Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 77—81

УДК 551.328/345

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГРЕГАЦИОННОГО ВНУТРИГРУНТОВОГО ЛЬДА

С. Е. Гречищев, А. В. Павлов, Ю. Б. Шешин, О. В. Гречищева

Институт криосферы Земли СО РАН, 117982, Москва, ул. Вавилова, 30/6, к. 85, Россия

Представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований физических свойств сегрегационного внутригрунтового льда. Предложен экспресс-метод нестационарного теплового режима с циклически изменяющейся температурой для измерения коэффициента температуропроводности мерзлого грунта. Установлено, что в среднем теплопроводность сегрегационного внутригрунтового льда на 40 % ниже, а плотность на 10 % меньше соответствующих стандартных значений.

Мерзлые грунты, плотность, сегрегация, теплопроводность, температуропроводность, внутригрунтовый лед

THE EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SEGREGATIONAL ICE PHYSICAL PROPERTIES

S. E. Grechishchev, A. V. Pavlov, Yu. B. Sheshin, O. V. Grechishcheva

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 117982, Moscow, Vavilov str., 30/6, room 85, Russia

The results of the experimental studies of intrasoil segregational ice physical properties are reported. An express method of unstationary heat regime with cyclic temperature changes for specific temperature conductivity measurements is proposed. The experiments have shown that the average heat conductivity of segregational intrasoil ice was by 40 % and density by 10 % lower compared to their standard values.

Frozen soils, segregation, density, heat-conductivity, temperature conductivity, intrasoil ice

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени физические свойства внутригрунтового сегрегационного льда остаются неизученными, что связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, это практические трудности отбора образцов сегрегационного льда, имеющих размеры, необходимые для испытаний, поскольку сегрегация льда обычно выглядит как частое чередование тонких прослоев льда и массивного мерзлого грунта. Во-вторых, обычно априорно предполагается, что физические свойства сегрегационного льда не могут сильно отличаться от его стандартных свойств.

Ранее авторами настоящей работы в процессе исследований в области криогенной миграции и кинетики фазовых переходов влаги в дисперсных грунтах было установлено прежде не известное физико-химическое явление — аномальность физических свойств сегрегационного льда [*Grechishchev, Shankov, 1993*]. В некоторых опытах его плотность оказалась в 1,5 раза, а теплопроводность в 4 раза меньше стандартных значений. Лед содержал пузырьки газа и частицы грунта, концентрация которых неоднородно изменялась по толщине ледяных прослоев. Причины описанных явлений до настоящего времени остаются неизвестными, а сами физические свойства сегрегационного льда — неизученными. Очевидно, что они связаны каким-то образом с условиями промерзания грунта, его гранулометрическим составом и механизмом криогенной миграции влаги, также пока недостаточно понятым.

Целью исследований являлось экспериментальное изучение физических свойств (плотности и теплофизических показателей) сегрегационного внутригрунтового льда, образующегося при промораживании образцов дисперсных грунтов.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕРЗЛОГО ГРУНТА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА С ЦИКЛИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА

Определение $\lambda_м$ коэффициента теплопроводности мерзлого грунта принятыми методами весьма трудоемко, требует исключения колебаний температуры воздуха внутри камеры и применения холодильников с высокостабильным поддержанием температуры. Однако тот же эффект колебания температуры воздуха (среды), а, таким образом, и температуры мерзлого образца, можно использовать для экспресс-оценки коэффициента эффективной температуропроводности $a_{эф}$. Автоматическое поддержание температуры в камере холодильника в этом случае загрубляется.

Для экспресс-оценки коэффициента теплопроводности мерзлого грунта $\lambda_м$ предлагается ме-

тод нестационарного теплового режима с циклическим изменением температуры поверхности образца и экспериментальным нахождением эффективного значения коэффициента температуропроводности $a_{эф}$. Значение коэффициента теплопроводности в этом случае находится по формуле [*Руководство..., 1973*]:

$$\lambda_м = a_{эф} \cdot C_{эф} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

где $C_{эф}$ — эффективная теплоемкость мерзлого грунта,

$$C_{эф} = C^м_{эф} \cdot \gamma^м_{об} \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{°C)},$$

где $C^м_{эф}$ — удельная эффективная теплоемкость; $\gamma^м_{об}$ — объемный вес мерзлого грунта в кг/м^3.

