КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 1, с. 14–19 **http://www.izdatgeo.ru**

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 624.139:624.131 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(14-19)

О ПРИРОДЕ МЕХАНОКАЛОРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

С.С. Волохов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; volokhov@geol.msu.ru

Изложены результаты экспериментальной проверки гипотезы, выдвинутой ранее автором, о ведущей роли трещинообразования в возникновении механокалорического эффекта в мерзлых грунтах. Приведены данные, подтверждающие эту гипотезу.

Мерзлый грунт, лед, одноосное сжатие, механокалорический эффект, трещинообразование

ON THE NATURE OF MECHANOCALORICAL EFFECT IN FROZEN SOILS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

S.S. Volokhov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; volokhov@geol.msu.ru

The paper provides the results of experimental verification of the author's earlier hypothesis about the crack formation playing a major role in the appearance of mechanocalorical effect in the frozen soils, which is underpinned by the data obtained.

Frozen soil, ice, uniaxial compression, mechanocalorical effect, crack formation

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением исследований механокалорического эффекта в мерзлых грунтах, результаты которых изложены в статье [*Волохов, 2016*]. Изучению температурно-механических эффектов в мерзлых грунтах, в том числе механокалорическому эффекту, посвящены работы С.Е. Гречищева [*1976*], О.В. Казаковой [*Гречищев и др., 1984; Казакова, 1984*], Р.В. Максимяк [*1988*], А.А. Коновалова [*1999*], Я.Б. Горелика и В.С. Колунина [*2002*]. Подробный обзор этих работ приводится в статье [*Волохов, 2016*].

Ранее автором [*Волохов, 2016*] было установлено, что механокалорический эффект в мерзлых грунтах при одноосном сжатии, выражающийся в повышении температуры грунтов при воздействии на них механических нагрузок, возникает только в условиях быстрого нагружения или прогрессирующей ползучести при хрупком и вязкохрупком разрушении и отсутствует на стадии затухающей ползучести и при вязком разрушении образцов мерзлых грунтов. Сделано предположение о связи повышения температуры в мерзлых грунтах с процессом трещинообразования, происходящего при их разрушении, и получены первые результаты, экспериментально подтверждающие это предположение.

Данная работа посвящена проверке гипотезы о ведущей роли трещинообразования при разрушении мерзлых грунтов в возникновении механокалорического эффекта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исследуемого грунта использовалась каолинитовая глина (г. Челябинск). Испытания проводились на образцах нарушенного сложения. Величины суммарной влажности и плотности мерзлого грунта составляли 50 % и 1.55–1.56 г/см^3 соответственно. Было также проведено испытание образцов льда, приготовленных из дегазированной дистиллированной воды путем послойного намораживания в стальных цилиндрах.

Испытания на одноосное сжатие проводили на модернизированных приборах КПр-1, оборудованных холодильными камерами и снабженных специальными центрирующими устройствами (рис. 1). Последние обеспечивали вертикальное центрирование испытываемых образцов и строгую осевую направленность приложения на них внешней нагрузки. Каждый прибор был снабжен индикаторами часового типа, измеряющими деформацию с точностью до 0.01 мм.

Экспериментальная установка позволяла задавать температуру в диапазоне от +20 до –20 °С и

© С.С. Волохов, 2018

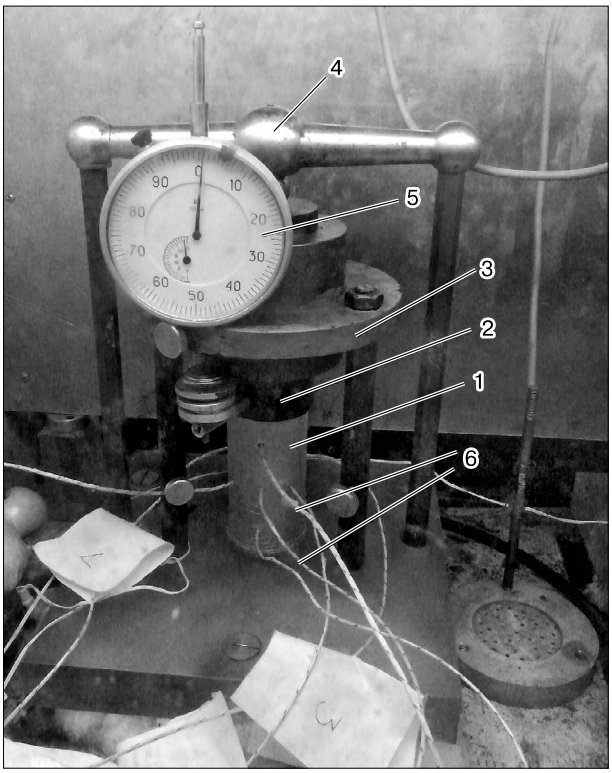

Рис. 1. Установка для испытания на одноосное сжатие.

