

УДК 551:622

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-6-85-95

## МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД: ОТ ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ОБСАДКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДО РАЗМЕРОВ ПЛОЩАДКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Сергей Николаевич Булдович<sup>1</sup>✉, Анатолий Викторович Брушков<sup>2</sup>,  
Владимир Александрович Дубровин<sup>3</sup>, Михаил Николаевич Железняк<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ser\_bul@rambler.ru✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; brouchkov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6437-064X>

<sup>3</sup> Гидроспецгеология Минприроды РФ, Москва, Россия; dva946@yandex.ru

<sup>4</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия; fe1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

**Аннотация.** В статье на основе численного моделирования выполнена количественная оценка влияния кондуктора на результаты измерения температуры в скважине, а также обсуждается влияние конвекции и положения датчиков в технической колонне. Рассмотрены также вопросы расположения и количестве наблюдательных скважин в природном комплексе (микроландшафте) и размеры площадок наблюдений. Показано, что в некоторых случаях кондуктор (обсадная колонна) могут изменять результаты термометрических измерений, и его влияние необходимо учитывать.

**Ключевые слова:** вечная мерзлота, температура многолетнемерзлых пород, термометрическая скважина, кондуктор, мониторинг

**Для цитирования:** Булдович С.Н., Брушков А.В., Дубровин В.А., Железняк М.Н. Мониторинг температуры многолетнемерзлых пород: от теплового влияния обсадки на результаты измерений до размеров площадки исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 6. С. 85–95.

## PERMAFROST TEMPERATURE MONITORING: FROM THERMAL INFLUENCE OF CASING ON MEASUREMENT RESULTS TO RESEARCH SITE SIZE

**Sergey N. Buldovich<sup>1</sup>✉, Anatoli V. Brouchkov<sup>2</sup>, Vladimir A. Dubrovin<sup>3</sup>,  
Mikhail N. Zheleznyak<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ser\_bul@rambler.ru✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; brouchkov@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6437-064X>

<sup>3</sup> Gidrospetsgeologiya, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Moscow, Russia; dva946@yandex.ru

<sup>4</sup> Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia; fe1956@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

**Abstract.** This article, using numerical modeling, quantitatively assesses the influence of the casing on temperature measurement results in a borehole. The influence of convection and the position of temperature sensors are also discussed. The location and number of monitoring boreholes in the natural landscape and the size of the observation sites are also considered. It is shown that in some cases, the casing can alter the temperature measurement results, and its influence must be taken into account.

**Keywords:** permafrost, permafrost temperature, thermometric borehole, casing, monitoring

**For citation:** Buldovich S.N., Brouchkov A.V., Dubrovin V.A., Zheleznyak M.N. Permafrost Temperature Monitoring: From the Thermal Effect of Casing on Measurement Results to the Size of the Study Site. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 6: 85–95. (In Russ.).

**Введение.** Измерения температур начались в области распространения вечной мерзлоты в начале XX в. назад по инициативе различных научных организаций, в том числе с требованиями нормативных документов СССР об организации мерзлотных станций при крупном строительстве. Программой работ на таких станциях предусматривалось изучение температурного режима многолетнемерзлых пород (ММП), динамики глубины сезонно-тального слоя (СТС), снегомерная съемка, определение тепловых потоков, теплофизических свойств грунтов и другие

наблюдения. Однако, методика этих работ не была регламентирована и имела ведомственный характер.

Согласно Поручению № 1971 Президента РФ Росгидрометом сегодня используется методический документ [РД52-17.925-2023] в качестве основы для организации мониторинга вечной мерзлоты на площадках ведомственной наблюдательной сети. Этот документ предполагает: 1) перекрытие технической колонны из полиэтилена диаметром 50–60 мм металлическим кондуктором диаметром 108–146 мм с заглублением его до 5 м; 2) установ-

Таблица 1

## Теплофизические свойства грунта и металла обсадной трубы

	Теплопроводность талых пород, Вт/(м·°C)	Теплопроводность мерзлых пород, Вт/(м·°C)	Теплоемкость талых пород, кДж/(м <sup>3</sup> ·°C)	Теплоемкость талых пород, кДж/(м <sup>3</sup> ·°C)	Теплота фазовых переходов влаги, кДж/м <sup>3</sup>
Супесь	1,3	1,6	2520	2160	90000
Сталь	60	60	3600	3600	-

ку датчиков в технической колонне: от 0 до 3,2 м глубины — 15 датчиков, до 5 м — 19 датчиков, до 10 м — 24 датчика и до 25 м — 32 датчика; 3) использование всего одной скважины глубиной 25,2 м на территории, прилегающей к метеостанции; 4) размеры площадки для мониторинга СТС  $50 \times 50$  м. Предполагается, что использование металлического кондуктора не приводит к заметному изменению теплового режима грунтов. Это, однако, требует расчетного и экспериментального обоснования. Вопрос о конструкции термометрических скважин стоит сегодня остро не только для фонового, но и геотехнического мониторинга (ГТМ). В настоящей работе выполнена количественная оценка влияния кондуктора на результаты измерения температуры, а также обсуждаются некоторые другие связанные с методикой измерения вопросы.

#### Расчетная схема оценки влияния кондуктора.

Для исключения воздействия искажающих факторов расчетная схема была упрощена. Скважина имеет цилиндрическую форму одинакового по глубине диаметра. В скважине размещена труба, плотно (без зазоров) контактирующая с прилегающим грунтом, верхний торец трубы расположен на уровне земной поверхности. Для расчетов принят диаметр скважины и трубы 0,15 м, толщина стенки последней принималась равной 5 или 10 мм (стандартная толщина стенки труб диаметром 146 мм составляет 6,5–10,7 мм [ГОСТ 31446-2017]). Геологический разрез в модели считается однородным в расчетной области, он представлен типичной по своим свойствам влажной супесью, теплофизические свойства грунта и материала трубы (сталь) приведены в табл. 1.

Влияние обсадки исследовалось методом численного моделирования теплообмена в грунтах в рамках осесимметричной задачи. Размеры расчетной области по вертикали составляли 10 м, по горизонтали (по радиусу) 1,5–2,0 м. Последний размер корректировался в процессе моделирования по условию отсутствия теплового влияния трубы на этом расстоянии от ее оси.

На внутренней стенке трубы задавалось условие теплоизоляции (нулевое граничное условие II рода), поскольку считается, что иные тепловые процессы в стволе исключены, датчик температуры имеет малую теплоемкость и измеряет температуру непосредственно на внутренней стенке трубы. На нижней и боковой поверхностях расчетной области, имеющей форму цилиндра с цилиндрической выемкой (скважина) на оси, принималось условие теплоизоляции. На верхней границе области за-

давались в разных вариантах расчетов граничные условия I и III рода. Размеры расчетных блоков по горизонтали в примыкании к трубе составляли первые миллиметры (от 1 мм), увеличиваясь к внешней границе. Расчеты осуществлялись с использованием двух компьютерных программ, разработанных на кафедре геокриологии МГУ [Хрусталев и др., 1994; Песоцкий, 2016]. Осуществлялось решение ряда тепловых задач, основные из которых рассмотрены ниже.

