

ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИОГЕННОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ ИЗВЕСТНЯКА В ПРИМЕНЕНИИ К ГОРНОЙ МЕРЗЛОТЕ

(Плато Маунтин, Альберта, Канада)

А. Прик

Географический ф-т, университет Калгари, T2N 1N4, Альберта, Калгари, Канада

Критическая степень водонасыщения пористого известняка в сочетании с его распучиванием и сжатием в процессе промерзания-оттаивания дает представление о процессах, происходящих при морозном выветривании. Расширение образца влажной породы происходит только в условиях его высокого водонасыщения и быстрого охлаждения, при которых усиливается эффект набухания за счет расширения воды при ее замерзании. При низкой степени водонасыщения (что типично для естественных условий) наблюдается сжатие образца, объясняющееся миграцией незамерзшей воды в пористой среде, ведущее к осушению отдельных мелких пор. Осыпные склоны Плато Маунтин позволяют сопоставить результаты таких экспериментов с полевыми исследованиями.

Морозное выветривание, набухание, распучивание, циклы увлажнения/высыхания и замораживания/оттаивания, степень насыщения пор водой, dilatometрия

CRYOGENIC WEATHERING OF LIMESTONES EVALUATED BY LABORATORY TECHNIQUES AND APPLIED TO A MOUNTAIN PERMAFROST AREA

(Plateau Mountain, Alberta, Canada)

A. Prick

Department of Geography, University of Calgary, T2N 1N4, Alberta, Calgary, Canada

The critical degree of saturation of a porous limestone combined with its dilatometrical behavior during a freeze / thaw cycle gives a good idea about the processes involved in frost weathering. Dilation of a humid rock sample only occurs under conditions of high saturation and rapid cooling, which emphasizes the influence of the swelling due to transformation of water into ice. With low saturation levels (the most common case in nature), the contraction of a sample can be observed and explained by migrations of unfrozen water within the porous media, leading to the drying of some small pores. The debris slopes of Plateau Mountain provide a good example of the application of such experiments to a field study.

Frost weathering, wetting/drying and freezing/thawing cycles, degree of saturation of a porous, medium with water, dilation, dilatometry

ВВЕДЕНИЕ

Морозное выветривание является одним из важнейших процессов в перегляциальных условиях [Mugridge, Young, 1983; Fahey, Lefebure, 1988], но некоторые геоморфологи [White, 1976; Mc Greevy, 1981; Hall, 1995] отмечали, что нет достаточных полевых и лабораторных исследований, доказывающих, что превращение воды в лед на самом деле является причиной образования скоплений обломочного материала, типичных для высокогорных и арктических ландшафтов. Помимо промерзания, к расширению могут также приводить и другие процессы, например, набухание при гидратации [White, 1976]. Таким образом, в наиболее общем случае это совокупность различных физических,

химических и биологических факторов [Hall, 1995].

Кроме того, если рассматривать промерзание отдельно, видно, как мало известно о процессах, которые при этом происходят. Новые лабораторные методики, разработанные в геоморфологии в последние годы, позволяют лучше понять относительное влияние отдельных физических процессов, например использование акустической эмиссии [Hallet et al., 1991], импульсного ядерно-магнитного резонанса [Akagawa, Fukuda, 1991] и dilatometрии [Matsuoka, 1990; Prick et al., 1993; Pissart et al., 1993; Prick, 1995]. Эти новые методы не разрушают образец. В первой части статьи представлены результаты

нескольких экспериментов по набуханию влажных образцов мягких и пористых французских известняков, подвергшихся промерзанию и оттаиванию.