Удельная эффективная теплоемкость может быть приближенно задана формулой [*Руководство..., 1973*]:

$$C^м_{эф} = C_м + L \cdot \frac{\gamma^м_{ск}}{\gamma^м_{об}} \cdot \frac{dw_н}{dQ} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)},$$

где $C_м$ — удельная теплоемкость мерзлого грунта в Дж/(кг·°С); $\gamma^м_{ск}$ —объемный вес минерального скелета мерзлого грунта в кг/м^3; L — $3{,}35 \cdot 10^5$ Дж/кг — удельная теплота фазовых превращений вода—лед в расчете на единицу массы; $\frac{dw_н}{dQ}$ — изменение количества незамерзшей воды в долях единицы на один градус при средней температуре опыта.

Удельная теплоемкость мерзлого грунта $C_м$ определяется расчетным способом по весовому соотношению основных составляющих грунта [*Руководство..., 1973*]:

$$C_м = \frac{C_{ск} + C_л \cdot w_с + (C_в - C_л) \cdot w_н}{1 + w_с} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)},$$

где $C_{ск}$, $C_в$, $C_л$ — удельная теплоемкость минерального скелета грунта, воды и льда в Дж/(кг·°С), $w_с$ —весовая влажность грунта в долях единицы, $w_н$ — количество незамерзшей воды при заданной температуре мерзлого грунта в долях единицы.

Таким образом, на основании вышеизложенного

$$\lambda_м = a_{эф} \cdot C_{эф} = a_{эф} \cdot \gamma^м_{об} \cdot C^м_{эф} =$$

$$= a_{эф} \cdot \left(\gamma^м_{об} \cdot C_м + L \cdot \gamma^м_{ск} \cdot \frac{dw_н}{dQ}\right), \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)};$$

где $C_м = \frac{C_{ск} + C_л \cdot w_с + (C_в - C_л) \cdot w_н}{1 + w_с}$, Дж/(кг·°С).

Если образец мерзлого грунта в теплоизолирующей оболочке находится при нестационарном тепловом режиме за счет периодических колебаний температуры окружающей среды (воздуха в холодильнике), то модули амплитуд колебаний температуры на поверхности — A_0, на глубине z — A_z и на дне — A_h образца, а также значение периода колебаний, будут характеризовать теплофизические свойства мерзлого грунта. Желательно выбрать такую геометрию и объем образца, чтобы $A_h \ll A_z$. В этом случае возможно рассматривать высоту образца как бесконечную.

Нами были выбраны следующие размеры образца: $h = 45$ мм, $d = 70$ мм. Глубина размещения термопары (z) равна 25 мм.

Коэффициент температуропроводности a для циклического теплового режима $a_{экс}$ может быть найден с помощью известной формулы

$$A_z = A_0 \cdot e^{-(\omega/2a)^{1/2} z}, \text{ град.},$$

где A_0 — амплитуда колебаний температуры на поверхности мерзлого образца грунта в °С; A_z — амплитуда колебаний температуры на глубине z (м) от поверхности мерзлого образца грунта в °С; $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$, где T — период колебаний температуры в образце грунта в секундах, т. е.

$$A_z = A_0 \cdot e^{-(\pi/Ta)^{1/2} z}, \text{ град.}$$

Проведя несложные преобразования, получаем

$$a = \frac{\pi \cdot z^2}{T \cdot \left(\ln \frac{A_0}{A_z}\right)^2}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Это экспериментально получаемое значение коэффициента температуропроводности будет характеризовать эффективную теплопроводность мерзлого образца, поэтому обозначим его в виде $a_{эф}$.

Таким же образом можно получить значения коэффициента температуропроводности для отдельных слоев мерзлого образца, если будут известны модули значений колебаний температуры на границе слоев.

