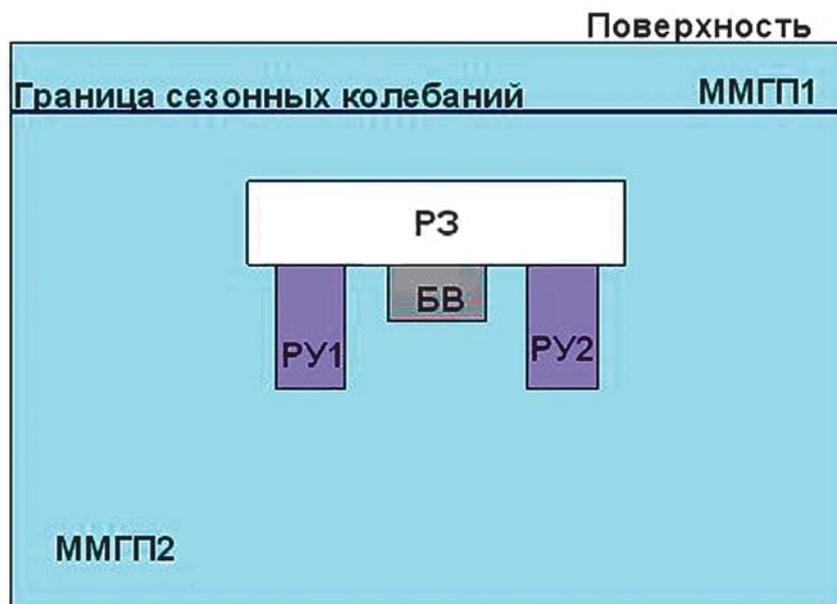
Оценка теплового воздействия АСММ на многолетнемерзлые горные породы, безусловно, представляет интерес, поскольку позволяет получить представление о размерах области протаивания этих пород вокруг подземного радиационно опасного объекта, а также определить скорость движения границы фазового перехода. В данной статье ограничимся исследованием теплового воздействия

станции на ММГП для режима нормальной эксплуатации. Для характеристики площадки размещения подземной АСММ на первоначальной стадии исследований предлагается воспользоваться представительным набором теплофизических параметров. Это возможно, поскольку значения основных параметров, используемых при численном решении тепловых задач (геотермический градиент, граница глубины сезонных колебаний температуры, мощность ММГП, среднегодовая температура воздуха) достаточно близки, но при этом практически всегда указываются интервалом.

Все упомянутые выше потенциальные территории размещения АСММ относятся к районам сплошной вечной мерзлоты с температурами на глубине 10—15 м от -10°C до -5°C (рис. 1) [1]. Для дальнейших расчетов воспользуемся данными, представленными в докладе С. Б. Карапетян с коллегами [2] (для района Билибинской АЭС, расположенной несколько севернее поселка Песчаное). Принимаем значение границы глубины сезонных колебаний порядка 12 м, а величину температуры на указанной глубине — -6°C . Мощность ММГП этого района составляет 250—450 м.

Типичное распределение температуры горных пород криолитозоны с глубиной представлено на рис. 2 [3]. Естественно, данное изображение всего лишь

Рис. 3. Принципиальная схема модели подземной АСММ



демонстрирует обобщенное строение криолитозоны и упрощенный график изменения температуры ММГП с глубиной. Из рис. 2 можно понять, что для выполнения численных расчетов температурных полей обязательно потребуются такие параметры, как геотермический градиент, граница глубины сезонных колебаний, мощность ММГП. Кроме того, в ряде расчетов весьма важную роль будет играть среднегодовая температура воздуха. Значительное количество публикаций по криолитозоне Сибири указывает, что геотермический градиент варьируется в интервале от $-0,015^{\circ}\text{C}/\text{м}$ до $-0,025^{\circ}\text{C}/\text{м}$, что позволяет в расчетах использовать значение $0,020^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

По мнению авторов, для исследования вопросов теплового взаимодействия модулей подземной АСММ и теплового состояния вмещающего массива представляется достаточным рассмотреть нестационарную тепловую задачу с учетом фазовых переходов «лед-вода» в двухмерной постановке. Упрощенная схема подземной АСММ, размещаемой в ММГП на глубине не менее 50 м (как того требуют строительные нормативы [8], применяемые для районов Крайнего Севера), представлена на рис. 3.

