

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ И ВО ЛЬДУ**

УДК 665.612.074

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(11-20)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА ЗАМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ
НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПОРОВОЙ ВОДЫ**

Е.М. Чувилин¹, Н.С. Соколова¹, Б.А. Буханов¹, В.А. Истомин^{1,2}, Г.Р. Мингареева³

¹ Сколковский институт науки и технологий,
121205, Москва, Территория инновационного центра “Сколково”,
Большой бул., 30, стр. 1, Россия; e.chuvilin@skoltech.ru

² ООО “Газпром ВНИИГАЗ”,
142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, вл. 15, стр. 1, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Температура начала замерзания грунтов в настоящее время определяется не только прямым методом медленного охлаждения с фиксацией температуры при кристаллизации льда в переохлажденной системе, но и косвенными – пересчетом через другие измеряемые характеристики грунтовой системы. Разработанный водно-потенциометрический метод определения температуры начала замерзания мерзлых грунтов на основе единичного измерения потенциала поровой воды с последующим термодинамическим пересчетом в эквивалентную температуру является одним из наиболее перспективных косвенных методов благодаря скорости измерения и точности, сопоставимой с прямыми измерениями. Результаты исследований показали хорошую сопоставимость результатов, полученных водно-потенциометрическим методом, с прямыми измерениями температуры начала замерзания одних и тех же грунтов. Различие двух сравниваемых методов не превышает 0.05 °С для всех исследованных природных северных грунтов различного состава, засоленности и влажности. Водно-потенциометрический метод может быть рекомендован для определения температуры начала замерзания природных грунтов с естественной влажностью и засоленностью наравне с методами прямого экспериментального определения.

Грунты, температура начала замерзания, водно-потенциометрический метод, естественная влажность, потенциал поровой воды, активность поровой воды, степень засоленности, полуостров Ямал

**DETERMINATION OF THE FREEZING POINT OF SOILS BASED
ON MEASUREMENTS OF PORE WATER POTENTIAL**

E.M. Chuvilin¹, N.S. Sokolova¹, B.A. Bukhanov¹, V.A. Istomin^{1,2}, G.R. Mingareeva³

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo Innovation Center,
30, bldg. 1, Bolshoi ave., Moscow, 121205, Moscow, Russia; e.chuvilin@skoltech.ru

² JSC Gazprom VNIIGAZ,
15/1, Proektiruemiy passage No. 5537, Razvilka Village, Moscow region, Leninskiy district, 142717, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

The soils freezing point is usually determined by both the direct method of slow cooling with the temperature monitoring during ice crystallization in a supercooled system, and indirect methods using other measured parameters of the soil system with further calculation. The water-potentiometric method for soil freezing point determination based on a single measurement of a pore water potential with subsequent thermodynamic conversion into an equivalent temperature has been developed. This approach is one of the most promising indirect methods due to its high productivity and accuracy comparable to direct measurements. The results have demonstrated good comparability of the obtained data by the water-potentiometric method with the direct measurements of the freezing point for the same soils. The values difference between the two methods is no more than 0.05 °C for all investigated permafrost soils with different particle size distribution, salinity and moisture content. The water-potentiometric method can be recommended for the freezing point determination applied to soils with natural moisture and salinity along with methods of direct experimental determination.

Soils, freezing point, water-potentiometric method, natural moisture content, pore water potential, pore water activity, salinity, Yamal Peninsula

ВВЕДЕНИЕ

Влажные дисперсные грунты являются многокомпонентными системами, переход которых из талого состояния в мерзлое происходит в спектре отрицательных по Цельсию температур. При этом температура начала замерзания поровой воды в дисперсных средах может значительно отличаться от 0 °С, что обусловлено минерализацией порового раствора и ее взаимодействием с органоминеральным скелетом. Температура начала замерзания, соответствующая температуре появления льда в поровом пространстве, является важной характеристикой грунта и используется при оценке глубины промерзания–оттаивания грунтов в инженерно-геологических исследованиях.

Для незасоленных песчаных и крупнообломочных грунтов значение температуры начала замерзания в ряде случаев можно принять равным –0.1 °С, а для глинистых грунтов оценить в –0.25 °С [СП 25.13330.2012, 2012]. Однако температуру начала замерзания засоленных и органосодержащих (заторфованных) грунтов необходимо определять опытным путем. На практике при проведении предварительных инженерных расчетов часто используют рекомендуемые значения температуры начала замерзания, например, приведенные в [СП 25.13330.2012, 2012]. Они определены в зависимости от дисперсности грунта (песчаный, супесчаный, суглинистый и глинистый) и минерализации (засоленности) порового раствора, рассчитываемой исходя из степени засоленности и суммарной влажности мерзлого грунта. При этом чем выше дисперсность и засоленность, тем ниже температура начала замерзания.