Другая проблема заключается в том, что основная часть ранних экспериментальных работ проводилась без соблюдения термических и влажностных условий, соответствующих натурным [Hall, 1986]. Это важный момент, который не был достаточно тщательно учтен раньше. Так, в некоторых работах к образцу прикладывалось разрушающее давление, которого нет при промерзании в естественных условиях. В настоящее время становятся нормой взаимодополняющие наблюдения в поле и лаборатории [Douglas et al., 1983; Hallet et al., 1991] и это способствует моделированию естественных изменений температуры и влажности. Во второй части статьи будет представлен порядок проведения полевых работ совместно с лабораторными экспериментами для оценки воздействия промерзания на некоторые известняки Скалистых гор Канады.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Описание изучаемой породы

Дилатометрические измерения были проведены на 10 образцах французского известняка юрского и мелового возраста, которые используются во Франции в качестве строительного материала. Эти породы были выбраны из-за разнообразия своих физических характеристик и особенно из-за наличия данных по пористости и доступности результатов других исследований по выветриванию. Здесь представлены несколько результатов, полученных при работе с одной из таких пород, Туронским известковым туфом, так называемым Breze. Его общая пористость (измеренная в вакууме) — 47%. Средний диаметр пор, измеренный ртутным порометром через объем пор, составляет 2,58 мк, а пористость бивалентная, то есть Breze, имеет два основных класса пор. Из-за таких порометрических характеристик их коэффициент Хиршвальда составляет только 84,34% (коэффициент Хиршвальда — это часть от общего объема пор, в которые вода может проникнуть за 48 ч), таким образом, при насыщении этих пород при нормальном атмосферном давлении в пористой среде сохраняется множество пор с пузырьками воздуха.

Цилиндрические образцы (11 см длиной, 4 см в диаметре) были вырезаны перпендикулярно наслоению. Приготовленные образцы были вымыты и высушены при 50 °С при постоянном весе и перед измерениями ультразвуковым деинтегратором (Grindosonic) оставлены охлаждаться на открытом воздухе (см. ниже критическую степень насыщения). Для измерения набухания образцы были погружены в дис-

тиллированную воду, по крайней мере, за 3 недели до эксперимента, а затем высушивались на воздухе до достижения ими влажности, требуемой для эксперимента.

Критическая степень насыщения

Влажность оказывает сильное влияние на поведение породы, подвергающейся промораживанию. Степень насыщения зависит не только от способа гидратации образца и продолжительности намокания, но также от размера пор в породе. В этой связи, учитывая зависимость между степенью насыщения образца и его литологией, можно для каждого типа пород определить критическую степень насыщения S_{cr} . При степени насыщения больше и равной S_{cr} порода будет разрушаться при промерзании [Fagerlund, 1971; Weiss, 1992; Prick, 1997]. Значение S_{cr} для каждого материала разное.

Прибор Grindosonic позволяет производить измерения основной частоты вибрации образца соответствующей формы и, таким образом, определять динамический модуль Юнга. Мы использовали его для определения этого модуля в свежих образцах и после того, как эти образцы подвергались 8-кратному циклу промерзания и оттаивания с различной влажностью. Точка перегиба на графике динамического модуля Юнга четко видна на рис. 1. Точка перегиба определяет величину S_{cr} : по мере уменьшения модуля Юнга выветривание происходит при более высоком насыщении пород. Для значений насыщения больше, чем S_{cr} , существует линейная зависимость между скоростью выветривания и уровнем насыщения.

Степень критического насыщения определяет дилатометрические свойства пород, которые

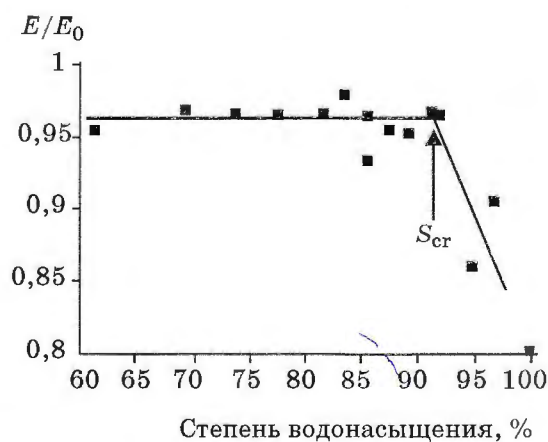


Рис. 1. Определение степени критического насыщения S_{cr} в известняке Breze.