Подземная АСММ состоит из следующих модулей: реакторного зала РЗ размером 14×60 м, бассейна выдержки БВ размером 4×10 м и двух модулей с реакторными установками, размеры которых соответствуют размерам выбранных реакторов малой мощности. Расстояние между модулями РУ — 20 м. В принятой модели габариты модулей, указанных на рис. 3, в целом соответствуют аналогичным помещениям объектов с РУ типа КЛТ-40С.

Модель включает в себя два слоя вмещающего массива: ММГП1 — до границы сезонных колебаний (примерно 12 м при температуре -6°C) и ММГП2, нижележащий массив с постоянным геотермическим градиентом (на уровне $0,02^{\circ}\text{C}/\text{м}$). Пористость ММГП1 — 0,15, ММГП2 — 0,10. Слой обделки имеет толщину 1 м (для БВ — 0,5 м), слой теплоизоляции на примере полистирола — толщину 0,5 м. Теплофизические характеристики перечисленных слоев сведены в табл. 1.

В данной публикации обсуждается ситуация, когда температура во всех модулях АСММ поддерживается на комфортном для персонала уровне, т. е. примерно 20°C . Эта температура может быть обеспечена за

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов

Параметр	ММГП	Обделка	Теплоизоляция
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1,8	2,0	0,03
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	800	840	1200
Плотность, кг/м ³	2200	2500	100