**Исследование температурного режима грунтов без фазовых переходов.** Для надежного выделения влияния на температурное поле металлической обсадки решалась задача изменения температуры в области с изначально постоянной температурой пород после скачкообразного ее изменения на поверхности. Этот скачок сопровождается движением температурной волны вглубь области и позволяет отследить особенности теплового влияния трубы. Моделировалась ситуация с повышением температуры поверхности пород  $t_n$  до  $15^{\circ}\text{C}$  при начальной температуре массива талых пород  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ . Постоянная температура  $t_n$  задавалась на всей верхней границе, включая торец обсадной трубы. Труба размещалась или на всю глубину скважины, или в выбранном интервале глубин.

Температурное влияние металлической обсадки  $\Delta t$  определялось путем сравнения  $t_n$  на контакте с внешней границей трубы с  $t_n$  на той же глубине на удалении от трубы, где ее влияние полностью отсутствует. Следует отметить, что температура на внешней поверхности обсадной трубы и на ее внутренней поверхности, где происходит измерение температуры, практически одинакова. Результаты расчетов показаны на рис. 1.

Из результатов следует, что температурное влияние даже относительно тонкостенной трубы (5 мм) в верхних горизонтах может искажать естественное температурное поле более, чем на  $1^{\circ}\text{C}$  на глубине 0,6–0,7 м от поверхности. Ошибка термометрических измерений в случае трубы толщиной 10 мм может превышать  $2^{\circ}\text{C}$  и распространяться на более глубокие горизонты. Однако, в обоих случаях со временем эта разница температур уменьшается, а максимум отклонений смещается в глубину (рис. 1, б, в). Для принятых в задаче условий в случае тонкостенной трубы разница температур  $\Delta t = 0,1^{\circ}\text{C}$  (точность датчиков) прослеживается до глубины 2,3–2,5 м (рис. 1, б). При этом через 20–25 суток нагревания массива влияние трубы становится меньше точности измерения температуры во всем интервале глубин.

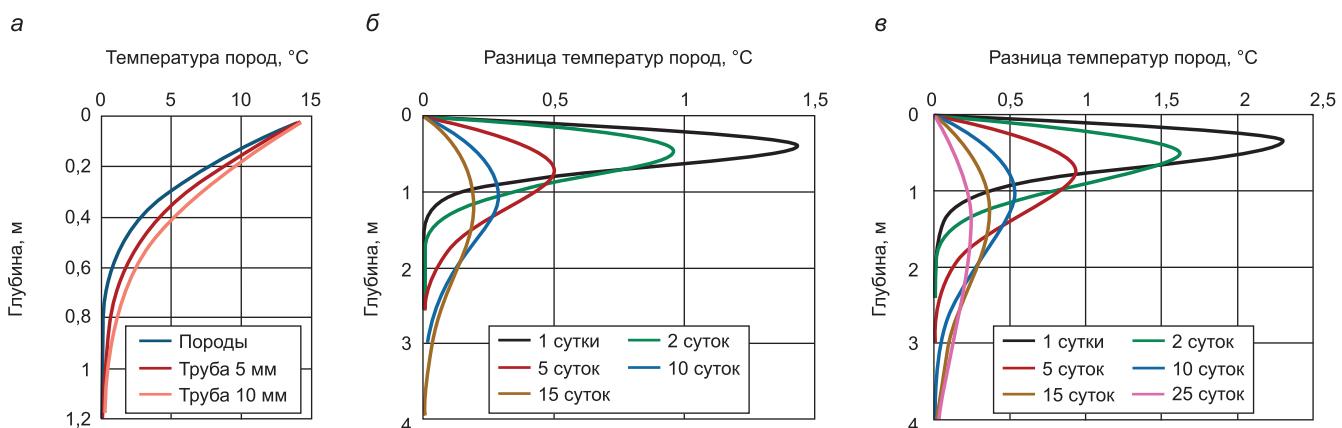


Рис. 1. Температура и разница температур на контакте грунта с трубой и вне зоны ее теплового влияния: *а* — температура на конец первых суток нагревания массива при толщине стенок трубы 5 и 10 мм; разница температур грунта  $\Delta t$  на контакте с трубой и вне зоны ее влияния на различные моменты времени после начала нагревания при толщине стенок трубы соответственно 5 мм (*б*) и 10 мм (*в*)

В случае толстостенной трубы глубина искажения температурного поля, превышающая точность измерений, прослеживается до 3–3,5 м (рис. 1, *в*).

Наличие вертикального теплопереноса в двух параллельных проводниках тепла с различной теплопроводностью (труба и окружающий грунт) приводит к взаимодействию между ними с формированием горизонтальной составляющей движения тепла. Эта составляющая и образует разность температур на стенке трубы и в грунте на удалении от скважины. Чем выше интенсивность основного вертикального теплового потока, тем выше и горизонтальная составляющая теплообмена между трубой и окружающими грунтами, формирующая наблюдаемую разность температур  $\Delta t$ . Таким образом, на фоне понижения градиента температуры влияние трубы на результаты измерений уменьшается.

Принятое в задаче длительное постоянство температуры на поверхности грунта не характерно для природных условий, где происходят суточные и другие короткопериодные колебания, что приводит к формированию в приповерхностных горизонтах отличий температуры в скважине от таковых в массиве грунта. Особенно это характерно для слоя суточных амплитуд температурных колебаний мощностью около 1 м.

**Влияние обсадных труб в условиях промерзания пород.** Для анализа влияния обсадной трубы на температурное поле рассматривались также условия промерзания массива талых пород после скачкообразного понижения температуры на дневной поверхности до отрицательного значения. В этом случае происходит монотонное движение фронта промерзания вглубь, что позволяет проанализировать влияние металлической трубы на температурное поле без влияния иных факторов. Как показывают результаты решения серии задач, при этом наблюдаются различия в условиях теплообмена для случаев наличия и отсутствия на поверхности пород теплоизолирующих покровов. Ниже рассмотрена специфика влияния обсадки

при оголенной поверхности пород и наличии на ней снежного покрова.

**Влияние обсадной трубы при оголенной поверхности пород.** Рассматривается промерзание массива пород с температурой  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  после мгновенного понижения температуры на поверхности до  $-15^\circ\text{C}$ . Остальные характеристики, включая теплофизические свойства пород и металла, размеры и конфигурация расчетной области, толщина стенки трубы, остаются теми же, что и ранее.

Результаты моделирования показывают более сложную картину влияния трубы, нежели в случае изменения только температуры пород. Указанное влияние в условиях изменения фазового состояния пород в расчетной области оказывается заметно более существенным, причем это относится как к температурному полю горных пород, так и к глубинам их промерзания.

На рис. 2, *а* приведены температурные кривые, построенные на момент времени 10 суток от начала промерзания для горных пород на контакте со стенкой трубы и для пород, находящихся заведомо вне зоны влияния трубы.