Точка перегиба кривой определяет значение S_{cr} : по промерзанию с высокой степенью водонасыщения, модуль Юнга значительно снижается по сравнению с исходным значением E_0 .

наблюдаются в цикле промерзания/оттаивания, что и будет проиллюстрировано ниже.

Дилатометрический метод

Измерения набухания пород в результате их промерзания и оттаивания проводились редко [Matsuoka, 1990; Weiss, 1992]. На рис. 2 показано экспериментальное устройство, с помощью которого проведены данные измерения. Дилатометрические показатели измерялись в нескольких местах: в центре круглого основания, у границы этого основания, а также в двух точках друг против друга на поверхности цилиндра. Этими четырьмя измерениями мы регистрировали изменения не только по длине цилиндра, но также по диаметру.

Измерения были проведены линейным электронным преобразователем смещения, дающим колебания размеров с точностью около 5 мк. Основание образца ввинчивалось в стальное основание, на котором были установлены датчики смещения. Эти измерения, а также измерения температуры пород автоматически выполнялись в одном цикле заморозки/оттаивания в климатической камере. Для целей описываемого эксперимента температура задавалась в диапазоне от +20 °С до -20 °С и менялась на 2 °С в час.

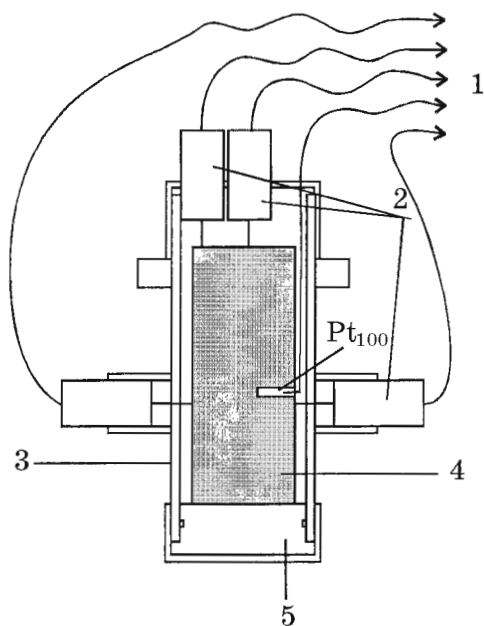


Рис. 2. Экспериментальная установка, использованная для измерения набухания при промерзании/оттаивании образца [Pissart et al., 1993].

1 — к электронному записывающему устройству; 2 — датчики смещения; 3 — металлический цилиндр; 4 — образец; 5 — металлическое основание.

Результаты дилатометрии

На рис. 3 показано дилатометрическое поведение промораживаемого образца (Breze) со степенью водонасыщения 98%, то есть выше степени критического насыщения. В процессе охлаждения наблюдалось сначала термическое сжатие. После короткого периода сжатия начался процесс промерзания и произошло резкое распухание при постоянной температуре 0 °С (нулевая завеса) за счет изменения объема на 9% при трансформации воды в лед. При понижении температуры в диапазоне отрицательных значений наблюдается небольшое увеличение длины за счет того, что часть связанной воды замерзает при температуре ниже 0 °С.

Когда образец выдерживался при температуре около -18 °С в течение 27 ч, наблюдалось небольшое сокращение по длине, что может быть связано с иссушением мелких пор, из которых незамерзшая вода мигрирует к кристаллам льда, формирующимся в более крупных порах. При нагревании изменения происходят с обратным знаком.