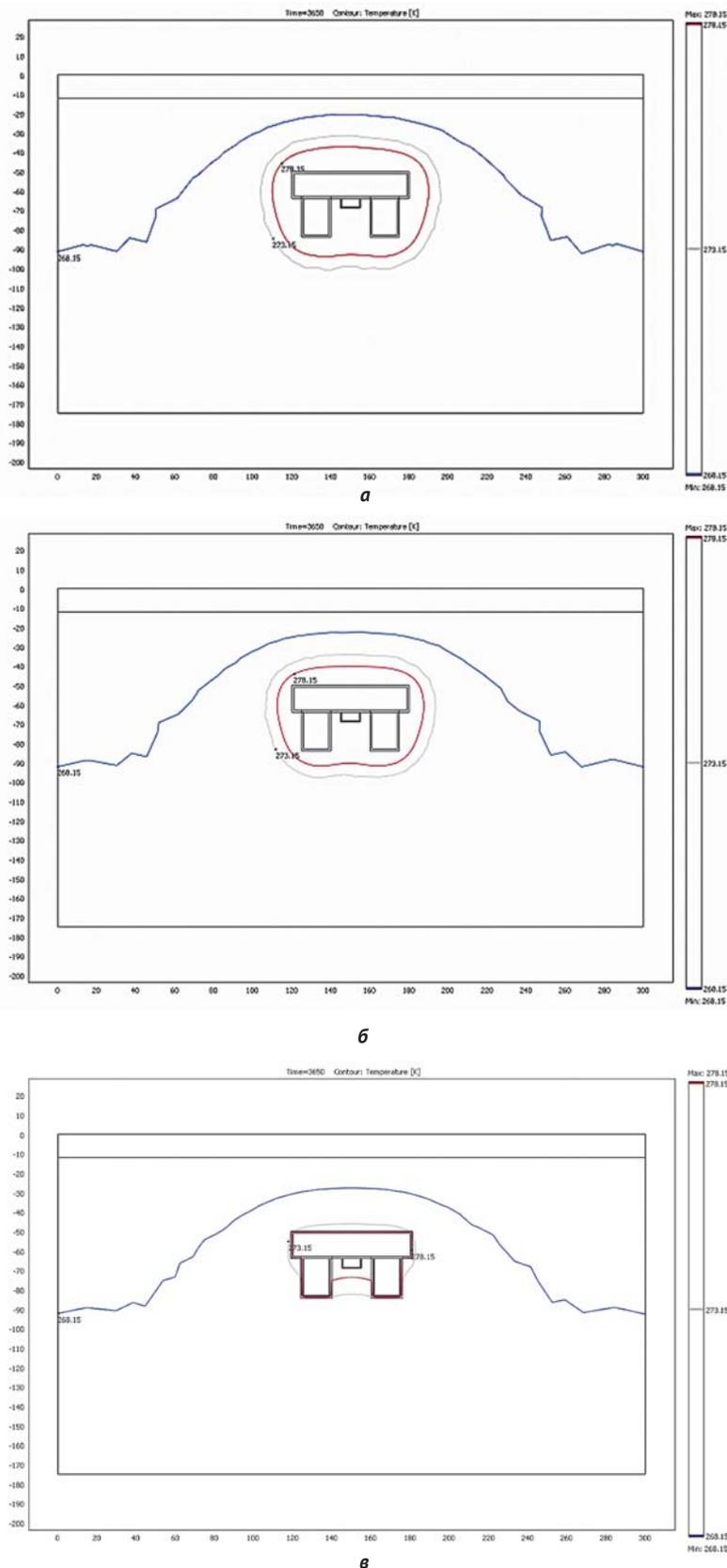


Рис. 4. Пространственное распределение изолиний температуры со значениями -5°C , 0°C и $+5^{\circ}\text{C}$ по всей области моделирования при температуре в модуле АСММ 20°C для варианта без слоя теплоизоляции. Коэффициент теплопроводности обделки: а — $2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, б — $0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, в — $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

счет определенного усовершенствования системы вентиляции (с учетом практически неиссякаемых запасов холода). В ходе выполнения исследований рассматривались ситуации, когда температура в модулях АСММ может быть выше (40°C и 60°C). Результаты этих исследований будут опубликованы позже.

Для решения тепловой задачи были определены граничные условия. На поверхности — условие третьего рода (коэффициент теплообмена порядка $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ и температура порядка $-11,6^{\circ}\text{C}$, что соответствует среднегодовой температуре в исследуемом районе). На боковых границах — нулевой поток. На нижней границе — фиксированная температура, определяющаяся глубиной границы и геотермическим градиентом. Начальные условия: для ММГП — температура середины слоев модели, для слоев обделки — 10°C . Продолжительность времени моделирования — порядка 10 лет.

В расчетах проварьирован коэффициент теплопроводности обделки: кроме значения из табл. 1 принимались значения $0,5$ и $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Рассмотрены два варианта моделей АСММ: со слоем теплоизоляции в модулях РУ и без него.

Основным «инструментом» выполнения численных экспериментов являлся код COMSOL. В принципе можно было воспользоваться либо программным продуктом PORFLOW, либо программой, разработанной авторами для оценки воздействия подземных атомных станций малой мощности на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Все эти программные продукты позволяют моделировать тепловые процессы с учетом фазового перехода «лед-вода». Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов показал приемлемую сходимость результатов численных экспериментов. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать информацию в требуемой графической форме.

Анализ результатов расчетов

Графическое изображение пространственного распределения изолиний температуры со значениями

-5°C, 0°C и +5°C по всей области моделирования для варианта без теплоизоляции представлено на рис. 4. Коэффициент теплопроводности обделки варьировался: 2 Вт/(м·К), 0,5 Вт/(м·К), 0,05 Вт/(м·К). В аналогичной форме на рис. 5 можно увидеть картину пространственного распределения тех же изолиний температуры для случая, когда есть слой теплоизоляции в виде полистирола толщиной 0,5 м.

Анализ результатов позволяет констатировать, что при всех рассмотренных значениях теплофизических параметров поровое пространство вокруг модулей АСММ будет заполнено водой.

Даже наличие слоя теплоизоляции не позволяет избавиться от воды в поровом пространстве массива вокруг модулей подземной АСММ. Самые обширные «влажные» области прогнозируются, естественно, при максимальном значении коэффициента теплопроводности обделки. Уменьшение значения коэффициента теплопроводности в четыре раза сокращает «влажную» область, но не столь значительно, как хотелось бы. При использовании в расчетах значения коэффициента теплопроводности на уровне 0,05 Вт/(м·К) размер «влажной» зоны заметно уменьшается, ее контуры приближаются к поверхностям модулей РЗ, БВ и РУ. Но «влажная» область по-прежнему сохраняется.

Оценить глубину протаивания в горизонтальном (расстояние до изолинии 0°C от левого модуля РУ на высотной отметке -75 м) и вертикальном (расстояние вниз до изолинии 0°C от середины основания этого же модуля) направлениях можно по рис. 4 и 5. В табл. 2 приведены прогнозные значения размеров «влажной» зоны в указанных направлениях с наличием и отсутствием слоя теплоизоляции с учетом вариации коэффициента теплопроводности обделки. В табл. 2 также приведены максимальная температура в точке с координатами (150 м, -74 м), которая находится в ММГП по центру БВ на расстоянии 5 м от основания.

