

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРЕДКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ ПОРОВОЙ ВЛАГИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ В ГРАДИЕНТНОМ ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУР

С.Е. Гречищев, Арк.В. Павлов, О.В. Гречищева

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, cryogrek@mail.ru*

Представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований закономерностей формирования переохлаждения поровой влаги при замерзании дисперсных грунтов. Получены зависимости статистик температур и продолжительности переохлаждения до начала спонтанной кристаллизации поровой влаги от градиента температуры вблизи поверхности переохлажденного грунта.

*Мерзлые грунты, кристаллизация поровой влаги, температура переохлаждения, температура начала замерзания, градиент температуры*

### PRECRYSTALLIZATION SUPERCOOLING REGULARITIES OF PORE WATER OF THE FINE-GRAINED GROUND IN THE TEMPERATURE GRADIENT FIELD

S.E. Grechishchev, Ark.V. Pavlov, O.V. Grechishcheva

*Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, cryogrek@mail.ru*

The results of experimental laboratory investigations into the regularities of pore water supercooling formation under the freezing of fine-grained ground have been presented. Dependencies of statistics of temperature and duration of supercooling (before the beginning of the pore water spontaneous crystallization) upon the temperature gradient near the surface of supercooled ground have been obtained.

*Frozen ground, pore water crystallization, temperature of supercooling, initial temperature of freezing, temperature gradient*

## ВВЕДЕНИЕ

При исследовании свойств промерзающих грунтов и механизмов криогенных физико-геологических процессов возникает необходимость в информации о явлениях, развивающихся в зоне приповерхностного охлаждения дисперсных пород при наличии градиента температуры, связанных с начальным переохлаждением грунта. Ранее авторами были получены экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги в безградиентном поле температур при объемном замерзании дисперсных грунтов [Гречищев и др., 2004, 2005]. Теоретические основы кристаллизации в больших объемах с учетом переохлаждения на внешней поверхности содержатся в работе [Любов, 1975].

Цель настоящих экспериментальных лабораторных исследований – изучить закономерности формирования предкристаллизационного переохлаждения поровой влаги дисперсных грунтов в градиентном поле температур и получить зависимости статистик температур и продолжительности переохлаждения до начала спонтанной кристаллизации поровой влаги от градиента температуры вблизи внешней поверхности переохлажденного грунта.

Результаты исследований будут способствовать более глубокому пониманию фундаментальной проблемы геокриологии – кинетики кристаллизации поровой влаги в грунтах.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Лабораторные исследования состояли в замораживании поровой влаги в образцах дисперсных грунтов за счет одностороннего охлаждения при изменении температуры среды и продолжительности переохлаждения. Начало кристаллизации было спонтанным. Промораживание образцов осуществлялось в специальном приборе, описанном ранее [Гречищев и др., 2002, 2003], в основу работы которого положена открытая схема промерзания. Нижняя часть образца находилась в контакте с водой в подпиточной ванночке. Температура воды в ней в течение опыта была положительной (несколько выше 0 °С), термостатирование воды осуществлялось электронным устройством с погрешностью поддержания температуры не более ±0,2 °С. Измерение температуры в образце выполнялось при использовании предварительно оттарированной миниатюрной лабораторной термоко-

**Гранулометрический состав уренгойской пылевой супеси**

Содержание частиц (%) диаметром (мм)								
>1	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
0,1	2,4	4,1	11,7	56,3			25,4	

сы компьютеризированным измерительным комплексом LPC (логгером) с погрешностью измерения не более  $\pm 0,01$  °C. Для получения значений температуры и ее градиента в верхней части образца датчики температуры устанавливались в середину образца непосредственно под металлическим штампом и на глубину 1 см по вертикали от штампа. Датчики были жестко закреплены относительно друг друга.