Максимальные различия температур приурочены к глубине расположения естественного фронта промерзания (здесь 0,64 м) и уменьшаются при удалении от фронта как вверх, так и вниз. Так, для тонкостенной трубы (5 мм) фронт промерзания на контакте с обсадной трубой расположен на глубине 0,90 м. Разница температур на уровне фронта естественного промерзания максимальна и превышает  $\Delta t = 1,5^\circ\text{C}$ . Отметим также, что разница глубин промерзания в данный момент времени составляет  $\Delta\xi = 0,26$  м (40 % от глубины естественного промерзания) — это величина ошибки определения глубины промерзания пород термометрическим методом, связанная с влиянием металлической трубы. Для более массивной обсадной трубы фронт промерзания на контакте с ней расположен на глубине 1,1 м, а разница температур на глубине естественного промерзания равна  $2,8^\circ\text{C}$ .

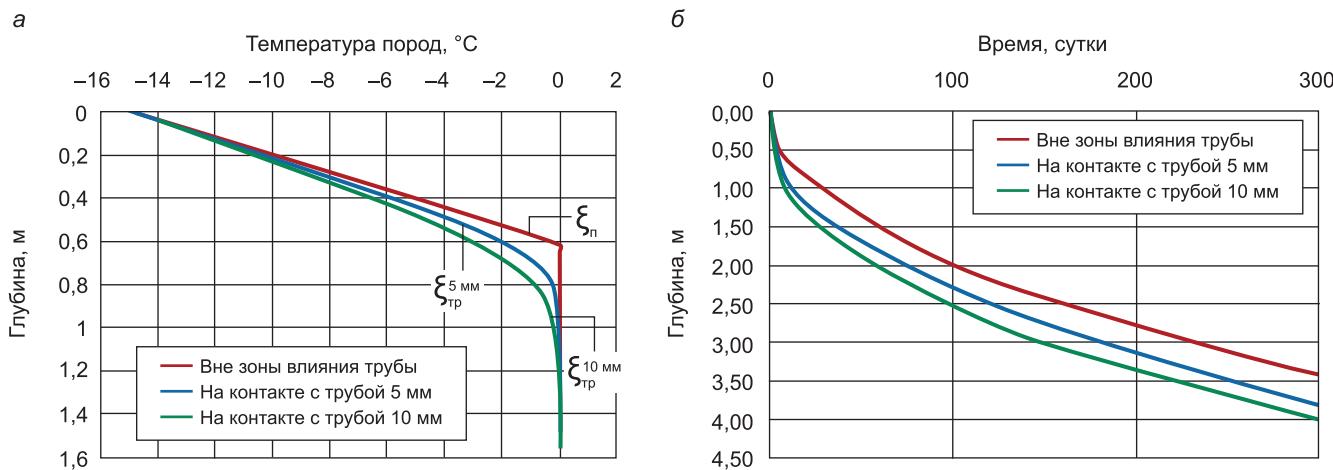


Рис. 2. Температура горных пород на контакте с обсадной трубой и вне зоны ее теплового влияния на 10 сутки от начала промерзания ( $\xi_{\text{тр}}^{5 \text{ мм}}$  и  $\xi_{\text{тр}}^{10 \text{ мм}}$  — глубины промерзания на контакте со стенкой труб с толщиной стенки 5 и 10 мм;  $\xi_{\text{п}}$  — естественная глубина промерзания на удалении от скважины) (а); б — динамика промерзания на контакте с обсадной трубой и на удалении от нее (для труб с толщиной стенки 5 и 10 мм)

Такая концентрация влияния трубы в зоне фронта промерзания связана с резким изменением градиента температур (перегиба температурной кривой), который формируется на фронте фазовых переходов, представляющим собой плоский источник (сток) тепла. Тепловой поток по металлу трубы, где фазовые переходы отсутствуют, осуществляется «транзитный» перенос тепла через фронт промерзания из талой в мерзлую зону, формируя опережающее промерзание горных пород в узкой зоне вдоль ствола скважины и «спрятывая» перегиб температурной кривой (рис. 2, а).

В процессе моделирования промерзания массива для длительных сроков получены неожиданные результаты. Так, на рис. 2, б показана динамика движения фронта промерзания на границе с трубой и вдали от последней. Видно, что разница глубин промерзания  $\Delta\xi$  со временем не только не сокращается по мере удаления фронта промерзания от поверхности, но, напротив, возрастает, составляя для трубы с толщиной стенки 5 мм в среднем  $\Delta\xi = 0,3$  м, а для более массивной трубы толщиной 10 мм  $\Delta\xi = 0,5$  м. При этом фронт промерзания достигает глубины 3,5–4 м, т. е. расположен довольно глубоко от поверхности.

Не менее интересна и динамика разности температур на контакте с трубой и в естественных условиях. На рис. 3 показаны экстремумы разности температур  $\Delta t$  с уменьшением со временем и глубиной их абсолютной величины. Экстремумы  $\Delta t$  по глубине совпадают с положением фронта промерзания на этот момент. Важно то, что разность температур в случае промерзания больше и распространяется заметно глубже, нежели в случае только нагревания (или охлаждения) пород.

Выявленные особенности плохо согласуются с представлениями о том, что роль металлической трубы в нарушении естественного температурного режима в прискважинной зоне связана с передачей по ней температурного воздействия с поверхности

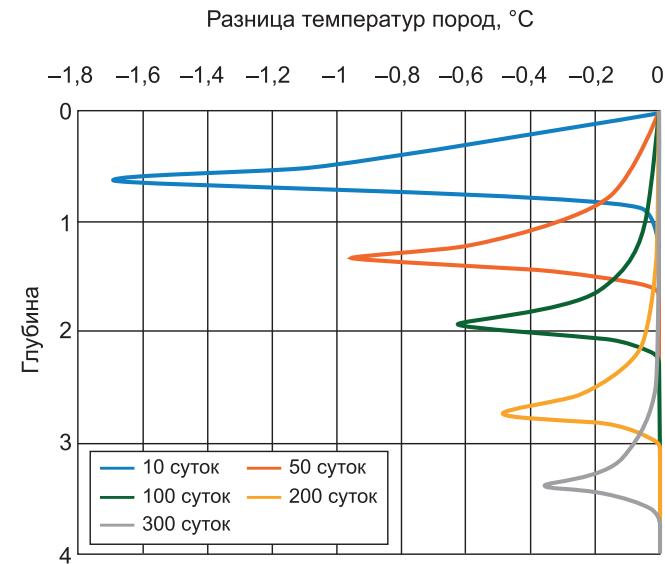


Рис. 3. Разница естественных температур горных пород на стенке трубы и температур в массиве горных пород на той же глубине на разные моменты времени (для трубы с толщиной стенки 5 мм)

массива. Для прояснения этих представлений получено решение задачи промерзания, аналогичной рассмотренной выше, но при этом обсадная труба задавалась не по всей глубине скважины, а размещалась в виде отрезка длиной в 1 м с заглублением верхнего торца на 1 м от поверхности. Таким образом, тепловая связь трубы с поверхностью практически разрывалась.