В случае, когда в однородной криотекстуре имеется слоевое выделение льда и требуется установить его теплопроводность, а толщины выделения льда недостаточно для непосредственного измерения, определяют коэффициенты теплопроводности соседних слоев мерзлого грунта (с содержанием и без слоевого выделения льда), а значение коэффициента теплопроводности ледяного прослойка $\lambda_л$ находится по формуле [*Лабораторные..., 1985*]:

$$\lambda_л = \frac{\lambda_м \cdot л_в \cdot \lambda_г}{\lambda_г - (1 - л_в) \cdot \lambda_м}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

где $\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности слоя мерзлого грунта с ледяным прослойком; $\lambda_г$ —

Таблица 1. Водно-физические свойства и гранулометрический состав супеси

Размер частиц, мм	1,0—0,5	0,5—0,25	0,25—0,10	0,10—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001
Содержание частиц, %	0,1	0,5	2,7	11,6	56,6	5,2	13,3	10,0

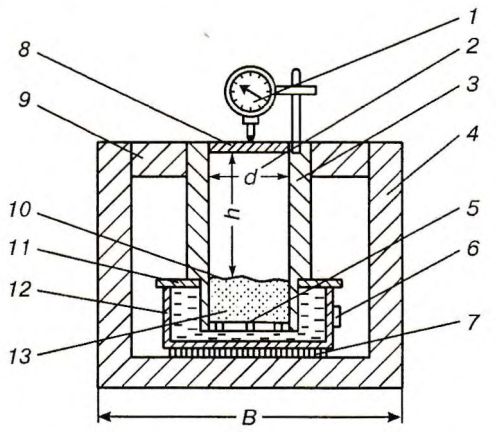
Примечание. Гигроскопическая влажность, $W_{гг} = 1{,}84$ %; влажность на границе раскатывания $W_р = 27$ %; влажность на границе текучести $W_т = 34$ %; число пластичности $I_p = 7$ %.

коэффициент теплопроводности соседнего слоя мерзлого грунта без ледяного прослойка; $л_в$ — объемная льдистость грунта за счет ледяного включения в долях единицы.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Для изучения сегрегационного льдовыделения в промерзающих грунтах был использован прибор, устройство которого поясняется на рисунке. В основу работы прибора положена открытая схема промерзания. Промораживание образца осуществлялось за счет отрицательной температуры воздуха в холодильной камере. Нижняя часть образца находилась в контакте с водой в подпиточной ванночке. Температура воды в ванночке в течение опыта была положительной, термостатирование воды осуществлялось специальным устройством.

Для получения показателей физических свойств сегрегационных льдов, таких как коэффициенты температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости, в приборы дополнительно введена возможность термопарного измерения температуры образцов с шагом в 1 см по вертикали. Температура измерялась около внутренней поверхности обоймы на контакте с образцом. Кроме того, одна термопара помещалась под штампом в верхней части образца. Был изготовлен блок медь-константановых термопар для этих целей. Измерения выполнялись микроамперметром М-195/1, подключались термопары с помощью переключателя.



$h = 45$ мм $d = 70$ мм $B = 280$ мм

Устройство для измерения сегрегации льда в замерзающих грунтах.

1 — индикатор деформаций; *2* — образец грунта; *3* — форма для образца; *4* — пенопластовый ящик; *5* — фильтр из плексигласа; *6* — термистор; *7* — плоский подогреватель; *8* — металлическая пластина; *9* — пенопластовая крышка; *10* — бумажный фильтр; *11* — крышка водяной ванны; *12* — водяная ванна, *13* — водонасыщенный песок.

Опыты по экспериментальному изучению направленной кристаллизации в грунтах проводились на супеси, отобранной на территории Бованенковского ГНКМ.

Водно-физические свойства супеси Бованенковского ГНКМ приведены в табл. 1. Опыты проводились на искусственно приготовленных образцах. Была принята следующая методика приготовления образцов. Воздушно-сухой грунт размельчался механически и увлажнялся до определенной влажности дистиллированной водой, тщательно перемешивался. Для более равномерного распределения влаги в пасте ее помещали на 1 сутки в эксикатор.

Определялись исходные характеристики образцов: влажность, плотность, плотность скелета, высота, объем; рассчитывались объемные концентрации скелета грунта, влаги и пористости.