В опытах непрерывно измерялась температура в двух точках, а затем фиксировалась температура переохлаждения и градиент температуры в верхней части образца грунта на момент, предшествующий началу процесса замораживания. Одновременно регистрировалась продолжительность переохлажденного состояния (от момента с нулевой температурой до момента начала замерзания). При исследовании зависимости температуры начала замерзания дисперсного грунта ( $T_{нз}$ ) от температуры его предкристаллизационного переохлаждения ( $T_{п}$ ) [Гречищев и др., 2004, 2005] последняя замерялась относительно нулевого значения, а не от значения температуры начала замерзания ( $T_{нз}$ ). Замеры выполнялись дискретно в автоматическом режиме с интервалом во времени от 2 до 5 мин, дискретность измерений с понижением температуры среды увеличивали, т. е. уменьшали интервал времени между замерахми. О факте произошедшего замерзания верхней части образца судили по показаниям индикатора часового типа, т. е. по наличию пучения. Дальнейшая конкретизация момента начала спонтанной кристаллизации поровой влаги в образце выполнялась по анализу информации об изменениях температуры и продолжительности переохлаждения, накопленной логгером.

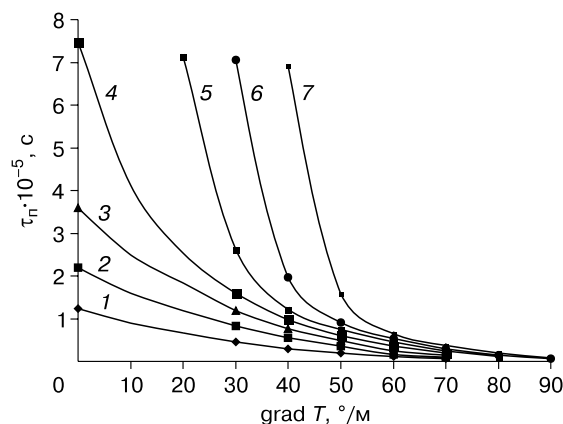
Опыты были выполнены для одного типа грунта – супеси. Место отбора грунта – Ямало-Ненецкий АО, Заполярное ГНКМ. Гранулометрический состав исследованного грунта представлен в таблице. Характеристика физических свойств уренгойской пылевой супеси приведена ниже.

Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,91–1,95
Плотность скелета, т/м <sup>3</sup>	1,60–1,65
Весовая влажность, %	18–20
Удельный вес частиц, т/м <sup>3</sup>	2,66
Гигроскопическая влажность, %	1,8
Влажность на границах (%):	
текучести	34
раскатывания	29
Число пластичности, %	5
Засоленность, %	0,24

Полная высота образца составляла 10 см, диаметр 7 см. Образцы были влагоненасыщенными. Температура верхнего конца образца устанавливалась до  $-3$  °C, температура нижнего конца образца (температура воды в ванночке) задавалась дискретно и составляла (°C):  $0-0,2$ ,  $(0,5 \pm 0,2)$ ,  $(1,0 \pm 0,2)$ ,  $(1,5 \pm 0,2)$ ,  $(2,0 \pm 0,2)$ . Температура воздуха в холодильной камере поддерживалась автоматически и задавалась от  $-0,5$  до  $-6,0$  °C.

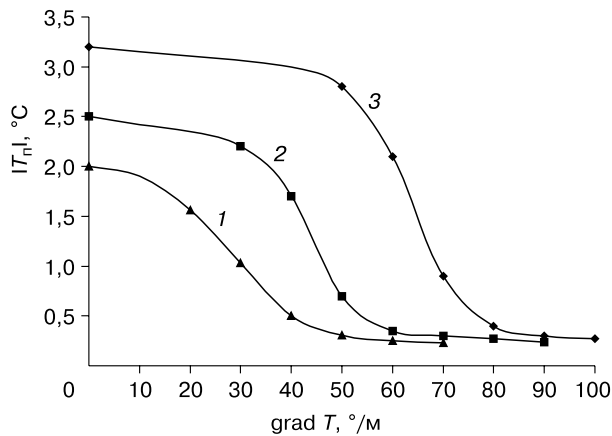
**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Выполненные опыты позволили получить серию зависимостей (каждая из которых соответствовала условию постоянной температуры нижней части образца) продолжительности переохлаждения верхней части образца влагоненасыщенной супеси до момента спонтанной кристаллизации поровой влаги от температуры переохлаждения и ее градиента в приповерхностной зоне образца. Ранее в работах [Гречищев и др., 2004, 2005] была получена зависимость продолжительности предкристаллизационного переохлаждения влагоненасыщенной супеси от температуры переохлаждения для случая объемного замораживания, т. е. когда градиент температуры равен нулю. Совместное использование этих данных обеспечи-



