

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ В НЕГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ В УСЛОВИЯХ СПЛОШНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

А.В. Павлов

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, kriozem@online.ru

В Якутске, на Марре-Сале (Ямал) и Парисенто (Гыдан) выполнены натурные эксперименты, которые позволили оценить возникающие погрешности измерений температуры в неглубоких скважинах, различающихся диаметром, способом обсадки, наличием заполнителя. Предложенные конструктивные меры позволяют уменьшить эти погрешности.

Грунт, погрешность измерений, свободная конвекция, скважина, температура

ESTIMATION OF TEMPERATURE MEASUREMENT ERRORS OF GROUNDS IN SHALLOW BOREHOLES IN PERMAFROST

A. V. Pavlov

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, kriozem@online.ru

Field observations have been performed in Yakutsk, Marre-Sale (Yamal) and Parisento (Gydan). They have allowed evaluating temperature measurement errors in shallow boreholes, differing in diameter, beading technique, occurrence of filling. Suggested design requirements permit one to decrease these errors.

Ground, measurement error, free convection, borehole, temperature

ВВЕДЕНИЕ

Температуру верхних горизонтов мерзлых пород можно рассматривать как индикатор сезонных и многолетних изменений климата [Павлов, 1997]. Основной массив данных о температуре грунтов в геокриологии получают путем измерений в обсадных скважинах. При этом могут возникать отклонения измеренных значений температуры в скважине от истинной температуры грунтов. Отклонения могут быть весьма значительными и изменяться в течение года по величине и знаку [Чекалюк, 1961; Павлов, 1965; Девяткин, Кутасов, 1973]. Основными факторами, искажающими показания температуры, являются: 1) возникновение свободной тепловой конвекции газа или жидкости в трубе в температурно-неоднородном поле; 2) несоответствие скорости теплопередачи в обсадной трубе (в особенности металлической) и грунте. Влияние свободной тепловой конвекции в скважинах на погрешность измерений температуры грунтов теоретически исследовалось в ряде работ начиная с 1930-х гг.; краткое рассмотрение результатов этих исследований дано в статье [Девяткин и др., 1988]. Для уменьшения искажений в измерениях температуры грунтов в ряде нормативных документов предусматривалось устройство на устье скважины защитного короба, заполненного теплоизоляционным материалом (мох, торф, опилки и пр.). Устранение свободной конвекции воздуха или заполняющей жидкости в скважинах диаметром более 100 мм иногда осуществляют путем

применения разделительных дисков, однако тепловой эффект такого конструктивного оформления скважины оказывается невысоким. Использование электрических датчиков может привести к дополнительным погрешностям измерений температуры грунтов вследствие возрастания теплопередачи в скважине по подводящим металлическим проводам.

Экспериментальные исследования погрешностей измерений температуры грунтов в скважинах были начаты Институтом мерзлотоведения СО АН СССР в конце 1960-х гг. на специальных площадках в окрестностях Якутска [Девяткин, 1972]. Температурные измерения проводились эпизодически как в теплый, так и в холодный периоды года. На основе этих экспериментальных данных получены аналитические зависимости, в ряде случаев дающие удовлетворительные оценки погрешностей измерений температуры грунтов в скважинах с металлической или полиэтиленовой обсадкой [Девяткин, Кутасов, 1973; Девяткин, 1993, 1997]. С 1969 г. аналогичные наблюдения с большей детальностью измерений выполнялись Институтом мерзлотоведения СО АН СССР на геокриологическом стационаре в Якутске [Павлов, 1975].

В условиях низкотемпературной криолитозоны, которая характерна для тундры, погрешности измерений температуры грунтов в скважинах могут отличаться от погрешностей, определенных для района Якутска. Поэтому в 1987–1991 гг. авто-

ром во ВСЕГИНГЕО были проведены экспериментальные исследования погрешностей измерений температуры грунтов на двух стационарах на севере Западной Сибири (Марре-Сале на п-ове Ямал и Парисенто на Гыданском п-ове). Завершение экспериментальных исследований на стационарах Марре-Сале и Парисенто пришлось на период интенсивной перестройки всех отраслей народного хозяйства, и в силу ряда объективных причин результаты наблюдений на стационарах в условиях Западной Сибири оказались до сих пор не опубликованными. Судя по литературным источникам, в последующие годы до настоящего времени подобные экспериментальные исследования не проводились. Поэтому полученные экспериментально оценки погрешностей измерений температуры при различных конструкциях скважин представляют значительный интерес, особенно при сравнении данных по Якутску, Марре-Сале и Парисенто.