1 – образец; 2 – штамп; 3 – центрирующее устройство; 4 – нагрузочная рама; 5 – индикатор; 6 – термопары.

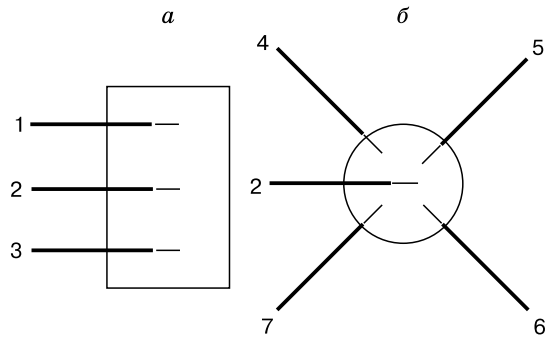

Рис. 2. Схема расположения термопар в образце:

а – по высоте образца; *б* – в центральной части образца; 1–7 – номера термопар.

поддерживать ее с точностью ±0.1 °С. Измерение температуры в образцах осуществлялось с помощью логгеров температуры Testo-176-T4 и семи термопар, обеспечивающих точность измерения до 0.1 °С.

Образцы мерзлого грунта и льда имели цилиндрическую форму, их высота составляла 90 мм, диаметр 45.15 мм. Образцы помещали в резиновые оболочки для предотвращения их сублимации. В подготовленных образцах просверлили семь отверстий диаметром 1 мм для термопар (рис. 2). Три отверстия глубиной 26 мм сверлили вдоль вертикальной образующей в точках, расположенных в середине каждой трети высоты образца (см. рис. 2, *а*). Таким образом, средняя термопара располагалась в центре образца. Четыре других отверстия глубиной 10 мм просверлили вдоль окружности в середине образца радиально под углом 90° друг к другу (см. рис. 2, *б*).

Перед испытанием образец устанавливали в нагрузочный прибор, в отверстия в образце помещали термопары и к ним подключали логгеры измерения температуры. Образцы не теплоизолировались. Каждый образец выдерживался при температуре опыта не менее 24 ч.

Нагружение образцов-близнецов мерзлой глины осуществляли постоянными для каждого образца нагрузками при температуре –7 °С. Величины нагрузок составляли 4.25, 4.00, 3.75, 3.50, 3.25 и 3.00 МПа. Деформации измеряли каждую минуту после приложения нагрузки. Испытания проводили в условиях ползучести до разрушения образцов.

Кроме того, испытывали образцы льда при температурах –7 и –1 °С в условиях быстрого и ступенчатого нагружения. Быстрое нагружение образцов льда осуществляли со скоростью возрастания нагрузки 0.125 МПа/с при обеих температурах с доведением образцов до разрушения. При ступенчатом нагружении ступени нагрузки на образцы составляли 0.25 МПа при указанных температурах. Каждая ступень нагрузки выдерживалась 10 мин. Испытания проводили до разрушения образцов.

Измерение температуры в образцах производили семью термопарами, расположенными в разных частях образцов (см. рис. 2), с интервалом 1 с. Для установления исходной температуры, ошибки ее измерения и величин ее разброса по объему образцов измерение температуры начиналось за 10 мин до начала нагружения. Установленная погрешность измерения не превышала 0.1 °С. Исходная температура различалась по высоте и объему образцов на 0.2 °С. В большинстве экспериментов измерение температуры продолжалось после разрушения и разгрузки образцов.