На рис. 4 показано поведение при промерзании такого же образца, но со степенью водонасыщения только 86%, то есть ниже, чем степень критического насыщения. Кривые набухания отличаются от таких же кривых на рис. 3: наблюдается ограниченное набухание и только в период существования нулевой завесы. После этого образец сокращается по длине в результате термического сжатия, а также миграции незамерзшей воды от маленьких пор к большим, к этому моменту уже промерзшим, и к боковой поверхности цилиндра, которая первой встречает фронт промерзания образца и поэтому является более холодной [Prick et al., 1993; Pissart et al., 1993; Prick, 1995]. Этот процесс аналогичен формированию сегрегационного льда в почве, он наблюдался и в других лабораторных опытах [Hallet et al., 1991]. Это особенно четко проявляется в образцах Breze, для которых характерно закупоривание пор, как уже было описано выше.

Сокращение образца известняка под действием высушивания при постоянной положительной температуре уже исследовалось с помощью дилатометра Хэймсом и др. [Hames et al., 1987], которые показали, что максимальное изменение длины происходит, когда вода оставляет мелкие поры. Этот эффект вызван в данном случае промерзанием неводонасыщенного пористого материала.

В заключение отметим, что эти эксперименты подчеркивают важную роль влажности в морозном выветривании и показывают, как важно определять степень критического насыщения. Набухание влажных образцов имеет место только в условиях высокого насыщения и быстрого охлаждения, которое усиливает влияние уве-

Дилатометрические измерения, мкм

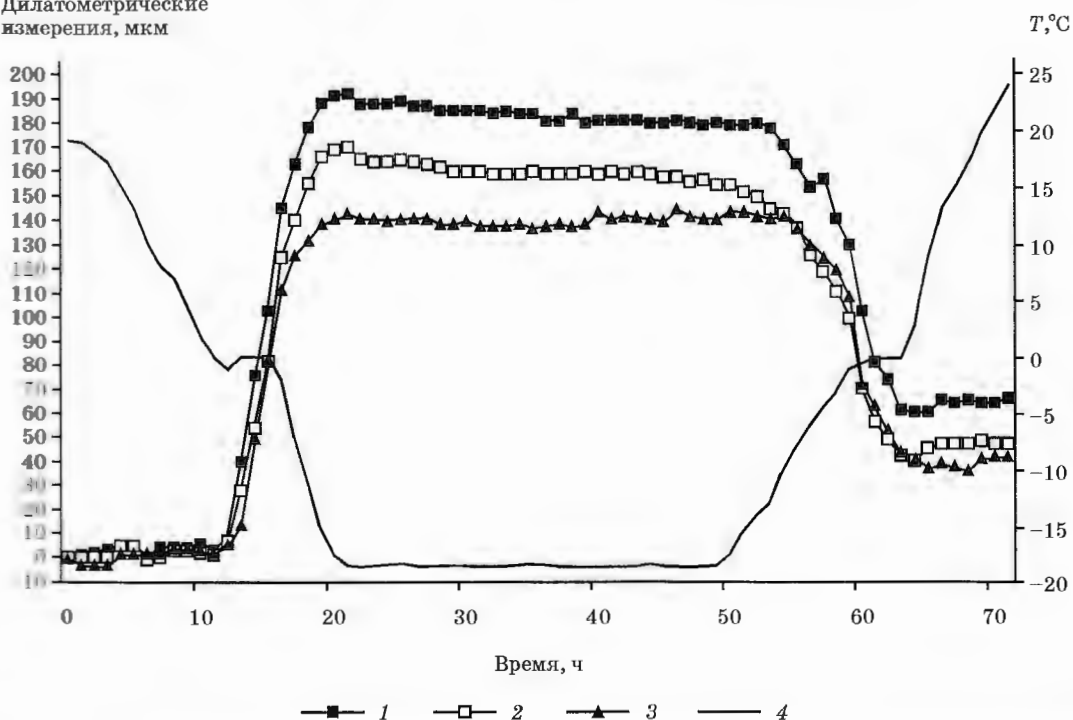


Рис. 3. Дилатометрия образца Breze № 19, подвергнутого циклу промерзания/оттаивания с коэффициентом водонасыщения 98%.