Следует отметить, что температуры замерзания и оттаивания грунтов могут несколько различаться. Так, температура оттаивания некоторых тонкодисперсных грунтов на десятки доли градуса выше температуры замерзания, что может быть объяснено влиянием капиллярного эффекта при замораживании [Савельев, 1989]. Однако при циклическом промерзании–оттаивании грунтов эти температуры почти перестают различаться, что, вероятно, связано со структурно-текстурными преобразованиями в грунтах. Поэтому на практике обычно используют термин “температура замерзания”, подразумевая, что ее величина практически равна температуре оттаивания грунта.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР ЗАМЕРЗАНИЯ (ОТТАИВАНИЯ) ГРУНТОВ

Методы определения температур замерзания грунтов можно подразделить на экспериментальные и расчетные. Именно экспериментальное определение температур замерзания–оттаивания традиционно отводится первостепенная роль с самого начала становления геокриологии. При

этом методика опытного (экспериментального) нахождения температуры начала замерзания совершенствуется в соответствии с развитием аппаратной исследовательской базы для фиксации температуры, определяясь чувствительностью измерительных устройств, используемых в качестве индикаторов температуры [Андрианов, 1936; Боженова, 1954; Цытович, 1973; Лабораторные методы..., 1985; Методы..., 2004]. Следует отметить, что методика прямого экспериментального определения температуры начала замерзания грунтов, разработанная российскими мерзлотоведами в середине XX в., применяется специалистами в других научных областях при определении температур замерзания различных жидких сред, в том числе водных растворов различных веществ [Методы..., 2004; Геворкян, 2017].

Первоначально для исследования температур замерзания грунтов использовались термометры с визуальным контролем температур и дискретной ручной записью результатов, часто зависящей от оперативности экспериментатора. На смену термометрам пришли различные типы термодатчиков (термоэлектрические, терморезистивные, полупроводниковые, акустические, пьезоэлектрические), а запись температур стало возможно проводить в непрерывном режиме благодаря внедрению самопишущих потенциометров (КСП), и применять автоматическую обработку результатов. Однако чувствительность датчиков и автоматизация процесса измерения лишь повысили точность фиксации температур во времени, а методика эксперимента по определению искомой величины оставалась практически неизменной.

Как известно, температура начала замерзания (т. е. кристаллизации поровой воды в грунте) определяется по “полочке” на температурной кривой, которая фиксируется сразу после температурного скачка, возникающего в результате начала замерзания переохлажденного грунта [Методы..., 2004]. На практике, в зависимости от состава грунта и темпа охлаждения, в переохлажденном состоянии система может находиться достаточно долго. Поэтому иногда исследователи определяют температуру оттаивания мерзлого грунта, поскольку в этом случае нет эффекта перегрева системы. Но здесь возникают проблемы, связанные с наличием градиента температурного поля [Методы..., 2004; Teng et al., 2020]. Отметим, что экспериментально-техническая база для проведения экспериментов при промерзании и оттаивании остается практически одной и той же.

В литературе предпринимаются попытки использования новых технических решений по прямому измерению температур начала замерзания воды в грунтах, например, недавно предложен оригинальный метод “начала кристаллизации” [Колунин, Ишкова, 2019], который, однако, может

применяться только к образцам с однородной структурой, для которых и был разработан.

Температуру начала замерзания грунтов с известной влажностью можно также определять по кривой зависимости содержания незамерзшей воды от отрицательной по Цельсию температуры, полученной для данного грунта в широком диапазоне температур [Руководство..., 1973]. Для определения содержания незамерзшей воды используется много различных методов, как экспериментальных, так и расчетных. Продолжают появляться новые более точные и быстрые методы, а ранее предложенные методики развиваются и совершенствуются [Чувилин и др., 2020]. Однако следует отметить, что определение температуры замерзания по кривой незамерзшей воды является более долгим и трудоемким путем, чем прямые измерения.

К настоящему времени выполнено много экспериментальных работ по оценке влияния различных факторов на температуру замерзания грунтов, таких как дисперсность, минеральный состав, засоленность, содержание органических веществ и различных загрязнителей [Основы..., 1996; Мотенко, Гречищева, 2016; Алексютина, Мотенко, 2017; Li et al., 2020; Teng et al., 2020], а также влияния температуры замерзания на прочностные и деформационные характеристики мерзлых грунтов [Роман и др., 1994].

Наряду с экспериментами, многие исследователи предлагали расчетные формулы для оценки температуры замерзания грунтов, используя при этом и различные корреляции с физическими характеристиками грунтов. Так, на основе статистического анализа и обобщения экспериментальных результатов, полученных калориметрическим методом, была предложена эмпирическая формула расчета температуры замерзания, учитывающая значения предела пластичности и суммарной влажности исследуемых грунтов [Kozłowski, 2004, 2007, 2016]. Также оценка температуры начала замерзания грунтов проводилась на основе уравнения Клапейрона–Клаузиуса путем добавления дополнительных параметров и эмпирических коэффициентов [Koopmans, Miller, 1966; Kurylyk, Watanabe, 2013; Zhou et al., 2018]. Температура замерзания при одном и том же содержании поровой воды может зависеть от ряда факторов, таких как минеральный состав, распределение зерен и пор по размерам, удельная площадь поверхности, содержание растворенных веществ [Kozłowski, 2004, 2007; Zhou et al., 2018; Wang et al., 2020], и даже от массы образца [Kozłowski, 2009], что требует дальнейшего уточнения расчетных формул и четкого определения границ их применимости.

Возвращаясь к методам прямого определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов, следует отметить, что они предполагают использо-

вание экспериментальных установок, обязательным элементом которых являются замораживающие устройства (термостат или холодильный шкаф), куда помещают образцы исследуемого грунта, а также датчики различных модификаций для регистрации температуры. Однако методы прямого определения температуры замерзания (оттаивания) требуют существенных временных затрат (6 ч и более), а также необходимости размещения, подключения и непрерывного функционирования холодильного оборудования, что не всегда можно обеспечить.