По результатам проведенных экспериментов были построены кривые ползучести для испытаний постоянными и ступенчато возрастающими нагрузками и графики изменения температуры во времени в образцах для всех термопар. На приводимых в работе графиках изменения температуры время начала нагружения соответствует 10 мин. При этом колебания температуры в пределах 0.1 °С (до и в процессе нагружения, а также в тече-

ние разгрузки образцов) соответствуют установленной погрешности измерения, т. е. являются “шумом”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки предложенной гипотезы о ведущей роли микротрещинообразования в возникновении механокалорического эффекта в мерзлых грунтах при одноосном сжатии были проведены эксперименты с образцами мерзлой каолинитовой глины при постоянных разрушающих нагрузках в условиях незатухающей ползучести и температуре –7 °С. Если эта гипотеза верна, то механокалорический эффект должен отсутствовать на стадии неустановившейся ползучести и возникать только на стадии прогрессирующего течения, т. е. на стадии разрушения образцов. Величины постоянных нагрузок на образцы составляли от 4.25 до 3.00 МПа. Результаты испытания на ползучесть образцов мерзлой каолинитовой глины приведены на рис. 3. На рис. 4 представлены кривые изменения скорости ползучести образцов во времени. Соответствующие этим испытаниям кривые изменения температуры в образцах приведены на рис. 5.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что при всех выбранных нагрузках наблюдались три стадии ползучести, после достижения минимальной скорости ползучести происходило ее увеличение и разрушение образцов. С уменьшением нагрузки скорость ползучести также снижалась. При этом при уменьшении нагрузки наблюдалось изменение характера вязкохрупкого разрушения образцов: уменьшалась доля хрупкого разрушения (образование трещин в образце) и увеличивалась доля вязкого разрушения (изменение формы образца).

Из анализа рис. 5 следует, что при всех нагрузках температура в образцах повышалась. Однако при уменьшении разрушающей нагрузки величина повышения температуры уменьшалась от 0.4 °С при нагрузке 4.25 МПа до 0.1 °С при нагрузке 3.00 МПа.

В таблице приведены моменты времени наступления минимальной скорости ползучести (начала разрушения образцов), начала повышения температуры в образцах, достижения максимальной температуры в образцах, разрушения и разгрузки образцов, отсчитанные от начала нагружения образцов. Из таблицы следует, что повышение температуры во всех образцах начиналось на стадии их разрушения – после превышения скоростью ползучести минимальной величины и начала стадии прогрессирующего течения. При этом, чем меньше величина разрушающей нагрузки, тем дальше отстоит момент начала повышения температуры в образцах от момента достижения минимальной скорости ползучести. Этот факт можно связать с тем, что при снижении нагрузки и, соответственно, уменьшении скорости ползучести время до начала трещинообразования при вязкохрупком разрушении образцов увеличивается. Максимум повышения температуры в образцах достигается в момент разрушения образцов (см. таблицу).

При хрупком и вязкохрупком разрушении мерзлых грунтов под действием механических нагрузок трещины проходят через шлиры, зерна и другие включения льда. В связи с этим были проведены испытания на одноосное сжатие образцов льда при быстром и ступенчатом нагружении и температурах –7 и –1 °С, сопровождавшиеся измерением температуры в образцах.

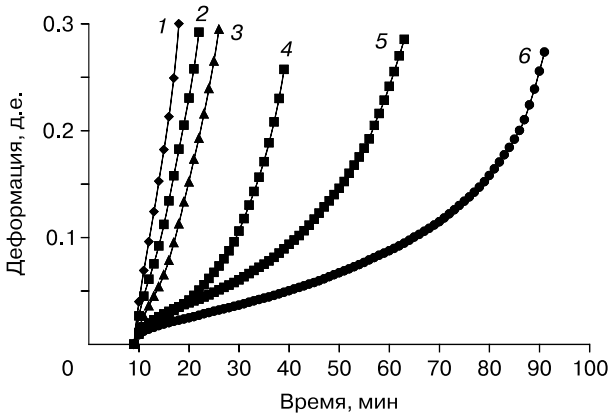

Рис. 3. Кривые ползучести при испытании мерзлой каолинитовой глины постоянными нагрузками:

1 – 4.25 МПа; *2* – 4.00 МПа; *3* – 3.75 МПа; *4* – 3.50 МПа; *5* – 3.25 МПа; *6* – 3.00 МПа.