На рис. 4 показана динамика промерзания на стенке скважины и на удалении от нее. При прохождении фронтом промерзания зоны расположения отрезка трубы формируется разность глубин промерзания, причем ее величина достигает для труб с толщиной стенки 5 и 10 мм соответственно значений  $\Delta\xi = 0,28$  и  $0,42$  м, т. е. величин, близких к полученным при обсадке скважины трубой от поверхности (рис. 2, б). После прохождения фронтом

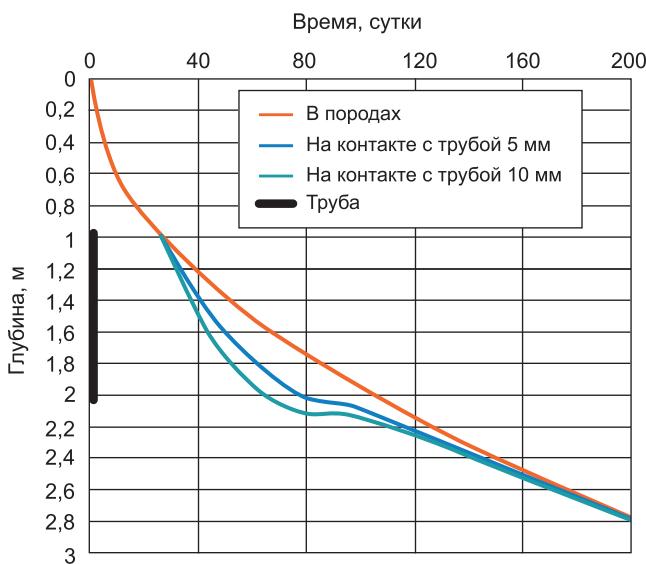


Рис. 4. Влияние на глубину промерзания обсадной трубы, расположенной в интервале глубин от 1 до 2 м (для труб с толщиной стенки 5 и 10 мм)

промерзания нижнего торца трубы разность  $\Delta\xi$  начинает уменьшаться и на глубине 2,5–3 м исчезает.

Этот результат свидетельствует о том, что влияние поверхности не играет заметной роли — металлическая труба из-за высокой теплопроводности обеспечивает опережающее промерзание пород вдоль ствола в любом случае. Установлено, однако, что этот эффект реализуется только при наличии движущегося фронта промерзания, на котором происходит скачок градиента температуры, связанный с выделением тепла фазовых переходов воды.

**Особенности влияния обсадной трубы на температурное поле и промерзание горных пород при наличии слоя теплоизоляции на поверхности.** В ходе моделирования выявлены важные особенности искажения температурного поля в прискважинной зоне за счет влияния металлической трубы при наличии на поверхности теплоизоляционного слоя (например, снежного покрова). Указанное влияние оказывается зависящим от высоты надземной части трубы. Оголовок кондуктора может находиться на разной высоте над поверхностью Земли, и воздействие трубы имеет тогда различный характер.

Для исследования указанных условий теплообмена в расчетную схему добавлен слой снега мощностью  $h_{\text{сн}} = 0,3$  м со значением коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{сн}} = 0,25$  Вт/(м·°C) и объемной теплоемкостью  $C_{\text{сн}} = 580$  кДж/(м<sup>3</sup>·°C). Массив талых пород имеет, как и ранее, температуру  $t_0 = 0$  °C. В начальный момент времени на поверхности снега устанавливается постоянная температура  $t_{\text{п}} = -15$  °C, кроме того, в снежном покрове задается начальное линейное изменение температур от -15 °C на поверхности до 0 °C на подошве снега. Теплофизические свойства пород и материала трубы (табл. 1), а также остальные характеристики модели остаются прежними. Для контрастного выявления влияния обсадки моделирование выполнялось для толщины стенок трубы 10 мм.

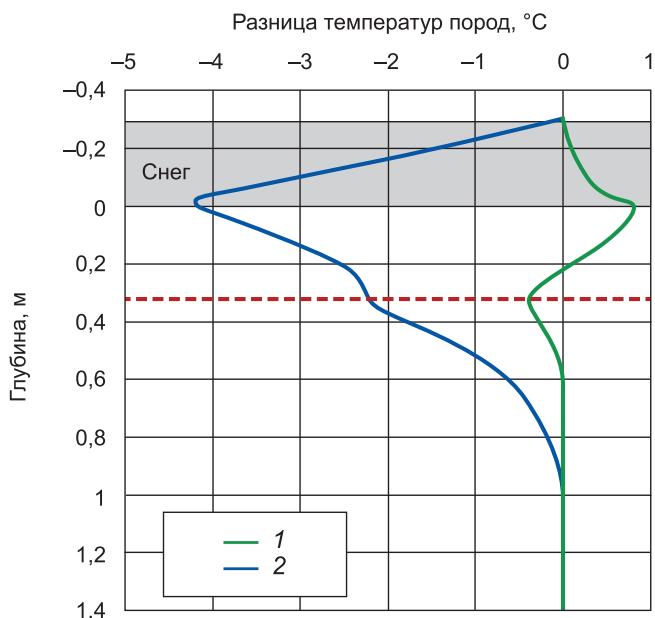


Рис. 5. Распределение разности температур по глубине на стенке обсадной трубы и в породах вне зоны теплового влияния трубы при наличии снежного покрова для случаев: расположения торца обсадной трубы на уровне поверхности пород (1) и на уровне поверхности снега (2). Расчет на момент 30 суток от начала промерзания; красный пунктир — глубина промерзания пород в естественных условиях на данный момент

В первом случае верхний торец трубы располагается вровень с поверхностью пород непосредственно под снегом. Во втором случае торец металлической трубы находится на уровне поверхности снега. Температура верхнего торца трубы в обоих случаях принята равной температуре на окружающей поверхности, однако в первом случае это начальная температура, изменяющаяся в дальнейшем, а во втором эта температура поддерживается постоянной.

**Случай расположения верхнего торца обсадной трубы под снегом.** При моделировании данного варианта, вопреки ожидаемому охлаждающему влиянию обсадки, получена более сложная картина. Установлено, что в относительно маломощной приповерхностной зоне пород (а также и в вышележащем слое изоляции), наоборот, наблюдается заметное повышение температуры на контакте с обсадкой по сравнению с таковой в массиве. И лишь на некоторой глубине стенка трубы становится более холодной нежели породы на том же уровне вне зоны влияния скважины (рис. 5, а).

Иными словами, металлическая обсадка в снежный период в один и тот же момент времени оказывает в разных частях разреза как охлаждающее, так и отепляющее воздействие на породы в прискважинной зоне. Для выяснения причин этого явления на модели выполнен детальный анализ тепловых потоков в приповерхностном слое пород в обрамлении скважины. Установлено, что плотность теплового потока по металлической трубе намного превышает таковую через поверхность пород на окружающей территории, вследствие чего под слоем теплоизолирующего снежного покрова,

Таблица 2

## Среднемесячные температуры на дневной поверхности

Месяцы	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$t,^{\circ}\text{C}$	-18,0	-18,0	-15,7	-11,1	-4,2	4,1	8,9	8,9	4,1	-4,2	-11,1	-15,7