1 — измерения на границе верхней плоскости цилиндра; 2 — измерения в центральной точке верхней плоскости цилиндра; 3 — сумма измерений на образующей цилиндра; 4 — температура в образце, равная температуре, измеренной датчиком Pt₁₀₀ внутри образца.

Дилатометрические измерения, мкм

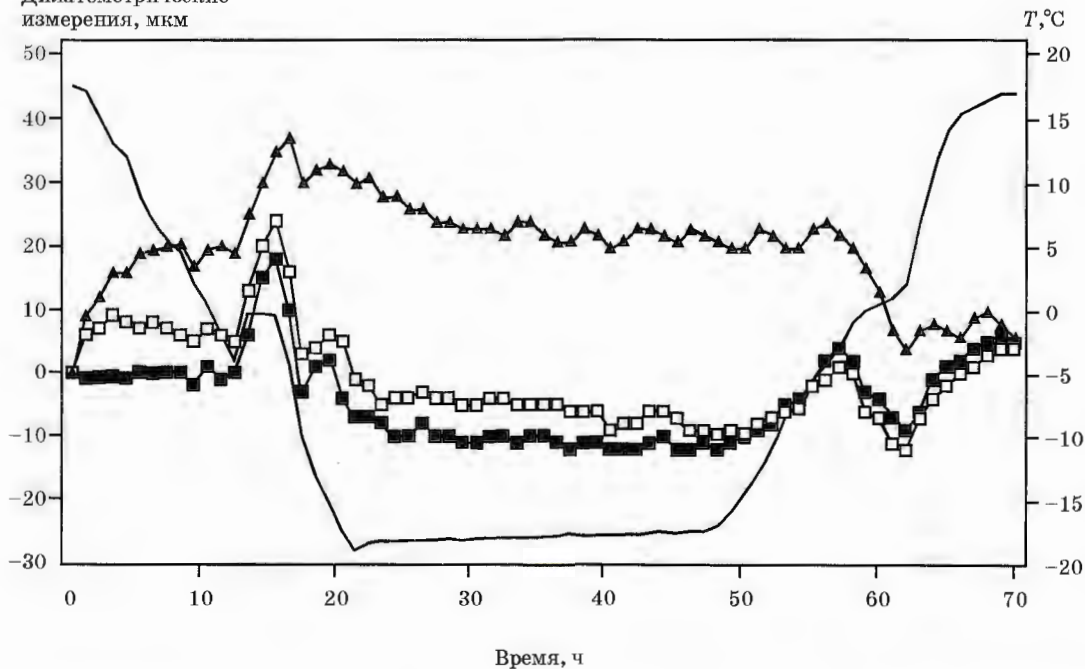


Рис. 4. Дилатометрия образца Breze № 21, подвергнутого циклу промерзания/оттаивания с коэффициентом водонасыщения 86%.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

личения объема при переходе воды в лед. Этим объясняется морозобойное растрескивание пород [Letavernier, Ozouf, 1987]. При низких уровнях насыщения (что чаще встречается в естественных условиях) это набухание малозаметно и обычно происходит сжатие образца. Это можно объяснить миграцией незамерзшей воды внутри пористого материала, приводящей к иссушению более мелких пор и формированию линз льда вблизи поверхности. Это приведет к выветриванию образца в результате [Letavernier, Ozouf, 1987], а не в связи с высокой степенью насыщения и быстрым охлаждением. Таким образом, раскалывание породы, видимо, довольно редкий вид выветривания в геоморфологии, как другие авторы уже предполагали, возможно, что роль увлажнения и иссушения может быть более значительна, чем предполагалось до сих пор [White, 1976].