При изучении изменений криолитозоны в связи с глобальными климатическими воздействиями и техногенезом существенно повышаются требования в отношении точности и надежности получения данных о температуре грунтов. Это непосредственно связано с конструкцией скважин, правильный выбор которых позволяет свести к минимуму погрешности измерений.

В ряде случаев для оценки термических изменений в криолитозоне используют данные метеорологических станций по измерению температуры грунтов (до глубины 3,2 м) с помощью вытяжных термометров [Васильев, 1999; Чудинова и др., 2003]. Регулярные метеорологические наблюдения за температурой верхнего слоя многолетнемерзлых грунтов проводились в отдельных случаях за столетний период времени, что является несомненным достоинством. К сожалению, погрешности измерений температуры грунтов на метеостанциях являются существенными и систематическими, а глубина измерений – недостаточной для геокриологических исследований [Павлов, 1975, 1997]. При измерениях возникают дополнительные погрешности, связанные с принудительной конвекцией воздуха в скважине при регулярном (4 раза в сутки) подъеме и опускании “заленивленных” ртутных термометров в процессе наблюдений. Поэтому данные о температуре грунтов, получаемые на метеостанциях, требуют весьма осторожной интерпретации. Наоборот, данные повторных геотермических исследований могут быть чрезвычайно информативными и характеризоваться повышенной точностью.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ СТАЦИОНАРАХ

Природные условия на объектах мониторинга (Якутск, Марре-Сале, Парисенто), выбранных

для изучения погрешностей измерений температуры грунтов в скважинах, существенно различались.

В Якутске верхняя часть разреза грунтов на наблюдательных площадках представлена в основном песками и супесями. Норма среднегодовой температуры воздуха составляла $-10,2^{\circ}\text{C}$, высота снежного покрова (в марте) около 30 см. Снег характеризовался невысокой плотностью (до 200 кг/м^3) и плохой теплопроводностью. Среднегодовая температура грунтов изменялась от -2 до -3°C , глубина их сезонного протаивания – от 1,6 до 2,5 м. Значительная континентальность климата в районе проведения экспериментов обеспечивала интенсивный прогрев и охлаждение грунтов в годовом цикле и формирование в них существенных как летних, так и зимних температурных градиентов, влияющих на искажение показаний температуры.

Конструкции термометрических скважин различались по диаметру, способу обсадки (металлическая, полиэтиленовая и текстолитовая трубы) и заполнению (воздушно-сухая, заполненная сухим песком, нефтепродуктами, трансформаторным маслом, расплавом парафина и канифоли и др.). За истинную принимали температуру в центре скважины, засыпанной сухим песком, она хорошо соответствует температуре воздушно-сухой скважины малого диаметра с полиэтиленовой обсадкой (до 20 мм). Детальное описание постановки и методов наблюдений на экспериментальных объектах в Якутске приводится в ряде публикаций [Девяткин, 1972; Павлов, 1975; Девяткин и др., 1988].

На стационарах в условиях крайнего севера Западной Сибири (Марре-Сале и Парисенто) для количественной оценки погрешностей измерений температуры грунтов в скважинах был осуществлен цикл наблюдений на специально созданных опытно-методических площадках (ОМП). На Марре-Сале площадка была оборудована на участке дренированной мохово-лишайниковой тундры, грунт представлен переслаивающимися супесями и песками. Норма среднегодовой температуры воздуха (среднее за 1951–1980 гг.) на Марре-Сале составляет $-9,4^{\circ}\text{C}$. Снежный покров на площадке сохранялся в ненарушенном состоянии (наибольшая за зиму высота от 0,15 до 0,27 м, плотность $330\text{--}380\text{ кг/м}^3$). Глубина сезонного протаивания достигала 2 м, средняя годовая температура грунтов равна $-4\text{...}-7^{\circ}\text{C}$. Для оценки погрешностей измерений температуры грунтов было оборудовано шесть термометрических скважин (табл. 1). На геокриологическом стационаре Парисенто (Западный Гыдан) также была оборудована аналогичная с Марре-Сале ОМП, на которой изучались погрешности измерений температуры грунтов в скважинах с металлической и полиэтиленовой обсадными трубами. Площадка оборудована на