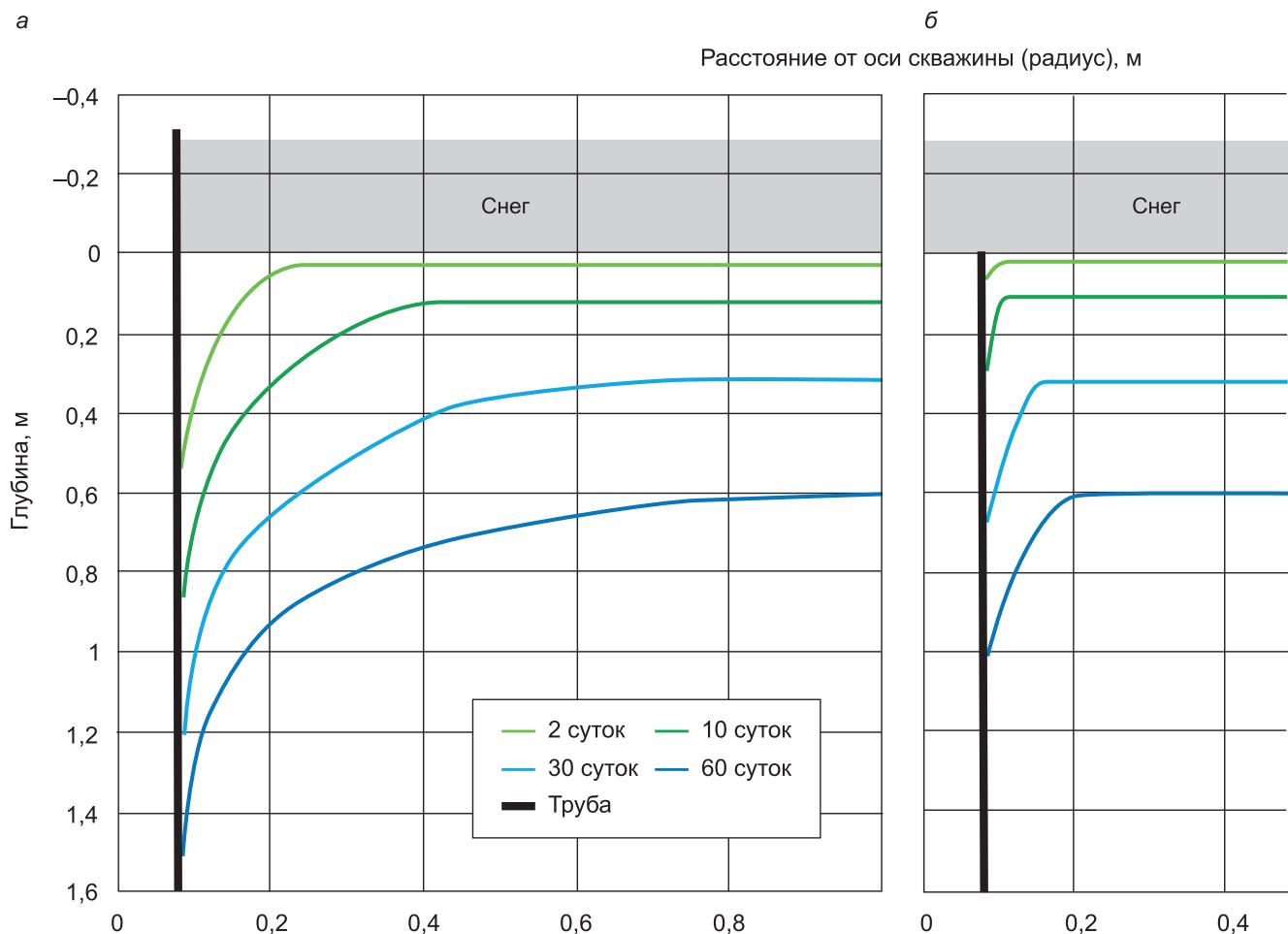


Рис. 6. Динамика промерзания пород вокруг скважины с металлической обсадкой: *а* — оголовок трубы пронизывает снежный покров, *б* — обсадная труба расположена вровень с поверхностью пород за разное количество суток от начала промерзания

не успевающего отводить поступающее снизу тепло, формируется локальная зона более высокой температуры поверхности пород. Заметим, что в данной конкретной постановке при нулевой исходной температуре промерзающих пород это тепло целиком формируется за счет фазовых переходов воды на движущемся фронте промерзания. Таким образом, над стволом скважины отепляющее влияние снега за счет аномальной плотности теплового потока оказываются повышенным, что и приводит к отепляющему влиянию трубы вблизи поверхности пород, причем температура здесь повышается относительно фоновой заметно — в данном случае на 1 °C. Однако плановые размеры зоны повышенной температуры поверхности невелики — в данном примере радиус этой зоны от оси скважины не превышает 0,25–0,3 м. Температурное воздействие этой небольшой в плане локальной зоны нагрева затухает с глубиной и влияние обсадной трубы на примыкающие породы вновь становится охлаждающим, что обуславливает более

глубокое промерзание пород на контакте с трубой ( $\xi_{\text{тр}} = 0,85$  м) по сравнению с фоновым значением ( $\xi_{\text{п}} = 0,32$  м) (рис. 5, а).

**Случай расположения верхнего торца обсадной трубы на поверхности снега.** В этом случае получены результаты, отличные от предыдущих. Отепляющего влияния металлической обсадки не наблюдается, в прискважинной зоне на поверхности пород под снегом формируется температурная аномалия с пониженными относительно фоновых температурами, причем это понижение достигает  $-5^{\circ}\text{C}$  (рис. 5, б). Глубина охлаждающего температурного воздействия трубы и мощность промерзшего слоя повышаются до величины 1,05–1,15 м.

Оголовок обсадной трубы в данных условиях является эффективным «тепловым мостиком», обеспечивающим локальный вынос тепла из пород сквозь теплоизолирующий снежный покров. Влияние обсадной трубы, пронизывающей снежный покров, на температурный режим пород в прискважинной зоне

оказывается максимальным из всех промоделированных ситуаций, и величина этого влияния далеко не предельная. Сильно в такой ситуации обсадная труба влияет и на пространственную конфигурации фронта промерзания вокруг скважины. На рис. 6 приведена динамика промерзания пород вокруг скважины в случаях расположения торца обсадной трубы под снегом и над ним, видно различие, обусловленное различным расположением оголовка скважины относительно снежного покрова при прочих равных условиях.

Следует отметить, что сказанное выше для ситуаций нагревания и промерзания пород применимо и к случаям охлаждения или оттаивания массива пород с обсаженной скважиной.

В частности, при рассмотрении процесса оттаивания массива мерзлых пород при наличии на поверхности напочвенного растительного покрова, возникают температурные эффекты, подобные тем, что и со снежным покровом, но с противоположным знаком. Количественно они, вероятно, будут выражены слабее в силу меньших термических сопротивлений биогенных покровов относительно снега. Необходимо отметить, что температурное влияние металлической обсадной трубы на окружающие породы распространяется по горизонтали на небольшое расстояние от стенки скважины — ни в одном из вариантов моделей это влияние не превысило 1,5 м, составляя в основном 0,8–1,2 м. Это связано с затуханием плотности горизонтального радиального теплового потока по мере удаления от оси скважины.

**Особенности влияния металлической обсадки на точность термометрических исследований в слое годовых теплооборотов.** Рассмотрим решение задачи формирования геокриологических условий в верхней части толщи многолетнемерзлых пород при наличии в массиве скважины, обсаженной металлической трубой. Целью моделирования является оценка возможной ошибки термометрических наблюдений, связанных с тепловым влиянием этой трубы.

Задача, как и ранее, решалась в осесимметричной постановке, размеры расчетной области и параметры сетки блоков приняты такими же, как и в предыдущих задачах. Теплофизические свойства пород также остаются прежними (табл. 1).