Дополнительные доказательства миграции незамерзшей воды

В мерзлом состоянии некоторые образцы Breze были послойно разрезаны алмазной пилой в морозильной камере Гляциологической лаборатории Брюссельского Университета. Целый образец был разрезан на мелкие кусочки размером от 1 см³ и менее, которые были взвешены после промерзания, а затем высушены при температуре 50 °С и затем повторно взвешены для определения влажности. Предварительное испытание перед охлаждением было проведено для того, чтобы убедиться, что распределение воды в образце перед промерзанием — равномерное. На рис.5 показаны изолинии влажности после промерзания для всего распиленного образца Breze, который до промораживания имел степень насыщения 75%. Часть воды мигрировала от центра образца (где коэффициент водонасыщения после промерзания составил 45%) к боковой поверхности: относительная влажность здесь после промерзания оказалась более 85%. Лед в основном образовался внутри пористого материала, а не на поверхности образца.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭТОГО МЕТОДА В ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Цель исследования

Как уже подчеркивалось во введении, вопрос, является ли воздействие мороза определяющим фактором выветривания в холодных регионах, все еще не решен. На данном уровне знаний лучший путь попытаться решить вопрос о воздействии мороза — это объединить несколько лабораторных испытаний с полевыми исследованиями в районах, характеризующихся быстрым разрушением выходящих на поверхность пород.

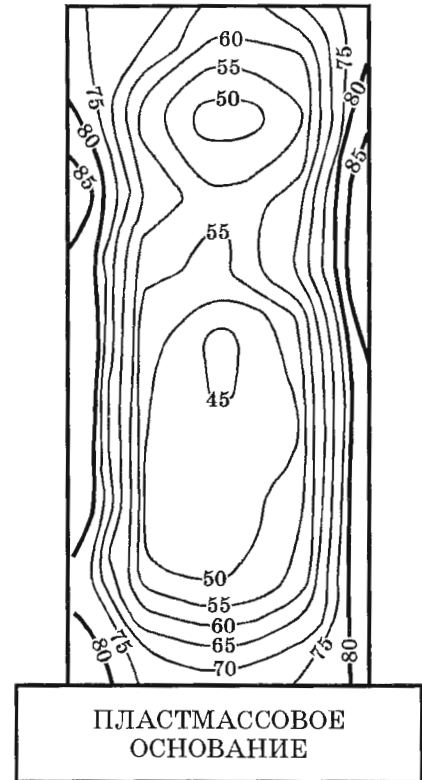


Рис. 5. Сечение цилиндрического образца породы Breze после промерзания с изолиниями коэффициента водонасыщения через 5%; степень водонасыщения породы до промерзания 75%. (Подробнее — в [Prick, 1995]).

Осыпные склоны Плато Маунтин (Альберта, Канада) позволяют успешно применить такие эксперименты в полевых исследованиях. Осыпные склоны гораздо больше распространены в этих местах, чем где-либо еще в Скалистых горах Юго-Западной Альберты, где на поверхность выходят известняки того же возраста. Для этих гор характерно распространение реликтовой мерзлоты, исследованием которой занимается С. Харрис (1997). Плато Маунтин представляет собой пологую антиклиналь, сложенную субгоризонтальными слоями осадочных пород карбона, главным образом известняками и доломитами. Обнажающиеся породы являются источником обломочного материала на склонах. Доступность известняков для исследования была очень важна, так как большинство методов измерения морозного воздействия разрабатывались для известняков. Насколько нам известно, это первые исследования такого рода в Северной Америке.

Перспективы исследований

Чтобы проверить, может ли одно морозное воздействие разрушить такое большое количест-

во известняков, была проведена оценка прочности двух различных фаций породы в полевых и лабораторных условиях. Так как необходимо хорошо знать физические характеристики породы для объяснения процессов, протекающих при замерзании, была измерена пористость этих известняков с помощью ртутного порометра в Геоморфологическом Центре в Каннах (Франция).

Несколько образцов было доставлено в Центр в сентябре 1996 г. Их пористость (измеренная в вакууме) и их модули Юнга будут измерены снова весной и осенью 1997 г. для того, чтобы сравнить различие зимнего и летнего выветривания. Действительно, возможно, что чаще или реже повторяющийся ежедневный ночной мороз в течение лета может быть более разрушителен по отношению к этим породам, чем продолжительное зимнее промерзание, так как зимой образцы часто покрыты снегом.