Как графическое изображение прогнозной информации (рис. 4 и 5), так и табличная форма ее представления

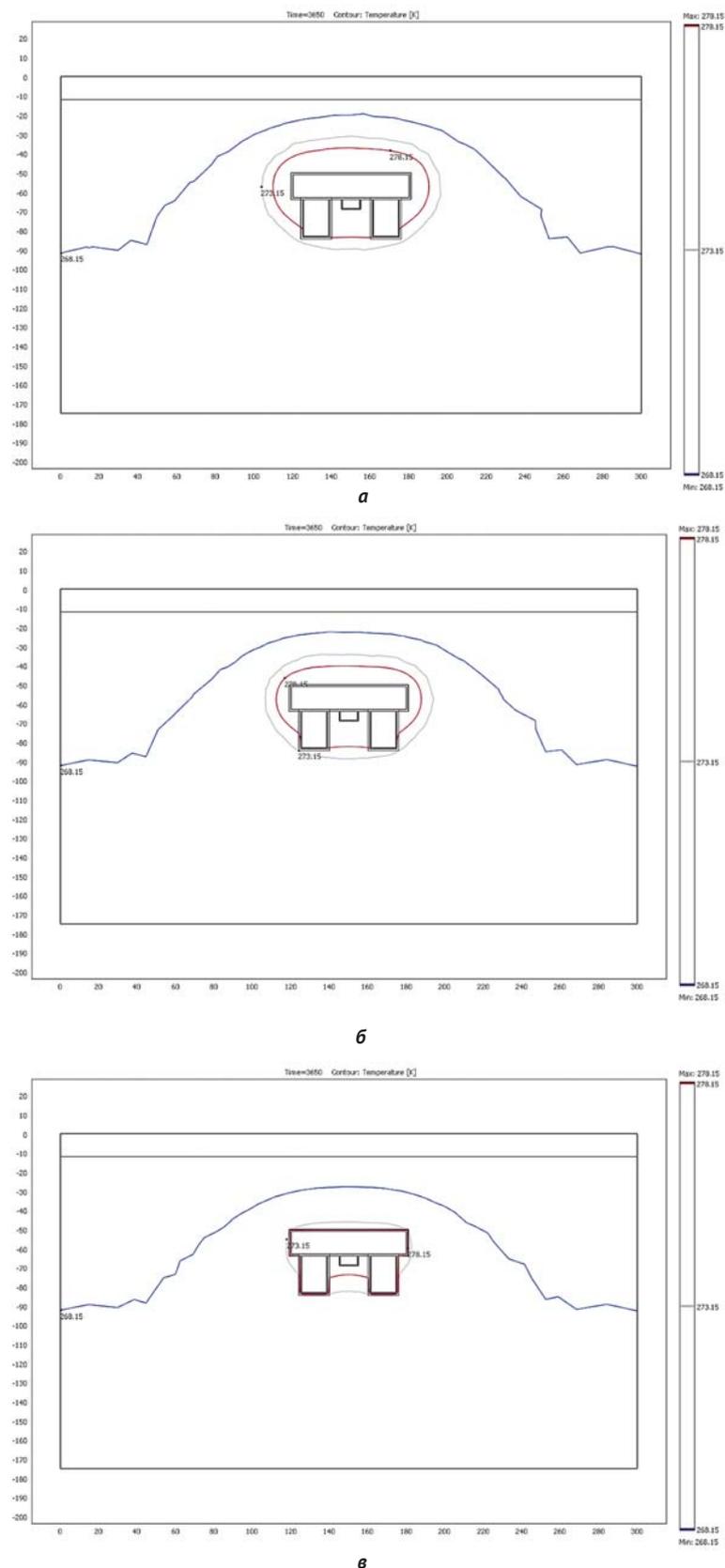
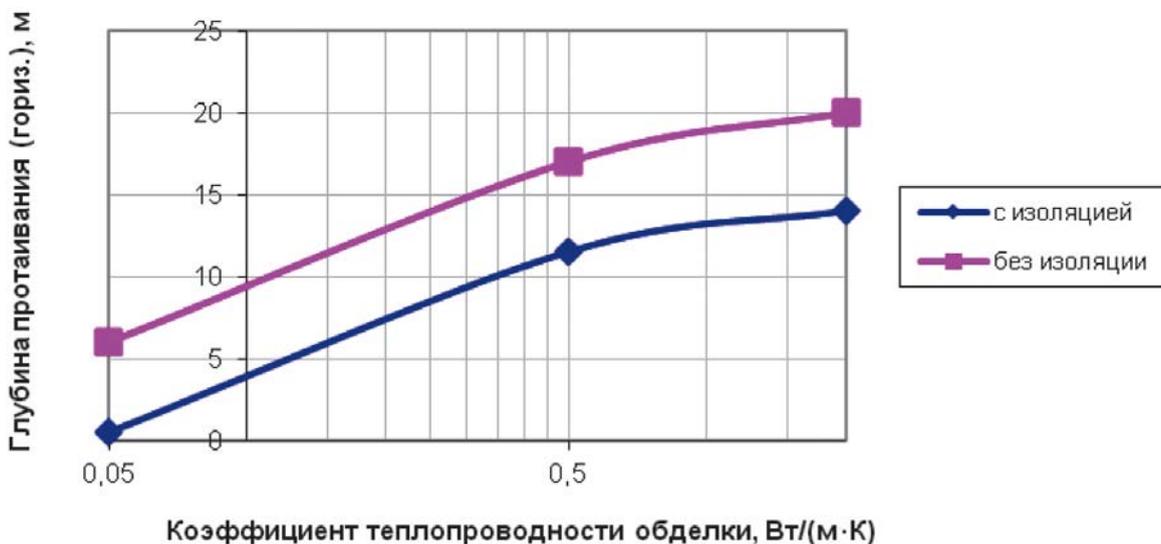
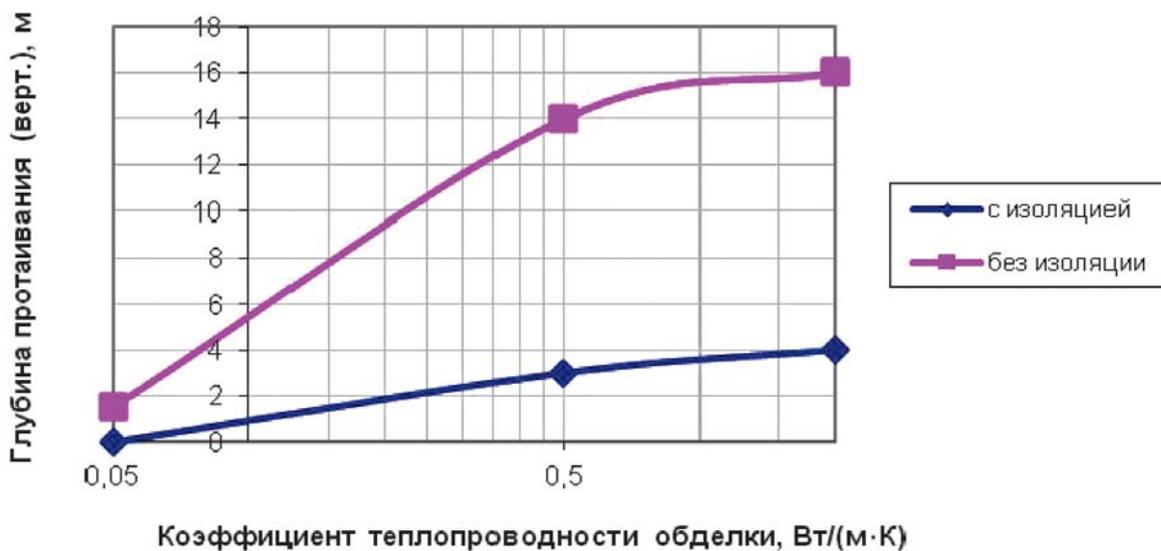