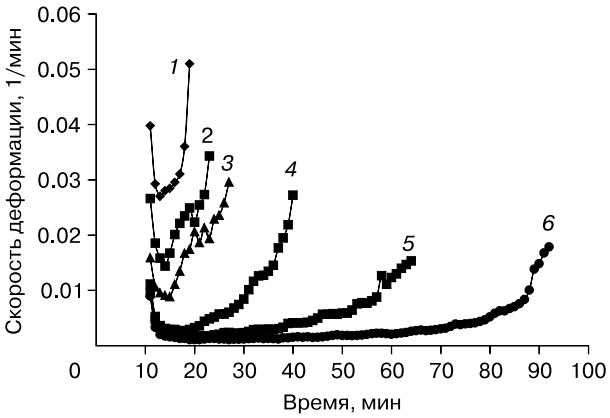

Рис. 4. Изменение скорости ползучести мерзлой каолинитовой глины во времени при испытании постоянными нагрузками:

1 – 4.25 МПа; *2* – 4.00 МПа; *3* – 3.75 МПа; *4* – 3.50 МПа; *5* – 3.25 МПа; *6* – 3.00 МПа.

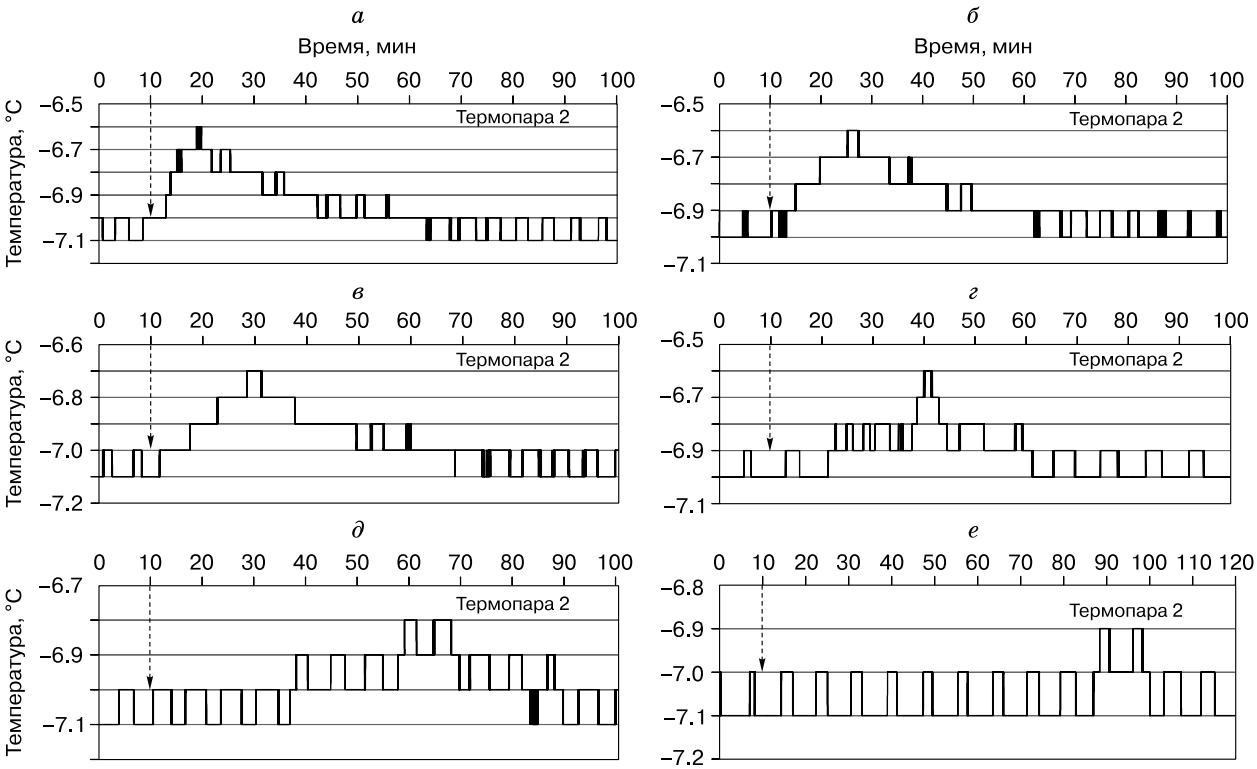

Рис. 5. Изменение температуры в центре образцов мерзлой каолинитовой глины при нагружении постоянными нагрузками:

а – 4.25 МПа; *б* – 4.00 МПа; *в* – 3.75 МПа; *г* – 3.50 МПа; *д* – 3.25 МПа; *е* – 3.00 МПа. Начальная температура –7 °С. Стрелкой показано начало нагружения.