Таблица 1. Характеристика наблюдательных термометрических скважин на стационаре Марре-Сале

| Номер скважины | Глубина, м | Обсадная труба | Диаметр трубы, мм | Наличие утепляющего короба |
|------------------------------------|------------|---|-------------------|----------------------------|
| <i>Стационар Марре-Сале (Ямал)</i> | | | | |
| 011 | 12 | Полиэтиленовая | 50 | – |
| 012 | 12 | То же | 50 | Установлен |
| 013 | 7 | Металлическая | 50 | – |
| 014 | 7 | То же | 76 | – |
| 015 | 12 | Без обсадки, засыпана песком | – | Установлен |
| 016 | 12 | Металлическая | 89 | – |
| <i>Стационар Парисенто (Гыдан)</i> | | | | |
| 122 | 10 | Полиэтиленовая | 50 | – |
| 121 | 10 | Металлическая | 50 | – |
| 116 | 10 | То же | 76 | – |
| 123 | 10 | » | 89 | – |
| 124 | 10 | Без обсадки, засыпана грунтом после установки термокосы | – | – |

участке мелкобугристой кустарничково-травяно-моховой тундры. В литологическом составе грунтов преобладают пески и супеси, сверху грунт перекрыт слоем торфа около 0,3–0,4 м. Норма средней годовой температуры воздуха составляет $-10,8^{\circ}\text{C}$. Глубина сезонного протаивания составляет (в среднем) 0,6 м, средняя годовая температура грунтов около $-5...-8^{\circ}\text{C}$. На Парисенто ОМП находилась в ветровой тени, в марте высота снежного покрова достигала 0,6 м, плотность до 400 кг/м^3 .

Для измерений температуры грунтов на ОМП стационара Парисенто было оборудовано пять термометрических скважин (см. табл. 1). Измерения температуры грунтов как на Марре-Сале, так и на Парисенто проводились дистанционно с помощью термокос, в которых в качестве датчиков были использованы терморезисторы. Датчики устанавливали на глубинах: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8 и 10 м. В теплый сезон делали измерения 1 раз в 5–10 дней. Измерения в зимний сезон проводились только на Марре-Сале (с периодичностью 1 раз в 1–2 месяца). Проведение в теплый сезон более детальных наблюдений было вызвано отчасти тем, что основной объем термических измерений в скважинах в геофизиологии выполняют в этот период года.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Уже первые опыты (Якутск) показали, что отклонение температуры, измеренной в неглубокой скважине, от истинной температуры грунта может быть весьма существенным и отмечается в течение всего года, однако отклонения летом в целом за-

Таблица 2. Экстремальные (зима, лето) и среднегодовые значения разностей Δt между естественной температурой грунта и температурой грунта, измеренной в скважине диаметром 50 мм (обсадная труба металлическая), в Якутске [Павлов, 1975]

| Глубина, м | $\Delta t, ^{\circ}\text{C}$ | | |
|------------|------------------------------|------|------------------|
| | Зима | Лето | В среднем за год |
| 1 | -5,3 | 0,9 | -1,2 |
| 2 | -2,6 | 0,3 | -1,0 |
| 3 | -1,2 | 0,2 | -0,7 |
| 10 | -0,2 | 0 | -0,1 |

метно меньше, чем зимой [Девяткин, 1972; Павлов, 1975; Девяткин и др., 1988]. Летние отклонения характерны как для металлической высокотеплопроводной обсадной трубы, так и для полиэтиленовой плохотеплопроводной. Это свидетельствует о том, что в летний период, несмотря на устойчивое распределение воздушных масс, в скважине все же возникает конвекция воздуха. Она заметно усиливается в зимний период, когда создается неустойчивое термическое состояние в скважине. Отклонения температуры в скважине от истинной температуры летом и зимой характеризуются разным знаком, однако они взаимно не компенсируются. В результате в скважине формируется более низкая среднегодовая температура по сравнению с «истинной» температурой грунта (табл. 2).

Наибольшие погрешности измерения температуры грунтов в скважине характерны для глубин до 3 м. Так, в Якутске на глубине 1 м максимальное искажение температуры в воздушно-сухой скважине диаметром 120 мм (без обсадки) превышало 6°C , а диаметром 50 мм (с металлической обсадной трубой, с заполнением трансформаторным маслом) составляло 5°C (табл. 3). Залив-

Таблица 3. Максимальные отклонения температуры Δt_{max} в скважинах (диаметром 50 и 120 мм) от температуры грунта на стационаре в Якутске (январь) [Девяткин и др., 1988]

| Глубина, м | $\Delta t_{\text{max}}, ^{\circ}\text{C}$ | |
|------------|---|-------|
| | Диаметр скважины, мм | |
| | 50* | 120** |
| 1 | -5,8 | -6,9 |
| 2 | -3,3 | -2,4 |
| 3 | -1,2 | -0,7 |
| 10 | -0,6 | -0,4 |
| 15 | -0,2 | -0,2 |
| 17,5 | -0,1 | -0,1 |
| 20 | 0 | 0 |

* Скважина заполнена трансформаторным маслом.