Рис. 5. Пространственное распределение изолиний температуры со значениями -5°C, 0°C и +5°C по всей области моделирования при температуре в модуле АСММ 20°C для варианта со слоем теплоизоляции. Коэффициент теплопроводности обделки: а – 2 Вт/(м·К), б – 0,5 Вт/(м·К), в – 0,05 Вт/(м·К)



а



б

Рис. 6. Зависимость глубины протаивания в горизонтальном (а) и вертикальном (б) направлениях с теплоизоляцией и без нее от коэффициента теплопроводности обделки при температуре модуля АСММ 20°С

Таблица 2. Прогнозные размеры «влажной» области и максимальной температуры в точке мониторинга при вариации коэффициента теплопроводности обделки

Прогнозный параметр	Коэффициент теплопроводности обделки, Вт/(м·К)			Условие прогноза
	2,0	0,5	0,05	
Размеры «влажной» области, м	~100×70	~94×64	~72×40	Отсутствие теплоизоляции
Максимальная температура, К	~291,6	~290,3	~278,3	
Размеры «влажной» области, м	~88×59	~83×54	~61×39	Наличие теплоизоляции
Максимальная температура, К	~287,4	~286,2	~277,9	

(см. табл. 2) убедительно показывают эффект как самого слоя теплоизоляции (его наличия и отсутствия), так и влияние коэффициента теплопроводности обделки.