При быстром нагружении образцов льда величины разрушающих нагрузок при температурах –7 и –1 °С составили 3.38 и 2.75 МПа соответственно. При достижении этих значений наблюдалось хрупкое разрушение образцов. При обеих температурах произошло полное разрушение (распад на осколки по многим трещинам) верхних двух третей образцов, а нижние трети образцов остались неразрушенными.

Изменение температуры в образцах льда при быстром нагружении и исходных температурах –7 и –1 °С показано на рис. 6. При температуре –7 °С в момент разрушения в центре верхней трети образца (термопара 1, см. рис. 2) произошло увеличение температуры на 1.7 °С. В центре образца (термопара 2, см. рис. 2) повышение температуры составило 0.5 °С. При этом в обоих случаях рост температуры был скачкообразным с последующим резким ее понижением, что связано с попаданием термопар сразу после разрушения образца в воздушную среду холодильной камеры. В нижней трети образца, оставшейся неразрушенной (термопара 3, см. рис. 2), изменения температуры в образце не произошло. Резкое повышение температуры на 0.5 °С зафиксировано также термопарами 5 и 7 (см. рис. 2). В других точках расположения термопар температура не изменилась.

При температуре –1 °С (рис. 6, *Б*) в момент разрушения образца льда отмечено скачкообразное повышение температуры только в верхней трети образца. Величина повышения температуры составила 0.6 °С. В центре, нижней трети, а также в других точках образца изменений температуры не зафиксировано.

Характерные моменты времени (мин) при испытании образцов каолинитовой глины на одноосное сжатие постоянными нагрузками при температуре –7 °С

Нагрузка на образец, МПа	Время начала разрушения образца	Время начала повышения температуры в образце	Время достижения максимальной температуры образца	Время разрушения и разгрузки образца
4.25	3	3.0	8.9	9
4.00	4	5.0	15.2	16
3.75	5	7.6	18.5	19
3.50	8	14.8	29.9	31
3.25	13	28.2	49.2	55
3.00	17	78.4	78.4	82

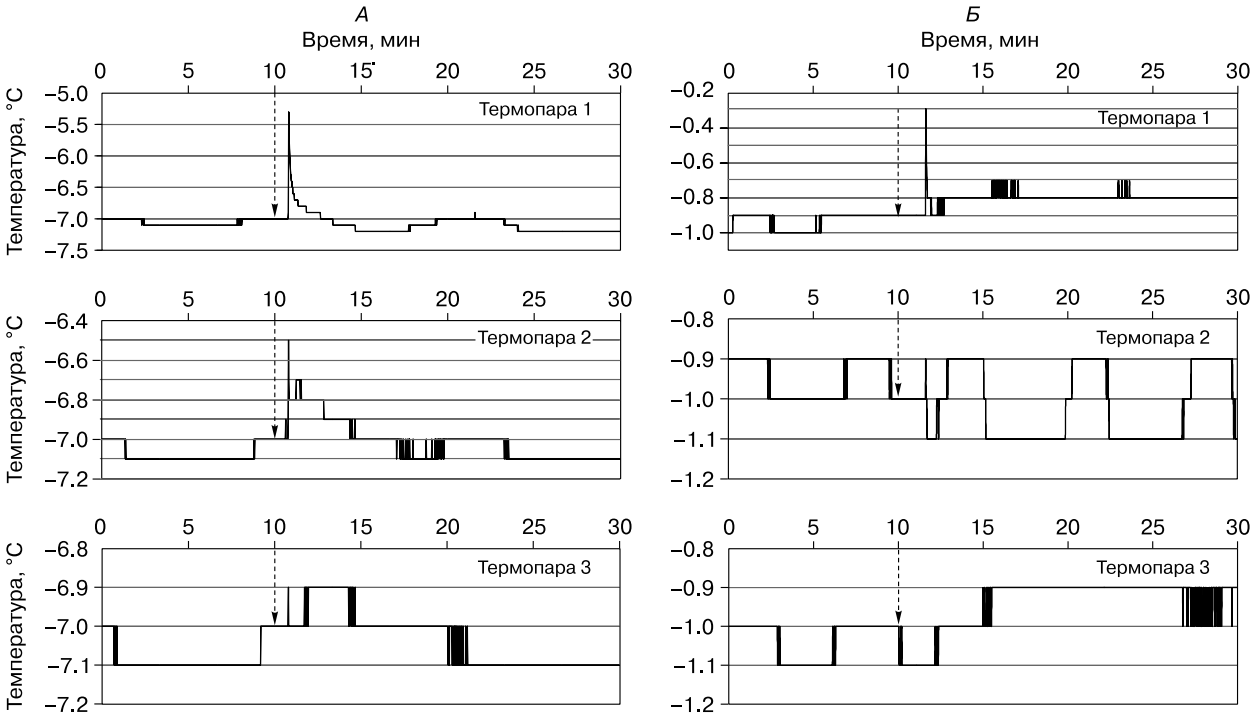

Рис. 6. Изменение температуры в образце льда при быстром нагружении и начальной температуре –7 °С (*А*) и –1 °С (*Б*).