Основным отличием модели является задание на поверхности граничного условия III рода, учитывающего годовой ход температуры на дневной поверхности и наличие теплоизолирующих покровов. Для ограничения влияния на теплообмен подстилающих мерзлых пород граничные условия в процессе предварительной калибровки модели подбирались так, чтобы среднегодовая температура пород была сравнительно высокой — в данном расчете она составляла около  $t_{\xi} = -1,0^{\circ}\text{C}$ . Годовой ход среднегодовых температур на дневной поверхности задавался синусоидальным (табл. 2), термическое

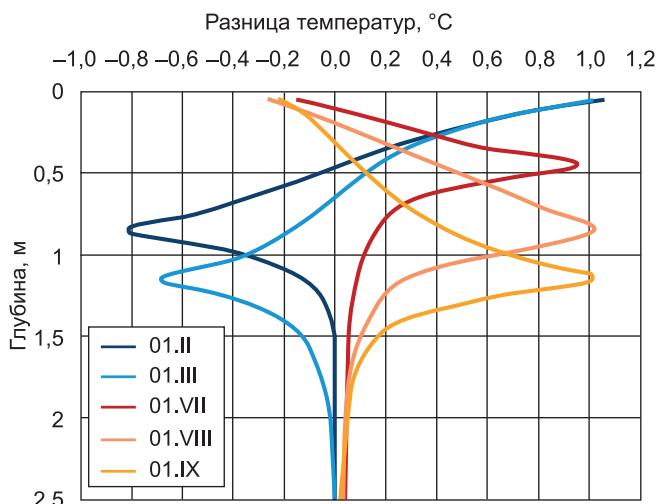


Рис. 7. Кривые разности температур пород на контакте с трубой и на удалении от нее в различные месяцы года

сопротивление снежного покрова принято постоянным в течение зимы и равным  $R_{\text{ch}} = 1,18 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , растительный покров отсутствует (уничтожен на площадке скважины).

Кроме того, учитывая знакопеременный характер движения тепловых потоков, для надежного вычленения влияния трубы расчеты выполнены для толщины стенки обсадки 10 мм, в этом случае исследуемые эффекты проявляются лучше. Расчеты велись до достижения периодически установленного температурного режима, затем в течение года анализировалось влияние обсадки на температурное поле пород и динамику слоя сезонного оттаивания.

В условиях контрастных восходящих и нисходящих тепловых потоков и при наличии движущихся фронтов фазовых переходов воды влияние трубы на температуры пород оказывается знакопеременным в течение года, т. е. обсадка может вносить как положительные, так и отрицательные ошибки в измерения температуры.

Годовые разности температуры в обсадной трубе скважины от таковой в ненарушенных условиях показана на рис. 7. Кривые разности температур ( $\Delta t = t_{\text{тр}} - t_{\text{п}}$ ) построены на первое число каждого месяца года. Годовая динамика ошибок температурных измерений, связанных с влиянием металлической обсадки скважин, оказывается сложной.

В принятых природных условиях амплитуда отклонений температуры в скважине от истинной составляет около  $2^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ), максимальные отклонения сосредоточены в пределах центральной части СТС (его максимальная глубина равна  $\xi_{\text{стс}} = 1,38 \text{ м}$ ), пики отклонений соответствуют положению фронта оттаивания (летом) или фронта промерзания СТС сверху (зимой). Ниже подошвы СТС ошибка измеряемых температур не превышает  $0,1\text{--}0,15^{\circ}\text{C}$ . Наблюдается зона отепляющего влияния трубы в приповерхностной зоне, формирующаяся в зимний период и связанная с воздействием снежного покрова.

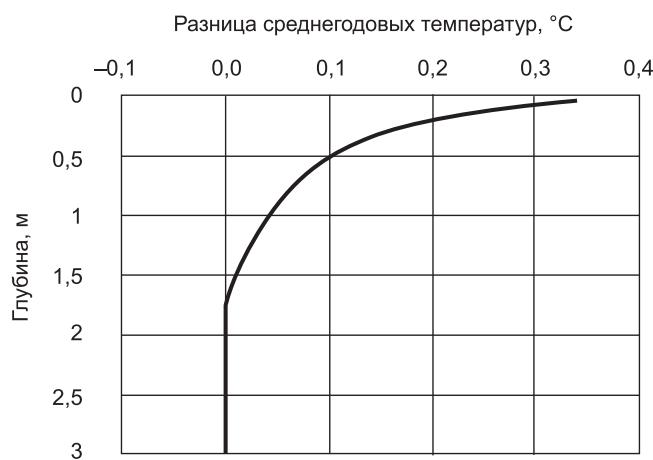


Рис. 8. Разность среднегодовых температур пород на контакте с трубой и в естественных условиях

Для оценки влияния металлической обсадки на среднегодовую температуру пород были построены кривые средних (интегральных) годовых температур для различных глубин на контакте с трубой и на удалении от нее. Сравнение показало, что несмотря на контрастные внутригодовые отклонения текущих температур под влиянием обсадки, среднегодовые значения температур показывают небольшие их отличия. На рис. 8 приведено распределение разности среднегодовых температур для пород на контакте с трубой и в естественных условиях. Эта разность не превышает  $+0,4^{\circ}\text{C}$  на поверхности пород, исчезая на глубине около 1,8 м, что ненамного превышает мощность СТС.

Небольшое отепляющее влияние обсадки на среднегодовую температуру пород связано с отсутствием сезонной смены теплопроводности в металле трубы и, следовательно, отсутствием здесь отрицательной температурной сдвигки, в отличие от окружающих пород, где температурная сдвигка в СТС в данных природных условиях как раз и составляет  $\Delta t_{\lambda} = -0,35^{\circ}\text{C}$ .

Наконец, получены интересные данные о влиянии обсадной трубы на характеристики слоя сезонного оттаивания пород. На рис. 9 показана годовая динамика СТС на контакте с внешней поверхностью обсадной трубы (фазовое состояние пород фиксировалось на модели в 2,5 мм от внешней стенки трубы) и в удалении от скважины.

Видны опережающие темпы как сезонного оттаивания пород в теплый период, так и темпы промерзания СТС сверху с началом зимы на контакте с трубой по сравнению с ненарушенными участками. Разница максимальных глубин оттаивания в этих случаях составляет  $\Delta\xi = \xi_{\text{тр}} - \xi_{\text{п}} = 1,55 - 1,38 = 0,17$  м, однако разность глубин фронтов фазовых переходов в отдельные моменты (например, 01.VIII и 01.I) достигала 0,4 м. Зафиксировано также интенсивное промерзание пород СТС снизу на контакте с обсадной трубой в конце лета. Полное промерзание СТС (смыкание мерзлоты) на контакте с трубой произо-

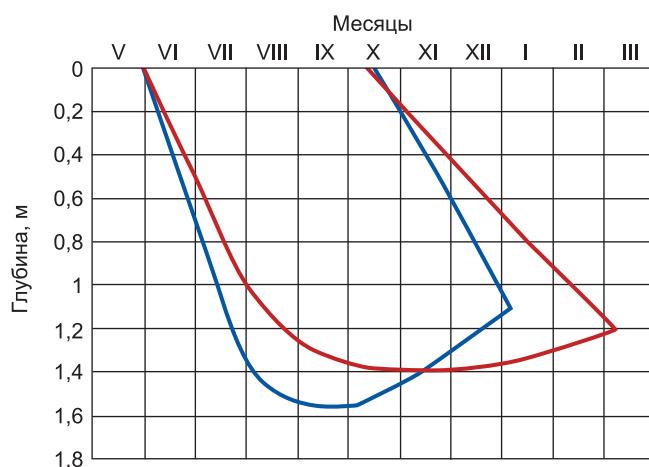


Рис. 9. Динамика СТС на контакте с трубой (синяя линия) и в естественных условиях (красная линия)

шло на 2 месяца раньше, нежели на окружающей территории.

