

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО ФИЗИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ

О.К. Воронков, Л.Ф. Ушакова

ОАО Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 195220, С.-Петербург, ул. Гжатская, д. 21, Россия

Для оценки и прогнозирования на заданный срок состояния и характеристик свойств грунтов оснований и плотин из местных материалов под влиянием естественных и техногенных температурно-влажностных воздействий выполнено моделирование длительного процесса (2500 циклов) физического выветривания грунтов с учетом основных компонентов: морозного выветривания (МРВ), выветривания увлажнения-высушивания (ВУВ), температурного выветривания (ТВ). Рассмотрены основные положения методики моделирования, которая включала в себя оценку характеристик физико-механических свойств образцов неразрушающим ультразвуковым методом. Приведены и обсуждены результаты исследований.

Криогенное выветривание, скальные породы, методика, механические свойства, ультразвуковой контроль

ULTRASONIC METHOD OF EVALUATION OF CHANGE IN ROCK PROPERTIES DURING MODELLING OF LONG-TERM CRYOGENIC WEATHERING

O.K. Voronkov, L.F. Ushakova

Vedeneev All-Russian Research Hydrotechnical Institute, 195220, St. Petersburg, Gzhatskaya st., 21, Russia

Assessment of the state and changes in the properties of soils in foundation soils and dams of local materials under natural and technogenic temperature-humidity effects was carried out by laboratory modelling of 2500 cycles of cryogenic weathering of rock samples taking into account three principal components: frost weathering, dampening-drying and thermal weathering. The essentials of modelling technique, including evaluation of mechanical properties by non-destructive ultrasonic method, are considered, and the results are presented and discussed.

Cryogenic weathering, rock, mechanical properties, ultrasonic control

Грунты оснований гидротехнических сооружений и материалы грунтовых плотин в период эксплуатации подвержены длительным природным и техногенным температурно-влажностным воздействиям. Это приводит к дезинтеграции пород, снижению их прочности, ухудшению других характеристик, а в ряде случаев — к недопустимым деформациям и снижению уровня надежности системы „плотина-основание“ или существенному увеличению фильтрации.

В районах умеренного (среднегодовая температура воздуха ($t_{cp} = +4—+12$ °С), холодного ($t_{cp} = -4—+4$ °С) и полярного ($t_{cp} = -12—-4$ °С) климата природные и техногенные температурно-влажностные воздействия на грунты могут быть объединены достаточно емким понятием физического выветривания (ФВ), включающего следующие компоненты: а) морозное (криогенное) выветривание (МРВ); в зависимости от типа породы его долевого вклад в дезинтеграцию пород Северной строительного-климатической зоны (ССКЗ) составляет от 40 до 80 % при совмест-

ном воздействии всех факторов физического выветривания [1]; МРВ обусловлено напряжениями кристаллизации воды (льда) $\sigma_{л}$ в трещинах и порах породы; б) выветривание увлажнения-высушивания (ВУВ) грунтов; его долевого вклад в дезинтеграцию оценивается в пределах от 8 до 40 %; этот компонент выветривания связан с расклинивающими напряжениями $\sigma_{в}$ водных пленок; в) температурное (термическое) выветривание (ТВ); его долевого вклад в дезинтеграцию пород в природных условиях большинства регионов России составляет 4—6 %; в районах, характеризующихся малым среднегодовым количеством осадков, и для сухих (морозных или сыпучемерзлых) пород роль термического выветривания может оказаться весомее; ТВ связано с температурными напряжениями $\sigma_{т}$, величина которых пропорциональна градиенту температуры.

Напряжения $\sigma_{л}$, $\sigma_{т}$, $\sigma_{в}$ развиваются во времени асинхронно. Поэтому суммирование максимальных значений этих напряжений неправомерно (можно только говорить о сумме напря-

жений в каждый момент времени τ_i). Если при τ_i сумма указанных напряжений превысит величину локальной прочности породы на разрыв, то возможна локальная дезинтеграция породы, микроразрушения и рост трещин. Закономерности дезинтеграции скальных и крупнообломочных пород при физическом выветривании рассмотрены нами ранее [Воронков, Ушакова, 1996; 1980].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ФИЗИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ

В природных условиях МРВ и ТВ, как правило, связаны с суточными, сезонными, годовыми и вековыми колебаниями температуры. ВУВ обусловлено, как метеорологическими, так и гидрогеологическими, а также техногенными причинами, в частности: а) естественными колебаниями уровня подземных вод и уровня воды в водоемах; б) осадками в виде дождя; в) весенним снеготаянием и последующей потерей грунтами гравитационной воды; г) техногенными колебаниями уровня воды, например, при работе ГЭС и ГАЭС.