На рис. 6 представлены графики глубины протаивания в горизонтальном и вертикальном направлениях в зависимости от коэффициента теплопроводности обделки (с теплоизоляцией и без нее).

Отметим некоторые особенности поведения представленных на рис. 6 расчетных кривых:

- нелинейность отклика системы на изменения коэффициента теплопроводности;
- глубина горизонтального протаивания при наличии теплоизоляции (рис. 6а) уменьшается почти на 6 м независимо от значения коэффициента теплопроводности обделки по сравнению с вариантом отсутствия теплоизоляции;
- эффект сокращения вертикального размера протаивания (рис. 6б) в зависимости от выбора материала обделки с разными значениями коэффициента теплопроводности в отсутствие теплоизоляции составляет не менее 14,5 м, а в варианте с теплоизоляцией аналогичный эффект более слабый — на уровне 4 м.

Заключение

По результатам представленных исследований по оценке теплового воздействия предложенного подземного варианта размещения АСММ на вмещающие многолетнемерзлые горные породы можно сделать следующие выводы.

Построены двумерные цифровые теплофизические модели с учетом фазового перехода «лед-вода» в программе COMSOL для предлагаемых вариантов (без теплоизоляции и с теплоизоляцией модуля РУ) подземной АСММ, размещаемой в ММГП на глубине 50 м от поверхности. Выполнены серии расчетов при вариации коэффициента теплопроводности обделки и фиксированной температуре в модулях АСММ на уровне 20°C.

Проведен анализ результатов численных экспериментов. Спрогнозированы размеры области протаивания вокруг модулей АСММ в рассмотренном сечении:

- максимальные размеры (~100×70 м) прогнозируются при использовании самых высоких значений коэффициента теплопроводности обделки — 2 Вт/(м·К);
- минимальные размеры «влажной» области (на уровне геометрических характеристик модулей АСММ) обеспечиваются использованием материалов с коэффициентом теплопроводности обделки на уровне сотых Вт/(м·К) и температурой в модулях АСММ на уровне 20°C.

Литература

1. Браун Дж., Граве Н. А. Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера. — Новосибирск: Наука, 1981. — 88 с.
2. Караетян С. Б., Лопатин П. В., Парфенов В. П., Гармашева Н. В. Возможности создания опытно-промышленного объекта подземной изоляции ОЯТ и ТРО в толще многолетнемерзлых пород // <http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Present12/Karapetan.ppt>.
3. Кершенгольц Б. М., Иванов Б. И., Десяткин Р. В. и др. Использование естественного холода многолетнемерзлых пород для длительного хранения генетических ресурсов // Вестник ВОГиС. — 2008. — Т. 12, № 4. — С. 524—532.
4. Кривицкий И. С. В роли Золушки пребывает пока в нашей стране малая энергетика // Атом. стратегия XXI. — 2005. — № 2 (16). — С. 5—6 (http://www.proatom.ru/files/as16_01_08.pdf).
5. Кривошапко Ю. Лед тронулся // Рос. газ. — 2013. — 22 нояб.
6. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. и др. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на европейском севере России. — Апатиты: КНЦ РАН, 2010. — 305 с.
7. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Гусак С. А., Наумов В. А. Подземные атомные станции малой мощности для энергоснабжения горнопромышленных предприятий в труднодоступных регионах России: Ч. 1 // XVI межрегион. науч.-практ. конф.: тез. докл., 16—18 апр. 2013 г. — Апатиты: КФ ПетрГУ, 2013. — С. 38—39.
8. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии: ТСН 31-323-2002 Республики Саха (Якутия). — Якутск, 2002 (http://www.complex-doc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye_obekty_v_gornykh_vyrabotkakh_kriolitozony_yakutii.pdf).
9. Получено положительное заключение Главгосэкспертизы по проекту СВБР-100 // <http://www.nuclear.ru/rus/press/nuclearenergy/2132705/>.
10. Санеев Б. Г., Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Франк М. И. Приоритеты использования атомных станций малой мощности на Востоке России // Атом. энергия. — 2011. — Т. 111, вып. 5. — С. 276—281.
11. Саркисов А. А. Новое направление развития — атомных станций малой мощности // Атом. энергия. — 2011. — Т. 111, вып. 5. — С. 243—245.
12. Сидоренко В. А. Задачи, проблемы и возможности создания атомной энергетики малых мощностей // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М.: Наука, 2011. — С. 79—87.