**Рис. 1. Семейство зависимостей продолжительности предкристаллизационного переохлаждения влагоненасыщенной супеси  $\tau_n$  от градиента температуры  $\text{grad } T$  в приповерхностной зоне охлаждения и температуры переохлаждения  $T_n$  на внешней поверхности образца:**

1 –  $T_n = -2,5$  °C; 2 –  $T_n = -2,2$  °C; 3 –  $T_n = -2,1$  °C; 4 –  $T_n = -2,0$  °C; 5 –  $T_n = -1,5$  °C; 6 –  $T_n = -1,0$  °C; 7 –  $T_n = -0,5$  °C.



**Рис. 2.** Семейство зависимостей модуля температуры предкристаллизационного переохлаждения  $|T_{п}|$  влагоненасыщенной супеси от градиента температуры  $\text{grad } T$  в приповерхностной зоне охлаждения и продолжительности переохлаждения  $\tau_{п}$ : 1 –  $\tau_{п} = 0,2 \cdot 10^5$  с; 2 –  $\tau_{п} = 10^5$  с; 3 –  $\tau_{п} = 7 \cdot 10^5$  с.

ло получение семейства зависимостей продолжительности предкристаллизационного переохлаждения супеси от градиента температуры в приповерхностной зоне охлаждения и температуры переохлаждения верхней поверхности образца (рис. 1). На рис. 2 приведено семейство зависимостей модуля температуры переохлаждения влагоненасыщенной супеси от градиента температуры в приповерхностной зоне охлаждения и от продолжительности переохлаждения.

### ВЫВОДЫ

1. Длительность предкристаллизационного переохлаждения дисперсного грунта обратно пропорциональна модулю температуры переохлаждения и ее градиенту в приповерхностной зоне охлаждения.

2. Наличие градиента температуры вблизи внешней поверхности переохлажденного грунта снижает продолжительность его предкристаллизационного переохлаждения и повышает температуру максимального переохлаждения. С ростом градиента температуры возможное предкристаллизационное переохлаждение грунта стремится к значению температуры начала замерзания. Установлено, что минимальное приповерхностное переохлаждение дисперсного грунта, превышающее по модулю температуру начала замерзания, при градиенте температуры более  $50\text{--}60$  °/м и длительности переохлаждения более суток вызывает спонтанную кристаллизацию поровой влаги.

Экспериментальные исследования выполнены в рамках проекта, поддерживаемого РФФИ (грант № 03-05-64825).

### Литература

- Гречищев С.Е., Павлов Арк.В., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В. Лабораторные исследования физических свойств сегрегационного внутригрунтового льда // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 77–81.
- Гречищев С.Е., Павлов Арк.В., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В. Зависимость физических свойств сегрегационного внутригрунтового льда от условий промораживания грунтов // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 49–54.
- Гречищев С.Е., Павлов Арк.В., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В. Экспериментальные закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 4, с. 41–44.
- Гречищев С.Е., Павлов Арк.В., Гречищева О.В. Закономерности формирования переохлаждения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов // Материалы Третьей конф. геокриологов России. Т. 1. М., Изд-во МГУ, 2005, с. 38–45.
- Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объемах. М., Наука, 1975, 256 с.

Поступила в редакцию  
10 ноября 2005 г.