**Влияние конвективного теплообмена в скважинах на точность измерений.** Выполненные выше оценки относятся только к искажающему влиянию на температуру пород металлической обсадной трубы скважины. Для открытых стволов скважин характерно также развитие ряда других процессов, способных влиять на температурный режим в стволе, где размещаются датчики. К ним относят конвективный теплоперенос в результате циркуляции в стволе флюида (воздуха, воды, антифриза). Могут влиять фазовые переходы влаги в результате замерзания затекающей в ствол воды или образование аблимационного льда на стенах скважины.

В настоящее время метод полевого определения температуры регламентируется ГОСТ 25358-2020 [ГОСТ..., 2021], последняя редакция которого утверждена в 2020 г. Согласно этому ГОСТу, измерения температуры грунтов следует проводить в заранее подготовленных и выстоянных термометрических скважинах, при этом точность измерения (округление) предлагается принять  $0,1^{\circ}\text{C}$ , а диаметр предназначенных для таких измерений целевых скважин не должен превышать 90 мм. Оговаривается также, что скважина в пределах слоя сезонного оттаивания должна быть защищена обсадной трубой (кондуктором), заглубленной в многолетнемерзлый грунт не менее чем на 0,5 м, а выступающая над поверхностью грунта ее часть должна быть теплоизолирована. ГОСТ 25358-2020 предусматривает, что при измерении температуры грунтов на глубине 1 м и более и при диаметре буровых скважин не более 100 мм допускается пренебречь погрешностью от конвекции воздуха в скважине. Вероятно, эти рекомендации основываются на весьма немногочисленных исследованиях, в частности, работе Н.М. Фролова [Фролов, 1963]. По его данным, «искажающее влияние конвекционных токов в скважине, а также кондуктивной теплопередачи по обсадным трубам настолько ничтожно, что лежит

за пределами точности применяемой аппаратуры ( $0,02^\circ$ )». Однако приводимые в его работе данные измерений свидетельствуют, что до глубины 2,5 м разность температур в «сухой» скважине с обсадкой диаметром 203 мм и скважине небольшого диаметра (25 мм) без обсадки, заполненной теплоизоляционным материалом, может достигать 0,3 и даже  $0,7^\circ$ . Вывод о слабом влиянии конвекции воздуха на температурные измерения в скважинах диаметром менее 115 мм при небольшом значении температурного градиента ( $<0,1^\circ\text{C}/\text{м}$ ) делает также W. Haeberli [Haeberli, Funk, 1991]. О заметном влиянии конвекции, правда, в заполненных водой скважинах, пишет в ряде работ Д.Ю. Демежко и др. [Демежко и др., 2020]. По другим данным [Levintal и др., 2020], конвекция воздуха приводит к заметным изменениям результатов измерений в скважинах диаметром от 0,10 до 0,38 м и глубиной 3 м. Приходится признать, что вопрос о влиянии конвекции до сих пор слабо изучен и весьма актуален, особенно принимая во внимание возросшую точность измерений.

**Положение датчиков в технической колонне.** Требованиями РД 52.17.925-2023, в частности, устанавливается размещение в верхней части разреза датчиков температуры по глубине через 0,2 м. Такая плотность измерений имеет смысл только для исследования сезонного оттаивания. Предполагается обсадка мониторинговой скважины металлическим кондуктором, заглубляемым на 1 м и более ниже подошвы СТС (при общей допустимой глубине обсадки до 5 м). Исходя из представленных выше результатов моделирования, влияние обсадной трубы при исследовании СТС заметно, причем это касается как максимальной глубины оттаивания, так и скорости движения фазовых границ или времени смыкания СТС (рис. 9). Кроме того, условия теплообмена на поверхности вблизи скважины искажены как в связи с нарушением естественных напочвенных покровов, так и за счет надземного оголовка скважины, взаимодействующего с окружающей средой (воздушные массы, солнечная радиация), а зимой служащего «тепловым мостиком» в снежном покрове. Представляется, что столь частое размещение датчиков температуры излишне.

Если же, помимо максимальных глубин СТС, требуется изучение динамики его формирования, термометрические наблюдения лучше выполнять не в основной мониторинговой скважине, а в отдельных скважинах малого диаметра (сопоставимого с диаметром трубок вытяжных термометров), а предпочтительней без обсадной трубы специальными «жесткими термокосами». В основной мониторинговой термометрической скважине, наблюдения, вероятно, достаточно начинать с глубины более 1 м. При заглублении в этом случае кондуктора на 0,5 м (что вполне приемлемо для его устойчивости), влияние теплопроводности металла действительно будет минимальным. Исключить влияние кондуктора на показания первого (с поверхности) датчика

на метровой глубине можно, если его заглублять на 0,1 м, а крепление обеспечивать, например, за счет крестообразно приваренных прутков диаметром 12 мм и выносом их в стороны на длину, равную максимальной высоте кондуктора (1,5–2,0 м), с заглублением в грунт концов прутков на 0,2–0,3 м.

**Расположение и количество наблюдательных скважин в природном комплексе (микроландшафте).** Организуемая в настоящее время Росгидрометом система фонового (в ненарушенных природных условиях) мониторинга на территориях вблизи метеостанций имеет ряд дискуссионных моментов. Площадки метеостанций и их ближайшие окрестности, по нашему мнению, в большинстве не являются репрезентативными для постановки геокриологических исследований. Региональное разнообразие мерзлотных условий на прилегающих территориях, как правило, в связи с геологическими и ландшафтными различиями, требует изучения и постановки мониторинговых наблюдений в серии скважин, количество которых определяется местным разнообразием природной среды. Так в количестве от 15–18 до 24–26 единиц. Подтверждением этому могут служить температурные измерения в 10 наблюдательных скважинах на геокриологическом стационаре Марре-Сале. Скважины расположены в различных природно-территориальных комплексах, характеризующихся различными условиями снегозаносимости, поэтому зимние отличия в температурном режиме пород проявляются наиболее ярко. Выбрать одну из скважин в качестве представительной на всю территорию стационара не представляется возможным. Эти и другие скважины (их более 20) характеризуют большую часть природного разнообразия на изучаемой территории. Опыт проведения мониторинговых работ в Арктике показывает, что для объективной характеристики мерзлотных условий на площади геокриологического стационара, как ключевого участка в изучаемом регионе, наблюдательная сеть скважин должна иметь различную глубину, включая выработки, вскрывающие всю толщу ММП. На севере Западной Сибири, как известно, мощность ММП составляет 250–280 м, а в Восточной Сибири — до 600 м. Данные по таким скважинам необходимы для построения прогнозных геокриологических моделей с учетом нижних граничных условий.