В этой связи возникает необходимость разработки оперативных косвенных методов определения данных характеристик грунта. В качестве такого метода нами предлагается водно-потенциметрический метод (ВПМ) определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов на основе единичного измерения потенциала поровой воды в образце. В обоснование возможности практического использования предлагаемого метода проведен сравнительный анализ данных по определению температуры замерзания (оттаивания) грунтов, полученных традиционным экспериментальным путем в ходе охлаждения и нагревания грунтовых образцов и методом, основанным на измерении потенциала влаги в исследуемых образцах с термодинамическим пересчетом полу-потенциала в значение температуры замерзания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Принятая в данной работе методика включала использование двух методов оценки температур замерзания–оттаивания грунтов: прямого метода измерения температур замерзания (оттаивания) на основе использования экспериментальной установки “Kriolab Tbf”, разработанной ООО “Криолаб”, и водно-потенциметрического метода, который базируется на единовременном измерении потенциала поровой воды образца с естественной или заданной влажностью.

Методика экспериментального определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов. Экспериментальное определение температуры замерзания грунтов проводилось на оборудовании “Комплекс информационно-регистрирующий (ИРК) Kriolab” в комплектации “Tbf” с использованием программного обеспечения (ПО) Kriolab Tbf. Лабораторная установка для определения температуры начала замерзания грунта “Kriolab Tbf” состояла из специального мобильного морозильного шкафа, в который помещали контейнер (диаметром 30 см и высотой 40 см) с исследуемым грунтом (рис. 1). В контейнер с грунтом через отверстие в крышке вставляли датчик температуры, загерметизированный в игольчатую гильзу с

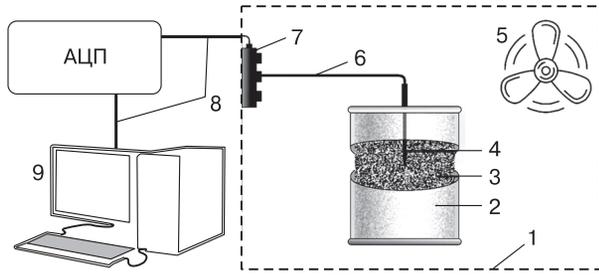


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки “Kriolab Tbf” для измерения температуры заморзания (оттаивания) грунтов:

1 – морозильный шкаф; 2 – контейнер для грунта; 3 – грунт; 4 – датчик температуры; 5 – вентилятор; 6 – термокоса; 7 – разветвитель для подключения дополнительных датчиков температуры; 8 – USB-кабель; 9 – компьютер с ПО Kriolab Tbf.

внешним диаметром 3 мм, соединенную с термокосой, которая подключалась к разветвителю. Через него термокоса производства ООО “Криолаб” соединялась с АЦП и далее посредством USB-кабеля с компьютером [Руководство..., 2019].

Температурные датчики в установке были протарированы с точностью ± 0.01 °С в криотермостате специальным эталонным термодатчиком.

При определении температуры начала заморзания грунтов в мобильной морозильной установке поддерживалась температура $-5...-10$ °С, которая была всегда ниже температуры возможного переохлаждения грунта. При определении температуры оттаивания мерзлых грунтов эксперименты проводились при значениях на $1-5$ °С выше ожидаемой температуры полного оттаивания грунта.

Температура начала заморзания (оттаивания) определялась следующим образом. Контейнеры (бюксы) для определения температуры заморзания плотно заполняли исследуемым грунтом, чтобы максимально исключить возможность искажения при измерении температуры датчиком, который устанавливали в геометрический центр бюкса. Оснащенные датчиками бюксы помещали в морозильную камеру с заранее выставленной температурой, после чего осуществляли подключение датчиков к компьютеру и запуск ПО в режиме непрерывной записи измерений. Завершение измерений в цикле промерзания производилось при показателях датчиков температуры в образцах, приближенных к установленной в морозильной камере температуре, и сохранении этой температуры образцов продолжительное время. Для последующего определения температуры начала оттаивания из морозильной камеры извлекали бюксы с образцами, а измерение температуры грунтов в бюксах продолжали посредством уста-

новленных в них датчиков до окончания цикла оттаивания.

По окончании измерений производили контроль влажности образцов.

Температура начала заморзания при обработке результатов в цикле замораживания находилась на полученной диаграмме по “полочке”, т. е. временному участку практически с нулевым температурным градиентом. Температура начала оттаивания определялась как точка пересечения двух касательных к участкам: начального этапа таяния порового льда и последующего этапа интенсивного оттаивания образца.

Время измерения составляло более 12 ч при определении температуры заморзания (при замораживании образцов от комнатной температуры до -10 °С) и не менее 8 ч при определении температуры оттаивания (при оттаивании образцов от -10 до $+10$ °С) [Руководство..., 2019].

Методика определения температуры заморзания (оттаивания) мерзлых грунтов водно-потенциометрическим методом на основе единичного измерения. Определение температуры заморзания (оттаивания) грунтов водно-потенциометрическим методом основывается на измерении потенциала поровой воды в исследуемом грунтовом образце с последующим термодинамическим пересчетом потенциала поровой воды в эквивалентную температуру, при которой поровая вода находится в равновесии со льдом в свободном объеме [Истомин и др., 2009]. При этом все измерения проводятся при положительной по Цельсию температуре и не требуют для подготовки образцов специального холодильного оборудования.

Предлагаемая методика определения температуры начала заморзания фактически представляет собой экспресс-метод. Это достигается быстрым измерением значений потенциала влаги исследуемого образца и схемой пересчета значений потенциала поровой воды через ее активность в температуру заморзания.