В лаборатории поведение этих пород при увлажнении и иссушении при постоянной температуре оценивалось dilatометрией [Hames et al., 1987] по потере веса и модулю Юнга. Когда исследуется влияние мороза, большое значение имеют опыты по увлажнению и иссушению. Так как все опыты с промораживанием и оттаиванием выполняются с влажными образцами, то невозможно было бы разделить воздействие влаги на породу от действительного воздействия превращения воды в лед.

Степень критического насыщения будет определена с помощью аппарата Grindosonic. На основании этих результатов в Льежском Университете (Бельгия) будет выполнена dilatометрия таким же образом, как описано в этой статье. Интересная часть исследований — это тесты на измельчаемость. Они состоят в оценке потери веса образца в зависимости от количества циклов промерзания и оттаивания и успешно использовались в исследованиях ранее [Letavernier, Ozouf, 1987]. Такие испытания выполнялись при различных температурах в Калгари (в диапазоне +20 °C и -20 °C), Каннах (в диапазоне +12 °C и -5 °C) и Льеже (в диапазоне +3 °C и -3 °C).

Предварительные результаты и область применения

Первые результаты подчеркивают малую потерю веса в известняках, подвергавшихся ежедневному циклу промерзания /оттаивания в диапазоне температур +20 °C и -20 °C. Возможно, другие процессы, такие как снятие давления, могли оказывать некоторое воздействие на эти породы, геологическая история которых включает формирование складчатости Скалистых гор в результате столкновения прибрежных плит вдоль Северо-Американской платформы. Их пористость крайне низкая (0,38—1,22 %). В соот-

ветствии со шкалами чувствительности, установленными другими авторами [Letavernier, Ozouf, 1987] и нашими предыдущими работами [Prick, 1997], известняк с такой низкой пористостью не чувствителен к промерзанию.

Dilatометрический метод, объединенный с измерением критической степени насыщения — это хороший способ оценить чувствительность пород к промерзанию, наблюдать их поведение и определить, какой вид миграции воды имеет место. Однако наша экспериментальная методика и размер наших образцов позволяет нам только наблюдать разрушение и масштаб выветривания. Существует другой тип морозного выветривания: расклинивающее воздействие воды, попадающей в трещины и при замерзании разрушающей их [Letavernier, Ozouf, 1987]. Этот процесс, возможно, очень широко распространенный компонент выветривания в естественных условиях. Он изучался и моделировался в лаборатории [Davidson, Nye, 1985; Tharp, 1987; Matsuoka, 1995]. В настоящее время мы технически не можем проверить значение этого процесса и сравнить с результатами моделирования, но ясно, что он может играть важную роль в откалывании фрагментов породы в поле, особенно в случае плотных известняков с низкой пористостью [Matsuoka, 1995].

Если наша работа подтвердит предварительные результаты, показывающие слабое участие промерзания в выветривании этих известняков, в нашей следующей работе мы постараемся найти другой процесс, объясняющий это явление.

ВЫВОДЫ

Разработанный лабораторный метод объединяет dilatометрические измерения в течение цикла промерзания/оттаивания и оценку степени критического насыщения. Это может дать ценную информацию при исследовании морозного выветривания и определить различные процессы, участвующие в морозном выветривании в естественных условиях. Изучение осыпных склонов Плато Маунтин представляет интерес в качестве применения лабораторных методов в полевых исследованиях. Мы надеемся, что эта работа принесет некоторые новые элементы в решение важного вопроса: так ли часто морозное выветривание участвует в формировании геоморфологического облика холодных регионов [Hall, 1995].