**Размеры площадки для мониторинга СТС.** По нашему мнению, одна площадка для изучения динамики СТС, так же, как и одна наблюдательная температурная скважина, для региональной оценки состояния мерзлотных условий не является репрезентативной, поскольку результаты будут характеризовать неопределенную часть природной среды региона. Предложенный за рубежом еще в конце XX в. метод CALM следует, очевидно, признать устаревшим, так как территория даже при размерах  $1 \times 1$  км не позволяет в полной мере оценить изменчивость сезонного оттаивания

грунтов в пределах геокриологического стационара ( $5 \times 6$  км). Ландшафтное и геокриологическое разнообразие верхних горизонтов ММП в арктической зоне определяет сложившийся отечественный геологический подход к изучению СТС, а именно — маршрутный, на закрепленных на местности створах, совмещенных с расположением наблюдательных температурных скважин. Сравнение данных по площадке CALM на стационаре Марре-Сале и по закрепленным створам на протяжении более десяти лет показывает меньшую изменчивость протаивания грунтов на квадрате, чем на маршруте, подтверждая тем самым ограниченные возможности метода площадки (CALM), даже больших размеров. В целом стоит отметить, что к сезонному протаиванию горных пород следует относиться как к одному из важных показателей инженерно-геокриологических условий, но он, по нашему мнению, не может служить индикатором климатических долгосрочных изменений, поскольку определяется текущим летним сезоном.

**Повышение точности термометрических наблюдений.** Измерение температуры на дневной поверхности, т. е. на поверхности раздела атмосферы и земной поверхности (снежный или растительный покров, оголенные грунты, водная поверхность), является сложной задачей, поскольку здесь одновременно происходит теплообмен различной природы (радиационный, конвективный и кондуктивный при участии фазовых превращений влаги). Температура поверхности является изменчивой по площади в зависимости от большого числа факторов (альбато, наклон, шероховатость и пр.). В этом отличие температуры поверхности от температуры воздуха. Для измерения температуры дневной поверхности используются специальные измерители («термопауки») с датчиками температуры (стандартно — 16 шт.), которые при единовременном измерении выполняют определение осредненной по площади температуры. Учитывая то, что температура поверхности крайне важна для представительного прогнозирования, можно ожидать применения новых технических решений. Хорошие результаты может дать применение дистанционных приборов измерения температуры поверхности — пирометров, тепловизоров и др. Требуется лишь обеспечить длительное автономное измерение температур с высокой частотой (с учетом скорости суточных изменений температуры — около 1–2 часов) и запись результатов.

Для достижения максимальной точности измерений температуры горных пород наилучшим методом является размещение датчиков температуры непосредственно в грунтовой толще. Такая рекомендация имеется и в действующем ГОСТ 25358-2020 (п. 3.2.), однако о ее методике не раскрывается. В реальности это достигается путем размещения термометрических кос в скважинах, из которых удалены обсадные трубы и ствол которых после установки

измерительной косы засыпается сыпучим грунтом (сухим песком или измельченным местным грунтом). Разновидностью метода для небольших глубин является использование термометрических зондов (жестких штырей с датчиками). Преимуществами размещения датчиков температуры непосредственно в грунте являются отсутствие факторов, искажающих естественный теплообмен в массиве пород (влияние обсадных труб, конвекция воздуха в стволе, десублимация пара с образованием льда на стенах и др.); непосредственный контакт датчика с грунтом; пространственная фиксация положения датчиков по глубине. Однако, метод имеет и недостатки. В нем должны использоваться термометрические датчики с минимальным дрейфом характеристик во времени, необходима также надежная гидроизоляция элементов косы, включая логгеры. Из имеющегося опыта для засыпанных термометрических скважин, отмечается вертикальное неравномерное перемещение датчиков в пределах слоя сезонного оттаивания (промерзания), связанное с дифференциальным сезонным пучением. Есть также вероятность того, что пучение может привести к обрыву проводов термокосы.

**Выводы.** 1. Установлены закономерности влияния высокотеплопроводной обсадной трубы на точность и представительность термометрических исследований в скважинах. Ошибки измерений температур в массиве пород, связанные с влиянием металлической трубы на теплообмен в прискважинной зоне, могут иметь разный знак и достигать величин в первые градусы. Указанное влияние существенным образом зависит от соотношения высоты о головка над поверхностью пород и его соотношения с мощностью напочвенных покровов, особенно снежного.

2. Динамика и характеристики слоя сезонного оттаивания пород заметно отличаются на контакте с обсадкой и на удалении от нее.

3. Влияние металлической обсадки на среднедововую температуру пород оказывается относительно небольшим, но его необходимо учитывать для оценки температурного режима ММП.

4. Использованные численные математические модели позволяют достаточно надежно прогнозировать ошибки термометрических наблюдений в породах за счет теплового влияния собственно обсадных труб в конкретных природных условиях и при определенных технологических характеристиках конструкции скважин. Однако при этом не учитываются иные физические процессы, характерные для открытых скважин (и вообще горных выработок), в частности, конвекция воздуха, и способные заметно влиять на температурный режим в стволе, где размещаются датчики.

5. Научная основа положения датчиков (глубины их установки по ГОСТ 25358-2020), по нашему мнению, требует дальнейшей разработки. Представляется, что детальное изучение теплового режима пород до глубин 2,4–3,2 м необходимо проводить

в отдельных скважинах малого диаметра, а предпочтительней без обсадной трубы.

6. Региональное разнообразие мерзлотных условий на геокриологическом стационаре, в связи с геологическими и ландшафтными различиями, требует изучения и постановки мониторинговых наблюдений в скважинах в количестве от 15–18 до 24–26 единиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 31446-2017 Трубы стальные обсадные. М.: Стандартинформ, 2017.

ГОСТ 25358-2020 Метод полевого определения температуры. М.: Стандартинформ, 2021.

Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. Методы подавления свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах при проведении температурных исследований // Георесурсы. 2020. № 22(1). С. 55–62.

Песоцкий Д.Г. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами «QFrost» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614404 РосАПО, 2016.

РД52-17.925-2023 Росгидромет, 2023.

Фролов Н.М. Экспериментальное определение степени влияния гравитационной конвекции и обсадных труб

7. Ландшафтное и геокриологическое разнообразие верхних горизонтов ММП в арктической зоне определяет сложившийся отечественный геологический подход к изучению СТС, а именно — маршрутный, на закрепленных на местности створах, совмещенных с расположением наблюдательных температурных скважин.

на естественное распределение температуры в буровых скважинах // Докл. АН СССР. 1963. Т. 150, № 2. С. 301–304.

Хрустальев Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 940281. РосАПО, 1994.

Haeberli W., Funk M. Borehole temperatures at the Colle Gnifetti core-drilling site (Monte Rosa, Swiss Alps) // J. Glaciol. 1991. Vol. 37. P. 37–46.

Levintal E., Dragila M.I., Lensky N.G., Weisbrod N. Borehole diameter controls thermal-induced convection and evaporation from a shallow water table // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. e2020GL089411.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025, одобрена после рецензирования 23.05.2025, принята к публикации 26.12.2025