Экспериментальное измерение потенциала поровой воды проводилось на приборах WP4-T или WP4-C [Истомин и др., 2008, 2009, 2017], разработанных компанией Decagon Devices (США) [Campbell et al., 2007] (рис. 2). Измерительная система данных приборов основана на определении давления паров воды над влажным грунтом по методу “точки росы” [Campbell et al., 2007]. Используемые приборы позволяют получать значения потенциала поровой воды в температурном диапазоне от 15 до 43 °С. С учетом калибровочных измерений на эталонных растворах погрешность измерения потенциала поровой воды в диапазоне давлений от 0 до -5 МПа оценивается в пределах ± 0.05 МПа, а в диапазоне от -5 до -50 МПа составляет ± 1 % [Чувиллин и др., 2020].

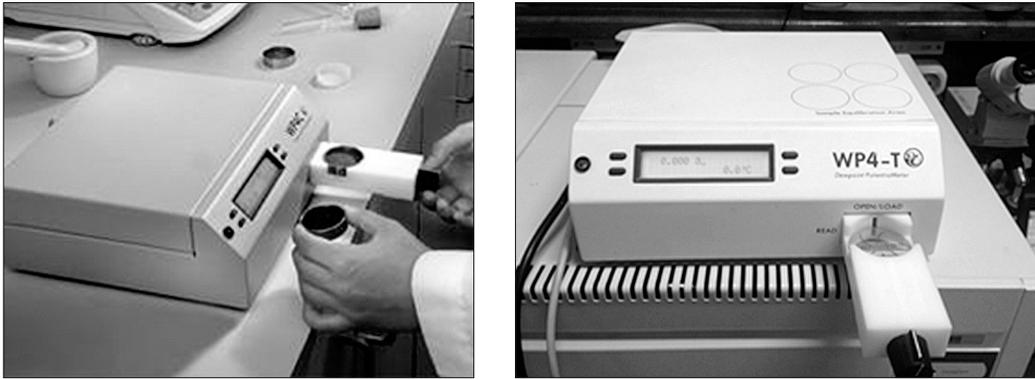


Рис. 2. Прибор WP4-T компании Decagon (США).

Пересчет значения измеряемого потенциала поровой воды (ϕ) в активность поровой воды (α) осуществляется по соотношению

$$\phi = \frac{RT\rho}{M} \ln \alpha, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К)); T – температура исследуемого образца пористой среды, К; M – молекулярная масса воды (18.015 г/моль); ρ – плотность воды (1.0 г/см³).

Принятая в работе методика измерений позволяет получать значения активности с точностью 0.0005 при $0.9 \leq \alpha \leq 1.0$ и до 0.0025 при $0.7 \leq \alpha \leq 0.9$ [Чувиллин и др., 2020].

Для измерения потенциала поровой воды в приборах типа WP4 в измерительную чашку прибора (с внутренними размерами: диаметр 3.8 см, высота 1.0 см) помещали образцы грунта с естественной или заданной влажностью. Влажный грунт нарушенного сложения равномерно распределяли по дну чашки так, чтобы получилась грунтовая таблетка высотой около 0.5 см (данный размер обусловлен спецификой работы измерительной системы прибора). Образцы ненарушенного сложения также должны иметь цилиндрическую форму диаметром около 3.8 см и высотой 0.5 см. Исходная влажность грунтового образца определялась путем его взвешивания на электронных весах с точностью ± 0.003 г, причем контроль влажности осуществляли до и после измерения потенциала поровой воды. Для известного значения влажности образца на приборах типа WP4 первоначально измеряли потенциал поровой воды, затем рассчитывали активность поровой воды по соотношению (1). В дальнейшем значения активности пересчитывали в равновесную температуру, которая фактически представляла температуру замерзания при заданной влажности грунтового образца. Пересчет полученных значений активности поровой воды α в диапазоне от 1.0 до 0.6–0.7 в эквивалентную температуру (t_{eq} , °C) проводился по

формуле [Истомин и др., 2017; Снособ..., 2018; Istomin et al., 2017]

$$t_{eq} = 103.25 \ln \alpha + 5.57(1 - \alpha)^2. \quad (2)$$

Полученное значение является температурой замерзания (оттаивания) исследуемого образца грунта с заданной исходной влажностью.

Время получения одного значения потенциала поровой воды в приборе WP4 (время установления равновесия в измерительной камере между водой в образце и воздухом, содержащим пары воды) составляет около 20–30 мин, лишь для глинистых грунтов с низкой влажностью оно может возрасти до 1 ч. При проведении измерений прибор WP4 подключался к компьютеру через стандартную программу Nureg Terminal для автоматизации процесса получения, накопления и обработки данных.

Таким образом, предлагаемая методика определения температуры начала замерзания позволяет провести большое количество измерений с высокой точностью, получить данные по температурам замерзания (оттаивания) для нескольких десятков образцов грунтов в широком диапазоне химико-минерального состава и дисперсности в течение одного рабочего дня.

Характеристика объектов исследования.

Методические исследования с использованием двух методов определения температур замерзания проводились на природных грунтах, типичных для верхних горизонтов многолетнемерзлых пород полуострова Ямал. Керна мерзлых грунтов были отобраны из скважин глубиной до 34 м (табл. 1), пробуренных во время инженерных изысканий на территории Южно-Тамбейского ГКМ.

Грунты, используемые для сравнительного определения температур замерзания разными методами, представлены в широком спектре дисперсности (песок, суглинок, глина) и засоленности, которая в исследуемых образцах отличается более чем на порядок и изменяется от 0.22 до 2.71 % (см. табл. 1).