Имеющийся на сегодня опыт лабораторного изучения влияния температурно-влажностных воздействий на грунтовые материалы свидетельствует об одностороннем характере большинства исследований, выражающемся в том, что для районов холодного и полярного климата моделируется лишь процесс морозного выветривания [Конищев, 1973; Мазуров, Тихонова, 1964; Воронков, Ушакова, 1980 и др.], для районов умеренного климата — выветривание увлажнения — высушивания [Лушнов, 1981; Матвеев, 1972], а для районов тропического и субтропического климата — процесс гидрохимического выветривания [Ярг, 1987]. Однако из результатов анализа климатических данных следует, что в районах холодного и полярного климата также значимо влияние ТВ и ВУВ, а в районах умеренного климата роль МРВ в дезинтеграции грунтов не уступает роли ВУВ (а в процессе деструкции скальных грунтов роль МРВ даже преобладает). Таким образом, учитывая климатические особенности России и, в частности, районов ССКЗ, необходимо учитывать влияние всех трех компонентов (МРВ, ВУВ, ТВ) на процесс дезинтеграции грунтов и определить вклад каждого из них применительно к изучаемому грунту конкретного района.

Лабораторное изучение процесса физического выветривания грунтов должно выполняться на образцах горных пород, имеющих естественную структуру, состав и свойства. Это обес-

печивает значения констант подобия природы и модели по большинству физических, тепловых и физико-механических характеристик, равные 1. Моделирование процесса физического выветривания должно выполняться в идентичных естественным (или близким к ним) термовлажностным условиям. Например, при моделировании МРВ и ТВ должно соблюдаться примерное равенство температур (средних значений амплитуд изменения и градиентов температуры) в натурных и лабораторных условиях. Это требование реализуется использованием медленного режима замораживания: образцы выдерживают в морозильной камере в течение двух часов при температуре -3°C , затем в течение двух-трех часов температура постепенно снижается до заданного значения t_{\min} и поддерживается на этом уровне в течение 5—7 часов.

Рекомендуемый методический подход к моделированию физического выветривания предполагает параллельное выполнение циклических опытов на МРВ, ВУВ и ТВ. Для этого целесообразно использовать три приблизительно идентичные группы образцов, что, во-первых, позволяет оценить долевого вклад каждого фактора выветривания в процесс дезинтеграции пород, а, во-вторых, приблизительно втрое ускоряет весь комплекс исследований (по сравнению со случаем использования лишь одной группы образцов). Отметим, что достаточно объективный контроль за идентичностью групп образцов реализуется с помощью ультразвукового просвечивания.

Методика включает в себя следующие этапы:

I этап — анализ (применительно к конкретному объекту) климатических, гидрогеологических, гидрологических и техногенных факторов, обуславливающих температурно-влажностные воздействия на изучаемые грунты основания и грунтовые материалы инженерных сооружений (плотин, дамб, насыпей и др.) с целью определения среднегодовых значений числа циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО), циклов увлажнения-высушивания (ЦУВ) и среднегодового числа дней с большой амплитудой колебания температуры воздуха в течение суток (ЦТВ).

Необходимое число N (ЦЗО), подлежащее реализации в лабораторных исследованиях, назначается с учетом:

— схемы мелкомасштабного районирования территории России по главнейшему фактору МРВ — среднегодовому числу N_0 циклов замораживания-оттаивания на дневной поверхности (рис. 1);

— схемы крупномасштабного районирования конкретного изучаемого участка по числу N_0 ;