Я выражаю глубокую признательность проф. А. Писсару за помощь и советы в лабораторной работе и проф. С. Харрису за помощь и обоснование полевых исследований. Я также благодарю д-ра Дж.-К. Озоуфа из Геоморфологического центра в Каннах, проф. Р. Соучеза и д-ра Дж. Л. Тисона из Университета Брюсселя.

Мы высоко ценим техническую помощь Дж. Л. Женикота, которая стала возможна благодаря „Прайм Проджект“, Министра региона Валлон, которому я весьма признательна.

Литература

- Akagawa S. & Fukuda M. Frost heave mechanism in welded tuff // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1991, 2, 4, p. 301 — 310.
- Davidson G.P. & Nye J.F. A photoelastic study of ice pressure in rock cracks // *Cold Regions Science and Technology*, 1985, 11, p. 143—153.
- Douglas G.R., Mc Greevy J.P. & Whalley W.B. Rock weathering by frost shattering, Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost (Fairbanks, Alaska, July 1983), Washington D.C. : National Academy Press, 1983, p. 244—248.
- Fagerlund G. Degré critique de saturation, un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction, *Matériaux de Construction*, 1971, 4 (23), p. 271—285.
- Fahey B.D. & Lefebure T.H. The freeze-thaw regime of a section at the Niagara escarpment on the Bruce Peninsula, Southern Ontario, Canada // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13, p. 293—304.
- Hall K. Rock moisture content in the field and the laboratory and its relationship to mechanical weathering studies // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11, p. 131—142.
- Hall K. Freeze-thaw weathering : the cold region „panacea“ // *Polar Geography and Geology*, 1995, 19, 2, 79—87.
- Hallet B., Walder J.S. & Stubbs C.W. Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained subzero temperatures: Verification from an experimental study using acoustic emissions // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1991, 2, p. 283—300.
- Hames V., Lautridou J.P., Ozer A. & Pissart A. Variations dilatométriques de roches soumises B des cycles „humidification — séchage“ *Bulletin de l'Association FranHaise pour l'Etude du Quaternaire*, 1987, 3, p. 133—138.
- Harris S.A. A relict of Late Quaternary permafrost on a former nunatak at Plateau Mountain, S.W. Alberta, 1997. Paper presented at this conference.
- Letavernier G. & Ozouf J.Cl. Résultats des recherches récentes sur la géolifraction des calcaires // *Inter-Nord*, 1987, 18, p. 53—63.
- Matsuoka N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach // *Cold Regions Science and Technology*, 1990, 17, p. 253—270.
- Matsuoka N. A laboratory simulation on freezing expansion of a fractured rock : preliminary data // *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, Dec. 1995, 21, p. 5—8.
- Mc Greevy J.P. Some perspectives on frost shattering // *Progress in Physical Geography*, 1981, 5, 1, p. 57—75.
- Mugridge S.J. & Young H.R. Disintegration of shale by cyclic wetting and drying and frost action // *Canad. J. Earth Sci.* 1983, 20, p. 568—576.
- Pissart A., Prick A. & Ozouf J.Cl. Dilatometry of porous limestones undergoing freezing and thawing // *Proceedings of the VIth International Conference on Permafrost*, 5—9 July 1993, Beijing, China, 1993, 1, p. 523—527.
- Prick A., Pissart A. & Ozouf J.Cl. Variations dilatométriques de cylindres de roches calcaires subissant des cycles de gel-dégel // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1993, 4, p. 1—15.
- Prick A. Dilatometrical behavior of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles // *Catena*, Special Issue, 1995, 25 (1-4), p. 7—20.
- Prick A. The critical degree of saturation as a threshold moisture level in frost weathering of limestones // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, in press.
- Tharp T.M. Conditions for crack propagation by frost wedging, *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 99, p. 94—102.
- Weiss G. Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter // *Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen*, B, 1992. 9, 118 p.
- White S.E. Is frost action really only hydration shattering ? // *A review, Arctic and Alpine Research*, 1976, vol. 8, 1, p. 1—6.

Поступила в редакцию
24 апреля 1997 г.