Таблица 1. Краткая характеристика исследуемых грунтов

Номер образца	Глубина отбора, м	Наименование грунта*	Влажность, %	Число пластичности	Степень засоленности, %	Температура начала замерзания грунта**, °С
1	1.7–2.0	Глина легкая с примесью органического вещества	74.8	24.3	1.10	–1.0
2	4.0–4.3	Песок пылеватый	23.3	–	0.29	–0.8
3	4.8–5.0	Песок мелкий	28.5	–	0.22	–0.5
4	7.5–7.7	Суглинок легкий с примесью торфа	33.9	9.7	2.71	–4.1
5	11.1–11.3	Песок пылеватый	23.7	–	0.43	–1.1
6	14.0–14.5	Песок мелкий	20.2	–	0.29	–0.9
7	24.5–24.7	Суглинок легкий	14.9	8.8	0.50	–2.0
8	33.6–33.9	Суглинок легкий	18.6	8.5	0.54	–1.8

* По: [ГОСТ 25100-2011, 2013].

** Рассчитано по: [СП 25.13330.2012, 2012].

Для определения температур замерзания были взяты образцы с естественной влажностью. Максимальным значением влажности (около 75 %) отличались образцы глины, полученные из верхней части разреза с глубины около 2 м. Вниз по разрезу отмечалось уменьшение естественной влажности, при этом минимальное значение (15–19 %) было у образцов суглинка с глубин ниже 24 м (см. табл. 1). Плотность грунтов менялась от 1.25 г/см³ в образцах глины из верхней части разреза до 1.90–1.95 г/см³ в пылеватых песках, а плотность сухого грунта различалась в образцах более чем на 1 г/см³ (от 0.56 до 1.59 г/см³) и была тем больше, чем меньше влажность образцов. Коэффициент пористости имел максимальные значения у глины (3.64), снижаясь до 0.9 в суглинках и 0.7–0.8 в песчаных образцах. Плотность частиц грунта составляла 2.61–2.66 г/см³.

По данным рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре ДРОН 3 с использованием монохроматизированного CuK_α-излучения, во всех исследованных грунтах в песчаной фракции преобладающим минералом являлся кварц, составляющий до 71 % в мелком песке, в меньшем количестве содержатся плагиоклазы (до 19 %) и калиевые полевые шпаты (до 14 %). Глинистая фракция исследуемых грунтов была представлена хлоритом, иллитом и каолинитом. Кроме того, в грунтах было отмечено присутствие амфибола, пироксена, а также следы кристобаллита, гетита и пирита (не более 1 %). Данные минерального состава исследуемых образцов, полученные путем профильной обработки рентгеновских картин от неориентированных препаратов и расчета количества идентифицированных фаз методом корундовых чисел (метод Чанга, метод внутреннего стандарта), показывали определенное сходство, которое выражается в близких значениях содержания основных породообразую-

щих минералов, что может указывать на похожие первоначальные условия осадконакопления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе описанных выше двух методик были определены температуры замерзания (оттаивания) образцов грунтов с естественной влажностью и выполнено сравнение, которое показало хорошую сходимость полученных результатов (табл. 2).

Как видно из табл. 2, экспериментальная температура замерзания образцов, замеренная с помощью высокоточных температурных датчиков, практически совпадала с температурой замерзания, рассчитанной по измеренному в образцах потенциалу поровой воды. В рассмотренных грунтах разница между экспериментальным и расчетным значениями не превышала 0.05 °С и сопоставима с точностью каждого из рассмотренных методов. При этом следует учитывать, что для большинства экспериментальных установок, в том числе для определения температуры начала замерзания грунтов, точность температурных измерений должна быть не хуже ±0.1 °С, что является достаточным для решения стандартных мерзлотно-геологических задач [Методы..., 2004].

Если округлить полученные по двум методам значения температуры замерзания до десятых долей градуса Цельсия, то полученные расчетные значения совпадают с результатами прямых измерений, с возможным отличием в отдельных случаях не более чем на 0.1 °С. Это свидетельствует о достаточно высокой воспроизводимости результатов, полученных рассмотренными методами (рис. 3).

На рис. 3 видно, что все экспериментальные и расчетные точки имеют минимальное отклонение от диагонали. Коэффициент корреляции составил

Таблица 2. Сравнение температур замерзания, полученных экспериментальным и расчетным методами, для исследуемых грунтов

Номер образца	Наименование грунта	Влажность, %	Потенциал поровой воды, МПа	Активность поровой воды, д.ед.	Температура замерзания, °С		Разница температур замерзания, °С
					расчетная	замеренная	
1	Глина легкая с примесью органического вещества	74.8	-0.90	0.9935	-0.67	-0.68	+0.01
2	Песок пылеватый	23.3	-0.73	0.9947	-0.55	-0.52	-0.03
3	Песок мелкий	28.5	-0.66	0.9952	-0.49	-0.49	+0.00
4	Суглинок легкий с примесью торфа	33.9	-3.79	0.9728	-2.84	-2.81	-0.03
5	Песок пылеватый	23.7	-1.78	0.9872	-1.33	-1.31	-0.02
6	Песок мелкий	20.2	-1.48	0.9893	-1.11	-1.16	+0.05
7	Суглинок легкий	14.9	-1.63	0.9882	-1.22	-1.17	-0.05
8	Суглинок легкий	18.6	-0.99	0.9928	-0.74	-0.70	-0.04

$R^2 = 0.9981$. Следует отметить, что высокая корреляция двух методов наблюдается в широком диапазоне температур замерзания, обусловленных различными дисперсностью, влажностью и засоленностью (см. табл. 1). Фактически это означает, что предлагаемый водно-потенциометрический метод может широко использоваться для определения температур замерзания практически любых природных грунтов и служить надежной альтернативой прямому экспериментальному измерению температур замерзания (оттаивания) грунтов. При этом следует иметь в виду компактность приборов серии WP4, отсутствие расходных материалов, а также быстроту проведения измерений и расчетов и их высокую точность.