Лабораторные исследования состояли в одномерном промораживании образцов в условиях подпитки водой и длительной сегрегации, которая необходима для выращивания достаточно толстых шлиров льда, поскольку обычная тонкошлировая структура не позволяет получить образцы льда для необходимых измерений. Всего выполнено 9 опытов. По окончании опыта образец грунта извлекался из формы и разделывался. Одновременно измерялась величина промерзшей части, выполнялось описание криогенных текстур образца, производился отбор проб по высоте образца, для каждой пробы получали значения влажности, плотности и плотности скелета. По полученным значениям рассчитывались объемные концентрации скелета грунта, льда и пористости для каждой пробы, т. е. для определенных параметров по высоте промороженного образца.

Высота образцов составляла 45 мм, диаметр 70 мм. Начальная влажность 21—22 %, начальная плотность грунта — 2000 кг/м^3. Температу-

ра верхнего конца образца была −6 (±0,2) °С, температура воды в ванночке +3 (±0,5) °С.

Для проведения измерений с целью определения теплофизических свойств сегрегационного внутригрунтового льда по завершению опыта по промораживанию образец дополнительно охлаждался, чтобы фронт кристаллизации сместился на 2—3 см вниз — в этом случае можно пренебречь влиянием фазовых переходов воды на фронте кристаллизации на температурные измерения в вышележащих слоях образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты опытов приведены в табл. 2 и 3.

При промерзании образцов образовалась криогенная текстура из чередования прослоев льда и прослоев массивного мерзлого грунта. Продолжительность опытов была до 4 недель, величина пучения составляла 1,5—3,5 см. Максимальная толщина прослойка льда была получена 6—8 мм. Лед образовался разной степени прозрачности: прозрачный, мутноватый, в виде снежной крошки. Газовые пузырьки в основном соседствовали с грунтовыми прослойками, либо включениями.

Для каждой мерзлой пробы было найдено значение плотности льда, считая, что вся газовая компонента содержится во льду. Полученные значения плотности (лед + газ) находятся в интервале 0,6—0,91 т/м³. Среднее значение плотности (лед + газ) составило 0,82 т/м³, что на 10 % меньше удельного веса льда. Эти результаты получены для средних температурных градиентов 0,8—1,5 °С/см.

Теплофизические свойства мерзлого образца рассчитывались по формулам, приведенным выше. Коэффициент теплопроводности внутригрунтового сегрегационного льда рассчитывался для одиночных прослоев в однородной криотекстуре мерзлого образца с близкими значениями влажности для соседних слоев, исключая включение прослоев льда. Результаты четырех опытов по определению теплофизических свойств для мерзлого образца супеси и в том числе для сегрегационного внутригрунтового льда $\lambda_л$ приведены в табл. 3. Среднее значение коэффициента теплопроводности сегрегационного внутригрунтового льда составило 1,2 Вт/(м·°С), что на

Таблица 2. **Основные результаты опытов с образцами супеси**

№ опыта	$T_{ср}$ верха образца, °С	h промерзания образца, см	$T_{ср}/h$, °С/см	Скорость пучения (средняя), мм/сут	Текстура образца	$\rho_{льда + газ}$, т/м³ (сверху вниз)
1	−6,5	5	1,3	16/20 = 0,8	Линзовидная, массивная	0,87; 0,72
3	−6	~4	1,5	17/7 ~ 2,4	Линзовидная	0,83
4	−6	~4	1,5	20/11 ~ 1,8	Массивная, линзовидная	0,73; 0,6; 0,71
5	−6	4,7	1,3	14/5 = 2,8	Слоисто-волнистая, массивная	0,85; 0,79; 0,79
5*	−5,5	6,6	0,8	20/8 = 2,5	Массивная, слоистая	0,91; 0,85; 0,80
6	−6	4,6	1,3	12/5 = 2,4	Массивная, слоисто-волнистая	0,71; 0,88; 0,78
6*	−6	7,1	0,85	34/28 ~ 1,2	Слоистая	0,85; 0,85; 0,82; 0,83; 0,85
7	−6	6,8	0,9	28/13 ~ 2,2	Слоистая, крупнослоистая	0,84; 0,85; 0,81; 0,86

* Повторные измерения.