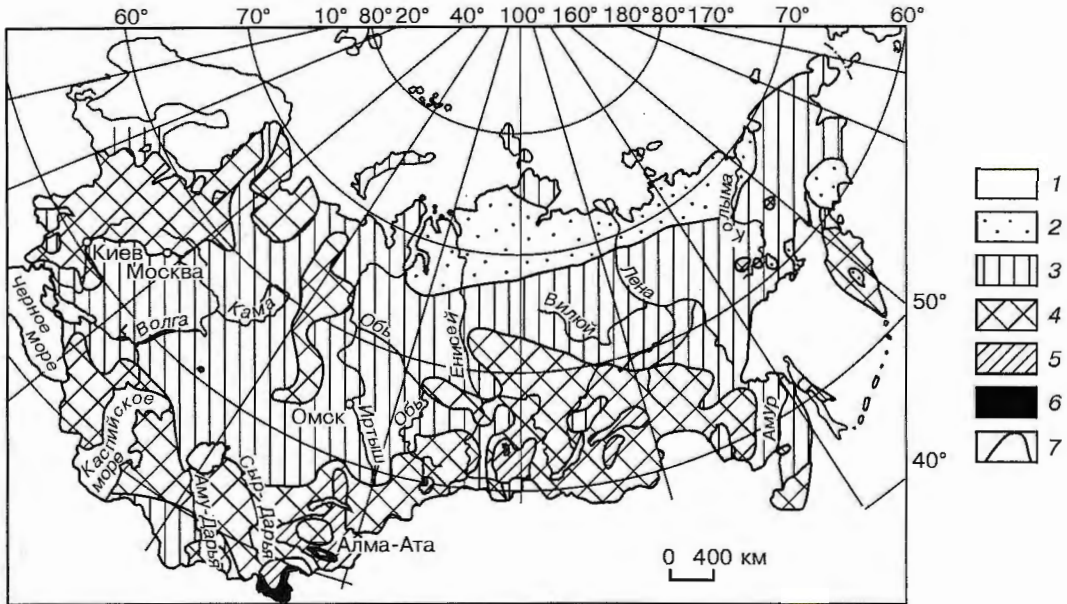


Рис. 1. Схема районирования территории России и сопредельных республик по числу (N_0) циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО) за один год на поверхности почвы.

Области с числом циклов N_0 1—6: 1 — $N_0 < 30$; 2 — $30 \leq N_0 \leq 50$; 3 — $50 < N_0 \leq 70$; 4 — $70 < N_0 \leq 100$; 5 — $100 < N_0 \leq 130$; 6 — $130 < N_0$; 7 — граница областей.

— заданной продолжительности прогноза T (лет), для постоянных ГТС полный ресурс работоспособности оценивается сроком приблизительно 60—100 лет;

— понижающего коэффициента за период наличия снежного покрова (в среднем равного 0,7).

Поэтому

$$N \approx 0,7 \cdot N_0 \cdot T;$$

— затухания процесса МРВ с глубиной от дневной поверхности (при оценках для внутренних зон основания или сооружения) [Рекомендации..., 1989].

Необходимое число циклов n (ЦУВ), подлежащее реализации в лабораторных исследованиях, назначается с учетом:

— схемы мелкомасштабного районирования территории России по среднегодовому числу дней n_0 со значительным (свыше 5 мм в сут.) количеством осадков в виде дождя (рис. 2);

— данных о среднегодовых естественных ($n_{ест}$) и техногенных ($n_{тех}$) колебаниях уровня воды в грунтах основания или грунтового сооружения;

— заданной продолжительности прогноза

$T_{лет}$

Поэтому

$$n = (n_0 + n_{ест} + n_{тех})T.$$

В частности, при оценке роли ВУВ на состоянии грунтов в бортах карьеров можно полагать $n_{ест} = 0$, $n_{тех} = 0$.

Необходимое число циклов m (ЦТВ), подлежащее реализации в лабораторных исследованиях, назначается с учетом:

— метеоданных о среднегодовом числе дней n_0 с большой амплитудой колебаний температуры воздуха в течение суток; с известной долей условности принимаем значение амплитуды $|\Delta t| \geq 10$ °C, что означает среднее изменение температуры воздуха более 0,4 °C/час (при наиболее вероятных градиентах около 1 °C/час) (рис. 3);

— данных о возможных техногенных температурных воздействиях $m_{тех}$ с указанной выше амплитудой колебаний температуры;

— заданной продолжительности прогноза $T_{лет}$.