В то же время если сравнить результаты определения температуры начала замерзания, полученные экспериментальным и водно-потенциометрическим методами, с рассчитанными по [СП 25.13330.2012, 2012], то можно видеть, что величины отклонений значений начала температур замерзания в грунтовых образцах в последнем слу-

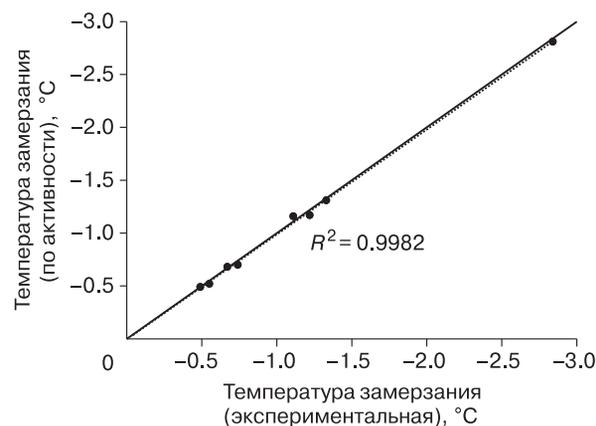


Рис. 3. Сопоставление значений температуры замерзания, полученных экспериментально и рассчитанных по активности поровой воды.

чае достигают 0.5–1.0 °С и более, особенно когда сравниваются засоленные образцы. Таким образом, расчетный метод по [СП 25.13330.2012, 2012] стоит рассматривать как предварительный результат, который в дальнейшем должен быть подтвержден экспериментальными определениями (рис. 4).

Следует отметить, что в отдельных случаях (например, для грунтов, сильно загрязненных легкоиспаряющимися органическими соединениями) применение ВПМ может иметь определенные ограничения. Но специальных исследований для

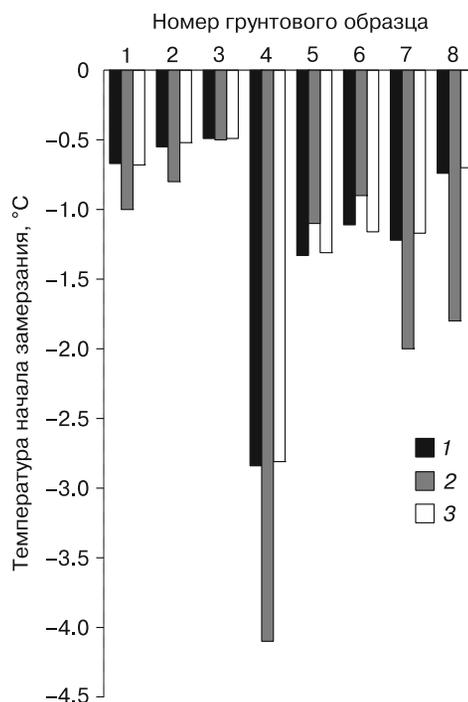


Рис. 4. Сравнение температур начала замерзания, полученных экспериментальным (1) и водно-потенциометрическим (3) методами, с рассчитанными (2) по [СП 25.13330.2012, 2012].

выяснения границ применимости ВПМ для определения температуры замерзания (оттаивания) загрязненных легкоиспаряющимися органическими соединениями грунтов авторами не проводилось.

ВЫВОДЫ

Температура начала замерзания (оттаивания) является важной характеристикой грунтов, что вызывает необходимость ее экспериментального определения при проведении различных мерзлотно-геологических исследований и инженерных изысканий. Однако стандартная методика экспериментального измерения температуры начала замерзания грунтов отличается значительной трудоемкостью, энергозатратностью и длительностью, поэтому в настоящее время особую актуальность приобретает разработка различных косвенных (экспериментально-расчетных) методов для ее оценки.

Предложенный в работе водно-потенциометрический метод определения температуры замерзания (оттаивания) грунтов основан на измерении потенциала поровой воды с последующим его пересчетом в эквивалентную температуру, которая фактически и является температурой замерзания (или оттаивания). Этот метод имеет ряд преимуществ, прежде всего связанных с использованием простого серийного прибора WP4, когда все необходимые измерения проводятся при комнатной температуре за достаточно короткий интервал времени (до 30 мин на один образец). При этом для получения значений температуры начала замерзания исследуемых грунтов отсутствует необходимость в использовании какого-либо холодильного оборудования.

Проведенное сравнение результатов определения температуры замерзания для одних и тех же грунтов прямым измерением и ВПМ показало их хорошую согласованность: максимальное отклонение не превышает 0.05 °С, что находится в пределах точности прецизионных экспериментальных установок по определению температуры начала замерзания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 18-77-10063) и РФФИ (проект № 19-55-51001).

Литература

Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдарской губы Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 13–25.

Андрианов П.И. Температура замерзания грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1936, 16 с.