** Воздушно-сухая скважина.

Таблица 4. Уменьшение годовых амплитуд отклонений температуры Δt в скважинах (диаметром 50 и 100 мм) от температуры грунта при использовании полиэтиленовых обсадных труб вместо металлических (стационар в Якутске)

| Глубина, м | Δt , °C | |
|------------|----------------------|-----|
| | Диаметр скважины, мм | |
| | 50 | 100 |
| 0,5 | 0,8 | 4,7 |
| 1,0 | 0,7 | 2,9 |
| 1,5 | 0,2 | 2,2 |
| 2,0 | 0,1 | 1,7 |
| 2,5 | 0 | 0,7 |
| 3,0 | 0 | 0,2 |
| 4,0 | 0 | 0,1 |

ка скважин жидкостью (керосин, солярка, трансформаторное масло и др.) заметно усиливала конвекцию и увеличивала погрешности измерений температуры. Наличие рыхлого снега вокруг устья скважины, являющегося хорошим теплоизолятором, наоборот, заметно уменьшает искажение температуры грунтов.

Применение полиэтиленовых труб для обсадки скважин вместо металлических слабо влияет на снижение погрешности измерений при диаметре трубы до 50 мм (табл. 4). В летний сезон уменьшение погрешности измерений температуры в скважине для глубин 0,5–1,5 м составляет всего 0,1–0,2 °C, но при диаметре скважины 100 мм оно возрастает до 0,3–0,6 °C (на тех же глубинах).

Таблица 5. Разница Δt между температурой в скважинах (с полиэтиленовой и металлической обсадкой разного диаметра) и истинной температурой грунта на ОМП стационара Парисенто в 1988 г.

| Глубина, м | Δt , °C | | |
|---------------|------------------------|-----------------------|-------|
| | Полиэтиленовая обсадка | Металлическая обсадка | |
| | 50 мм | 50 мм | 76 мм |
| <i>Июль</i> | | | |
| 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| 1,5 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 2,5 | 0,3 | 0,4 | 0,6 |
| 3,5 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| 4,5 | 0,4 | – | 0,6 |
| 5,5 | 0,2 | 0,4 | 0,5 |
| <i>Август</i> | | | |
| 0,5 | 0,1 | 0,5 | 0,9 |
| 1,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| 2,5 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 3,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| 4,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 |
| 5,5 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |

Натурные исследования в Якутске показали в целом, что отклонения температуры в скважине от температуры окружающего грунта возрастает при следующих условиях: 1) наличие жидкого (флюидного) заполнителя и обсадной трубы из металла; 2) уплотнение или удаление снега вокруг скважины; 3) отсутствие теплоизолирующего короба в устье скважины; 4) увеличение диаметра скважины.

На стационаре Парисенто в летние месяцы температура в скважине с полиэтиленовой обсадной трубой (диаметром 50 мм) была на 0,1–0,5 °C выше по сравнению с окружающим грунтом (скважина 124 без обсадки, после установки термокося засыпана песком). Применение металлической обсадной трубы вместо полиэтиленовой (равного диаметра 50 мм) привело к возрастанию погрешности измерения температуры до 0,4–0,6 °C, а трубы диаметром 76 мм – на 0,5–0,7 °C (табл. 5). Таким образом, погрешность измерений возрастала в среднем на 0,2 °C при замене полиэтиленовой трубы на металлическую и на 0,3–0,4 °C при дополнительном изменении диаметра трубы с 50 до 76 мм. При небольшой мощности сезонноталого слоя погрешности измерений температуры грунтов малы даже в скважине 123 диаметром 89 мм. Это, вероятно, объясняется тем, что граница фазовых переходов близка к дневной температуре поверхности грунта, что затрудняет проникновение тепловой волны.