Таблица 3. **Теплофизические свойства мерзлого образца супеси (для двух соседних слоев)**

№ п/п	Без прослойка льда			С прослойком льда				
	$C_г \cdot 10^{-6}$ Дж/(м³·°С)	$a_г \cdot 10^6$ м²/с	$\lambda_г$, Вт/(м·°С)	$C_м \cdot 10^{-6}$ Дж/(м³·°С)	$a_м \cdot 10^6$ м²/с	$\lambda_м$, Вт/(м·°С)	$л_в$	$\lambda_л$, Вт/(м·°С)
1	8,82	0,200	1,76	8,53	0,169	1,44	0,5	1,21
2	8,97	0,188	1,69	8,41	0,176	1,48	0,4	1,25
3	9,23	0,195	1,80	8,84	0,181	1,60	0,2	1,11
4	9,03	0,200	1,80	8,20	0,172	1,41	0,5	1,15
Среднее значение	9,0	0,20	1,80	8,45	0,175	1,48	—	1,18

Примечание. $C_г$, $a_г$ и $\lambda_г$ — объемная теплоемкость, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности мерзлого грунта без прослойка льда; $C_м$, $a_м$ и $\lambda_м$ — то же, с прослойком льда; $л_в$ — объемная льдистость грунта за счет ледяного включения; $\lambda_л$ — коэффициент теплопроводности льда в прослойке; значения $C_г$ были получены для $\Delta W_н/\Delta\Theta = 0{,}02$ при $\Theta = -1{,}5$·°С; $C_м$ — для $\Delta W_н/\Delta\Theta = 0{,}05$ при $\Theta = -0{,}7$·°С. Для этого использована экспериментальная зависимость количества незамерзшей воды от температуры мерзлого грунта (бованенковской супеси).

40 % ниже данных СНиПа для льда средней плотности [*СНиП..., 1990*]. Этот результат получен для оценки температурных градиентов 0,8—1,5 °С /см.

Отмечается взаимосвязь между плотностью сегрегационного внутригрунтового льда и его теплопроводностью: с уменьшением плотности льда теплопроводность его тоже уменьшается.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод определения эффективной температуропроводности мерзлых грунтов для нестационарного теплового режима с циклическим изменением температуры образца грунта позволяет давать экспресс-оценку коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов.

2. При наличии основных теплофизических характеристик мерзлого грунта по экспериментальным данным эффективной температуропроводности $a_{эф}$ возможно рассчитать производную количества незамерзшей влаги по температуре для среднего значения температуры образца на глубине основного измерения. По данным измерения $a_{эф}$ для нескольких значений температуры мерзлых образцов-близнецов, можно построить зависимость содержания незамерзшей влаги от температуры.

3. Получены значения коэффициента теплопроводности $\lambda_л$ для включений сегрегационного внутригрунтового льда. Среднее значение коэффициента теплопроводности составило 1,2 Вт/(м·°С), что на 40 % ниже данных СНиПа для льда средней плотности.

4. Полученные значения плотности сегрегационного внутригрунтового льда находятся в интервале 0,6—0,9 т/м^3. Среднее значение плотности (лед + газ) составило 0,82 т/м^3, что на 10 % меньше удельного веса льда.

5. Экспериментальные факты малой плотности и малой теплопроводности сегрегационного льда (малых по сравнению с известными стандартными значениями для обычного льда) предположительно могут быть объяснены наличием в сегрегационном льде пузырьков воздуха. Во время криогенной миграции влаги растворенный в ней воздух может создавать самостоятельный массопоток внутри газированного флюида „вода + воздух“, выделяясь в виде пузырьков при фазовом переходе воды в лед и фиксируясь в последнем. Таким образом, в первом приближении проблема аномальных свойств сегрегационного льда может быть сведена к разысканию фиксируемого во льде потока воздуха, т. е. к определению его концентрации во льде.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-05-64669).

Литература

Лабораторные методы исследования мерзлых пород / Ред. Э. Д. Ершов. М., Изд-во МГУ, 1985, 351 с.

Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1973, 192 с.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты зданий на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1990.

Grechishchev S., Shankov V. Development of physical-chemical model for Cryogenic Heaving and Enlargement of Segregated Ice in Freezing Sandy — Clayey Soils // Proc. Permafrost Sixth Internat. Conf. Beijing, China, July 5—9, 1993. Vol. 1. South China, Univ. Technol. Press, 1993, p. 198— 203.

Поступила в редакцию
23 октября 2001 г.