Боженова А.П. Инструктивные указания по лабораторным методам определения температуры переохлаждения и начала замерзания грунтов // Материалы по лабораторным

исследованиям мерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1954, сб. 2, с. 16–31.

Геворкян С.Г. К определению минимальной температуры воздуха во Фракии зимой 400–399 гг. до н.э. (на основании сообщения Ксенофонта) // Пространство и время, 2017, № 1 (27), с. 225–233.

ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2013, 38 с.

Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Буханов Б.А. Ускоренный метод оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 134–139.

Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Махонина Н.А. и др. Метод расчета кривой незамерзшей воды по потенциалу влаги // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, Экспресс, 2008, с. 398–401.

Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Махонина Н.А., Буханов Б.А. Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах по потенциалу влаги // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 35–43.

Колунин В.С., Ишкова З.А. Метод “начала кристаллизации” воды для определения температуры начала замерзания грунтов // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 6, с. 3–7.

Лабораторные методы исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 351 с.

Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.

Мотенко Р.Г., Гречищева Э.С. Температура начала замерзания и фазовый состав влаги грунтов различного гранулометрического состава при нефтесолевом загрязнении // Материалы пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, с. 69–76.

Основы геокриологии. Ч. 2. Литогенетическая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, 399 с.

Роман Л.Т., Артюшина В.И., Иванова Л.Г. Зависимость прочности мерзлых засоленных грунтов от температуры начала замерзания грунтовой влаги // Геоэкология, 1994, № 1, с. 49–55.

Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов / Ред. Р.М. Саркисян, З.А. Нерсесова, С.С. Явлов, А.Г. Зацарная. М., Изд-во лит. по стр-ву, 1973, 194 с.

Руководство по эксплуатации. Комплекс для определения начала замерзания грунта “Kriolab Tbf” 4211-001-62766184-2019. М., ООО “Криолаб”, 2019, 11 с.

Савельев Б.А. Физико-химическая механика мерзлых пород. М., Недра, 1989, 508 с.

Способ определения содержания незамерзшей воды в грунтах: патент RU 2654832 С1. Российская Федерация: МПК G01N 25/56 (2006.01) / Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Буханов Б.А.; патентообладатель Сколковский ин-т науки и технологий. – № 2017121829; заявл. 21.06.2017; опубл. 22.05.2018, Бюл. № 15.

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., ООО “Аналитика”, 2012, 118 с.

Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 446 с.

Чувиллин Е.М., Соколова Н.С., Буханов Б.А. и др. Применение водно-потенциометрического метода для определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах различного состава // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 5, с. 16–28.

- Campbell G.S., Smith D.M., Teare B.L.** Application of a Dew Point Method to obtain the soil water characteristic // Springer Proc. in Physics, 2007, No. 112, p. 71–77.
- Istomin V., Chuvilin E., Bukhanov B. et al.** Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in sediments // Cold Regions Sci. and Technol., 2017, vol. 137, p. 60–67.
- Koopmans R.W.R., Miller R.** Soil freezing and soil water characteristic curves 1 // Soil Sci. Soc. Amer. J., 1966, vol. 30 (6), p. 680–685.
- Kozlowski T.** Soil freezing point as obtained on melting // Cold Regions Sci. and Technol., 2004, vol. 38 (2–3), p. 93–101, DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.09.001.
- Kozlowski T.** A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems // Cold Regions Sci. and Technol., 2007, vol. 49 (3), p. 226–236, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.03.013.
- Kozlowski T.** Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil–water systems // Cold Regions Sci. and Technol., 2009, vol. 59 (1), p. 25–33, DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.05.009.
- Kozlowski T.** A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature // Cold Regions Sci. and Technol., 2016, vol. 122, p. 18–25, DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.10.009.
- Kurylyk B.L., Watanabe K.** The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils // Adv. Water Resources, 2013, vol. 60, p. 160–177.
- Li G., Zhang J., Zhou Z. et al.** A novel freezing point determination method for oil – contaminated soils based on electrical resistance measurement and its influencing factors // Sci. Total Environ., 2020, vol. 721 (137821), p. 1–11, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137821.
- Teng J., Koub J., Yanc X. et al.** Parameterization of soil freezing characteristic curve for unsaturated soils // Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102928), p. 1–29, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102928.
- Wang Q., Qi J., Wang S. et al.** Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess // Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102922), p. 1–21, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102922.
- Zhou J., Wei C., Lai Y. et al.** Application of the generalized Clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content // Water Resour. Res., 2018, vol. 54, p. 9412–9431, DOI: 10.1029/2018WR023221.
- State Standard, 2013. Working Document 25100-2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 38 p. (in Russian).
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Fast estimation of unfrozen water content in frozen soils. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 6, p. 116–120.
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Makhonina N.A. et al. Method for calculating the curve of unfrozen water by moisture potential. In: Materials Intern. Conf. “Cryogenic resources of the polar and mountainous regions. The state and prospects of permafrost engineering”. Tyumen, Ekspres, 2008, p. 398–401 (in Russian).
- Istomin V.A., Chuvilin E.M., Makhonina N.A., Bukhanov B.A. Temperature dependence of unfrozen water content in sediments on the water potential measurements. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 2, p. 35–43 (in Russian).
- Kolunin V.S., Ishkova Z.A. The “water crystallization-onset” method for determining the freezing point of soils. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 6, p. 3–6.
- Ershov E.D. (Ed.). Laboratory methods for the study of frozen rocks. Moscow, Moscow University Press, 1985, 351 p. (in Russian).
- Ershov E.D. (Ed.). Methods of geocryological research. Moscow, Moscow University Press, 2004, 512 p. (in Russian).
- Motenko R.G., Grechishcheva E.S. The freezing temperature and phase composition of moisture in soils of different particle size distribution during oil and salt contamination. In: Materials of the Fifth Conf. of Russian Geocryologists (Moscow, June 14–17, 2016). Moscow, Universit. Kniga, 2016, p. 69–76 (in Russian).
- Ershov E.D. (Ed.). Fundamentals of Geocryology. Part 2. Lithogenetic Geocryology. Moscow, Moscow University Press, 1996, 399 p. (in Russian).
- Roman L.T., Artyushina V.I., Ivanova L.G. Dependence of the strength of frozen saline soils on the temperature of the onset of ground moisture freezing. Geoekologiya [Geoecology], 1994, No. 1, p. 49–55 (in Russian).
- Sargsyan R.M., Nersesova Z.A., Vyalov S.S., Zazarnaya A.G. (Eds.). Guidelines for the determination of the physical, thermophysical and mechanical characteristics of frozen soils. Moscow, Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1973, 194 p. (in Russian).
- Manual. Complex for determining the beginning of soil freezing “Kriolab TbP” 4211-001-62766184-2019. Moscow, OOO “Kriolab”, 2019, 11 p. (in Russian).
- Saveliev B.A. Fiziko-khimicheskaya mekhanika merzlykh porod [Physico-chemical Mechanics of Frozen Rocks]. Moscow, Nedra, 1989, 508 p. (in Russian).
- Patent RU 2654832 C1. Sposob opredeleniya sodержaniya nezamerzshykh void [Method for unfrozen water content determination]. Istomin V.A., Chuvilin E.M., Bukhanov B.A. Russian Federation MPK G01N 25/56 (2006.01). Patent Holder Skolkovo Institute of Science and Technology. – No. 2017121829. Claimed 21.06.2017. Published 22.05.2018, Bull. No. 15 (in Russian).
- SP 25.13330.2012. Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow, OOO “Analitika”, 2012, 118 p. (in Russian).
- Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen Soils]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1973, 446 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Sokolova N.S., Bukhanov B.A., Shevchik F.A., Istomin V.A., Mukhametdinova A.Z., Alekseev A.G., Grechishcheva E.S. Application of water-potentiometric method for unfrozen water content determination in different frozen soils. Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 5, p. 16–28.