Анализ данных наблюдений по скважинам 011, 013 и 014 на ОМП стационара Марре-Сале позволил дать количественную оценку возрастания погрешностей температурных измерений при замене полиэтиленовой трубы на металлическую в условиях значительного сезонного протаивания грунтов. В среднем за год скважины с металлической обсадкой характеризуются пониженной температурой по сравнению со скважинами с полиэтиленовой обсадкой; это понижение для скважин 50 мм составляет –0,2...–0,7 °C. В теплый период года температура на глубине 1 м в скважине 013 отличается на –0,6...0,4 °C от температуры в скважине 011, на глубине 3 м разница в температурах лежит в пределах 0...–0,2 °C. В зимний период среднемесячные погрешности данных по температуре скважин 012 и 011 доходят до 1,6 °C. Значительно большие изменения отмечаются в температурном режиме скважины 016 по сравнению со скважиной 011. Температура на глубине 1 м в скважине 014 в теплый период на 5–7 °C выше, а в зимний на 3–9 °C ниже, чем в скважине 011.

Искажение температуры в неглубоких скважинах в отдельные сроки наблюдений может быть значительно больше, чем при осреднении за месяцы, и достигает 10–15 °C для металлических труб диаметром 76–89 мм. Поэтому для изучения температурного режима грунта в слое годовых теплооборотов нежелательно использовать скважины с

диаметром более 50 мм при обсадке полиэтиленовыми трубами и 40 мм – металлическими. Вместо разового замера температуры в скважинах целесообразно осуществлять серию из 2–5 замеров при разных погодных условиях. Искажение температуры снижается до нулевых значений при засыпке пройденных без обсадки скважин извлеченным при бурении грунтом после установки электрических датчиков в скважину и вывода наружу средств коммутации.

ВЫВОДЫ

При измерении температуры грунтов в скважинах в зависимости от диаметра скважины, способа обсадки, заполнителя скважины, глубины и времени измерений могут отмечаться заметные погрешности. Наибольшие отклонения измеренной температуры от истинной характерны для зимнего периода. Обычно в скважине формируются более низкие среднегодовая и особенно зимняя температуры по сравнению с температурой грунтов. Так, в Якутске максимальное искажение температуры (январь) в воздушно-сухой скважине диаметром 50 мм с металлической обсадкой достигало по сравнению с грунтом $-5...-6$ °С на глубине 1 м.

Наибольшие искажения температуры грунтов отмечаются в скважинах, имеющих обсадную трубу из металла и заполненной жидким теплоносителем. Увеличение диаметра скважины и повышение термического градиента в грунтах, применение проводной системы измерений также способствуют возрастанию погрешностей измерений, особенно на небольших глубинах. Устройство на устье скважины защитного короба, заполненного теплоизоляционным материалом (мох, торф, опилки и пр.), позволяет предотвратить возникновение погрешностей температурных измерений для скважин с диаметром менее 100 мм и глубин 1 м и более.

Таким образом, уменьшение диаметра скважины, использование плохотеплопроводных пластмассовых обсадных труб вместо металлических, сооружение теплозащитного короба – все это повышает достоверность информации.

Литература

- Васильев И.С.** Реакция термического режима почвогрунтов Якутии на современные изменения климата // *Метеорология и гидрология*, 1999, № 2, с. 98–103.
- Девяткин В.Н.** Влияние естественной конвекции на температуру в вертикальных скважинах // *Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах*. М., Наука, 1972, с. 127–142.
- Девяткин В.Н.** Тепловой поток криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1993, 165 с.
- Девяткин В.Н.** Тепловой поток криолитозоны Сибири: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 1997, 39 с.
- Девяткин В.Н., Кутасов И.М.** Влияние свободной тепловой конвекции и обсадных труб на температурное поле в скважинах // *Тепловые потоки из коры и верхней мантии*. М., Наука, 1973, № 12, с. 99–106.
- Девяткин В.Н., Мельников В.П., Павлов А.В.** Экспериментальное изучение погрешностей измерений температуры горных пород в неглубоких скважинах // *Методика и техника геокриологических исследований*. Новосибирск, Наука, 1988, с. 101–110.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // *Криосфера Земли*, 1997, т. I, № 1, с. 47–58.
- Павлов А.В.** Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Наука, 1965, 254 с.
- Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 302 с.
- Чекалюк Э.В.** Основы пьезометрии залежей нефти и газа. Киев, Гостехиздат УССР, 1961, 215 с.
- Чудинова С.М., Быхолец С.С., Сороковиков В.А. и др.** Особенности изменения температуры почв России в период последнего потепления климата // *Криосфера Земли*, 2003, т. VII, № 3, с. 23–30.

*Поступила в редакцию
1 марта 2006 г.*