Стрелкой показано начало нагружения.

Кривые ползучести образцов льда при ступенчатом нагружении и температурах –7 и –1 °С представлены на рис. 7. Соответствующие графики изменения температуры в образцах приведены на рис. 8.

Из представленных графиков видно, что при температуре –7 °С (см. рис. 8, *А*) на ступенях нагрузки, соответствующих затухающей ползучести, изменений температуры в образце льда не происходило. На стадии разрушения образца (при нагрузке более 2.75 МПа) наблюдалось постепенное повышение температуры в разных точках образца на 0.2–0.5 °С. При температуре –1 °С (см. рис. 8, *Б*) начало повышения температуры в образце льда зафиксировано после достижения нагрузкой величины 1.75 МПа. Последующий рост температуры в разных точках образца составил 0.1–0.3 °С. Следует отметить, что при обеих температурах разрушение образцов льда носило вязкохрупкий характер: более хрупкий при –7 °С и более вязкий при –1 °С.

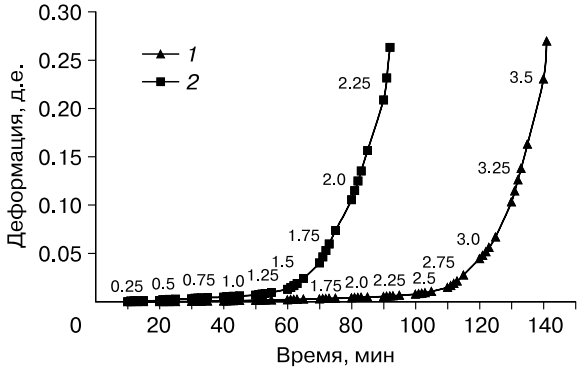

Рис. 7. Кривые ползучести льда при ступенчато возрастающих нагрузках и температурах –7 °С (*1*) и –1 °С (*2*).

Числа на кривых – величины ступеней нагрузки, МПа.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные при испытании образцов мерзлой каолинитовой глины на одноосное сжатие постоянными разрушающими нагрузками при температуре –7 °С, показывают, что повышение температуры в образцах мерзлого грунта наблюдается на стадии их разрушения. При этом чем больше разрушающая нагрузка и сильнее проявляется хрупкое разрушение образцов, тем больше величина повышения температуры в образцах. Это подтверждает предложенную гипотезу о ведущей роли трещинообразования в проявлении механокалорического эффекта в мерзлых грунтах при одноосном сжатии.