References

- Aleksyutina D.M., Motenko R.G. The composition, structure and properties of frozen and thawed deposits on the Baydaratskaya Bay coast, Kara Sea. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 1, p. 11–22.
- Andrianov P.I. Temperatura zamerzaniya gruntov [The Freezing Temperature of Soils]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1936, 16 p. (in Russian).
- Bozhenova A.P. Instructions on laboratory methods for determining the temperature of subcooling and the beginning of soil freezing. In: Materials on laboratory studies of frozen soils. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1954, vol. 2, p. 16–31 (in Russian).
- Gevorgyan S.G. To determine the minimum air temperature in Thrace in the winter of 400–399. BC. (based on the message of Xenophon). Prostranstvo i Vremya [Space and Time], 2017, vol. 27. No. 1, p. 225–233 (in Russian).

- Campbell G.S., Smith D.M., Teare B.L. Application of a Dew Point Method to obtain the soil water characteristic. Springer Proc. in Physics, 2007, No. 112, p. 71–77.
- Istomin V., Chuvilin E., Bukhanov B. et al. Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in sediments. Cold Regions Sci. and Technol., 2017, vol. 137, p. 60–67.
- Koopmans R.W.R., Miller R. Soil freezing and soil water characteristic curves 1. Soil Sci. Soc. Amer. J., 1966, vol. 30 (6), p. 680–685.
- Kozlowski T. Soil freezing point as obtained on melting. Cold Regions Sci. and Technol., 2004, vol. 38 (2–3), p. 93–101, DOI: 10.1016/j.coldregions.2003.09.001.
- Kozlowski T. A semi-empirical model for phase composition of water in clay-water systems. Cold Regions Sci. and Technol., 2007, vol. 49 (3), p. 226–236, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.03.013.
- Kozlowski T. Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil–water systems. Cold Regions Sci. and Technol., 2009, vol. 59 (1), p. 25–33, DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.05.009.
- Kozlowski T. A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature. Cold Regions Sci. and Technol., 2016, vol. 122, p. 18–25, DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.10.009.
- Kurylyk B.L., Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils. Adv. Water Resources, 2013, vol. 60, p. 160–177.
- Li G., Zhang J., Zhou Z. et al. A novel freezing point determination method for oil – contaminated soils based on electrical resistance measurement and its influencing factors. Sci. Total Environ., 2020, vol. 721 (137821), p. 1–11, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137821.
- Teng J., Koub J., Yanc X. et al. Parameterization of soil freezing characteristic curve for unsaturated soils. Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102928), p. 1–29, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102928.
- Wang Q., Qi J., Wang S. et al. Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess. Cold Regions Sci. and Technol., 2020, vol. 170 (102922), p. 1–21, DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102922.
- Zhou J., Wei C., Lai Y. et al. Application of the generalized Clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content. Water Resour. Res., 2018, vol. 54, p. 9412–9431, DOI: 10.1029/2018WR023221.

*Поступила в редакцию 25 мая 2020 г.,
после доработки – 16 августа 2020 г.,
принята к публикации 29 августа 2020 г.*