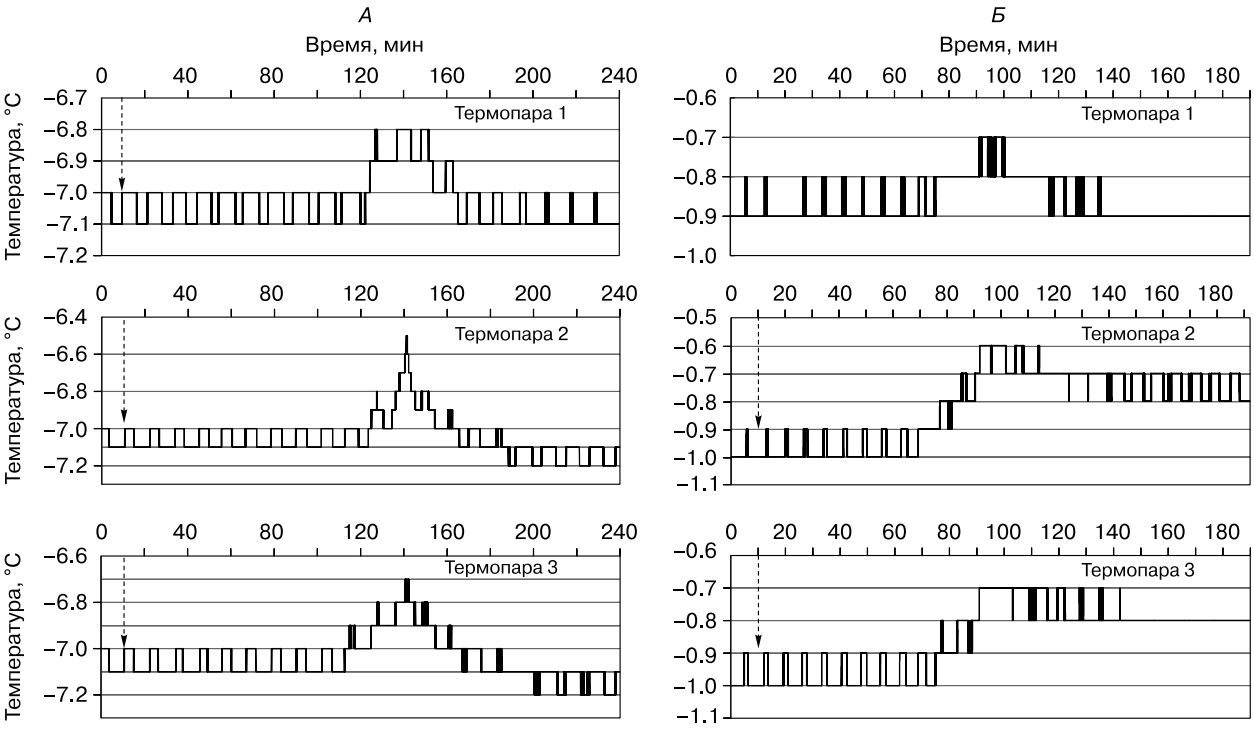

Рис. 8. Изменение температуры в образце льда при ступенчатом нагружении и начальной температуре –7 °С (*А*) и –1 °С (*Б*).

Стрелкой показано начало нагружения.

Литература

Волохов С.С. Механокалорический эффект в мерзлых грунтах при одноосном сжатии // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 1, с. 30–35.

Volokhov, S.S., 2016. Mechanocalorical effect in frozen soils under uniaxial compression. Earth's Cryosphere XX (1), 29–33.

Горелик Я.Б. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере / Я.Б. Горелик, В.С. Колунин. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2002, 317 с.

Gorelik, J.B., Kolunin, V.S., 2002. Periglacial Processes in the Lithosphere: Physics and Modeling. Izd. SO RAN, Fil. "Geo", Novosibirsk, 317 pp. (in Russian)

Гречищев С.Е. Некоторые проблемы термореологии мерзлых грунтов // Вопросы криологии Земли. М., Наука, 1976, с. 122–142.

Grechishchev, S.E., 1976. Some problems of thermorheology of frozen soils, in: Problems of Geocryology, Nauka, Moscow, pp. 122–142. (in Russian)

Гречищев С.Е. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов / С.Е. Гречищев, Л.В. Чистотинов, Ю.Л. Шур. М., Наука, 1984, 231 с.

Grechishchev, S.E., Chistotinov, L.V., Shur, Yu.L., 1984. Cryogenic Physical-Geological Processes: Fundamentals of Modeling. Nauka, Moscow, 231 pp. (in Russian)

Казакова О.В. Изучение механокалорического эффекта в деформируемых глинистых грунтах // Изучение и прогноз криогенных физико-геологических процессов. М., ВСЕГИНГЕО, 1984, с. 86–91.

Kazakova, O.V., 1984. Mechanocalorical effect in clayey soils exposed to deformation, in: Cryogenic Physical-Geological Processes: Investigation and Prediction, VSEGINGEO, Moscow, pp. 86–91. (in Russian)

Коновалов А.А. Газогидраты и динамика криолитосферы при изменениях давления // Геоэкология, 1999, № 3, с. 252–259.

Konovalov, A.A., 1999. Gas hydrates and dynamics of permafrost at pressure changes. Geoekologiya, No. 3, 252–259.

Максимяк Р.В. Исследование структурных процессов и влагопереноса при работе мерзлого грунта под нагруженным штампом // Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов. М., Наука, 1988, с. 63–70.

Maksimyak, R.V., 1988. Structural processes and moisture transport in frozen soil under uniaxial compression, in: Mechanics of Frozen Soils: Thermodynamic Aspects, Nauka, Moscow, pp. 63–70. (in Russian)

Поступила в редакцию
10 января 2017 г.