Поэтому

$$m = (m_0 + m_{тех}) \cdot T.$$

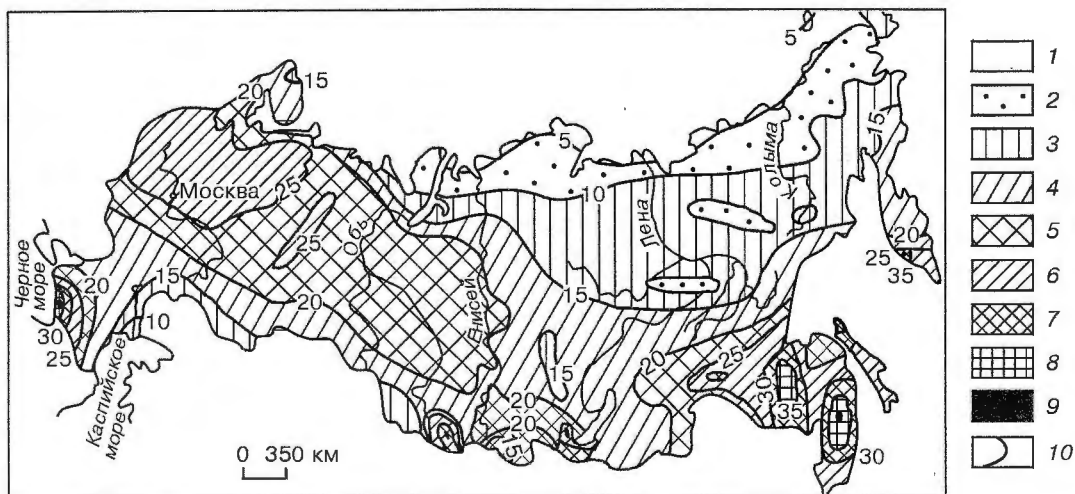


Рис. 2. Схема районирования территории России по числу дней в году (n_0) с дождевыми осадками более 5 мм в сут.

Области с n_0 1–10: 1 — $n_0 < 5$; 2 — $5 < n_0 \leq 10$; 3 — $10 < n_0 \leq 15$; 4 — $15 < n_0 \leq 20$; 5 — $20 < n_0 \leq 25$; 6 — $25 < n_0 \leq 30$; 7 — $30 < n_0 \leq 35$; 8 — $35 < n_0 \leq 40$; 9 — $40 < n_0 \leq 45$; 10 — граница областей.

II этап — лабораторные испытания указанных выше трех групп образцов грунта соответственно на МРВ, ВУВ, ТВ. При этом осуществляется периодический (например, через 0,1N; 0,1n; 0,1m) контроль ряда характеристик:

— массы образцов (для скальных и полускальных пород) с оценкой величины „потери массы“

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \frac{M_0 - M_i}{M_0} 100 \%,$$

где M_0 — масса образца, высушенного до постоянного веса, перед испытанием на МРВ, ВУВ, ТВ; i — число циклов, причем максимальное i равно N — при МРВ, n — при ВУВ, m — при ТВ; M_i — масса образца, высушенного до постоянного веса, после i циклов.

— скорости распространения упругих волн в образцах скальных и полускальных грунтов методами ультразвукового прозвучивания или профилирования;

— гранулометрического состава нескальных грунтов;

— прочностных и деформационных характеристик грунтов.

III этап — оценка и прогнозирование на заданный срок состояния и характеристик свойств грунтов под влиянием естественных и техногенных температурно-влажностных воздействий, в том числе во внутренних зонах основания и грунтового сооружения. Отдельные ас-

пекты такого прогнозирования рассмотрены в работах [Матвеев, 1972; Лушнов, 1981; Воронков, Ушакова, 1980; Рекомендации..., 1989].

Примечания

1. Схема районирования территории России по среднегодовому числу n_0 (см. рис. 2) в первом приближении характеризует распределение суммарного числа циклов умеренного и интенсивного ВУВ за счет дождевых осадков теплого периода (число дней с дождевыми осадками более 5 мм в сут). При необходимости определить среднегодовое число циклов интенсивного ВУВ $n_{0(инт)}$ — среднегодовое число дней с дождевыми осадками свыше 10 мм в сут — рекомендуется использовать эмпирические формулы: а) для районов с большим количеством (400 мм и более) осадков теплого периода $n_{0(инт)} = 0,55n_0$; б) для районов с осадками теплого периода менее 400 мм $n_{0(инт)} = 0,42n_0$.

2. Для аналогичного перехода от числа циклов m_0 (см. рис. 3) — умеренного и интенсивного ТВ, характеризующихся градиентом температуры более 1 °С/час, к $m_{0(инт)}$ — с градиентом температуры более 2 °С/час, следует воспользоваться формулой:

$$m_{0(инт)} = \frac{10 \ln \frac{m_0}{80}}{1,32 - \ln \frac{m_0}{80}}$$

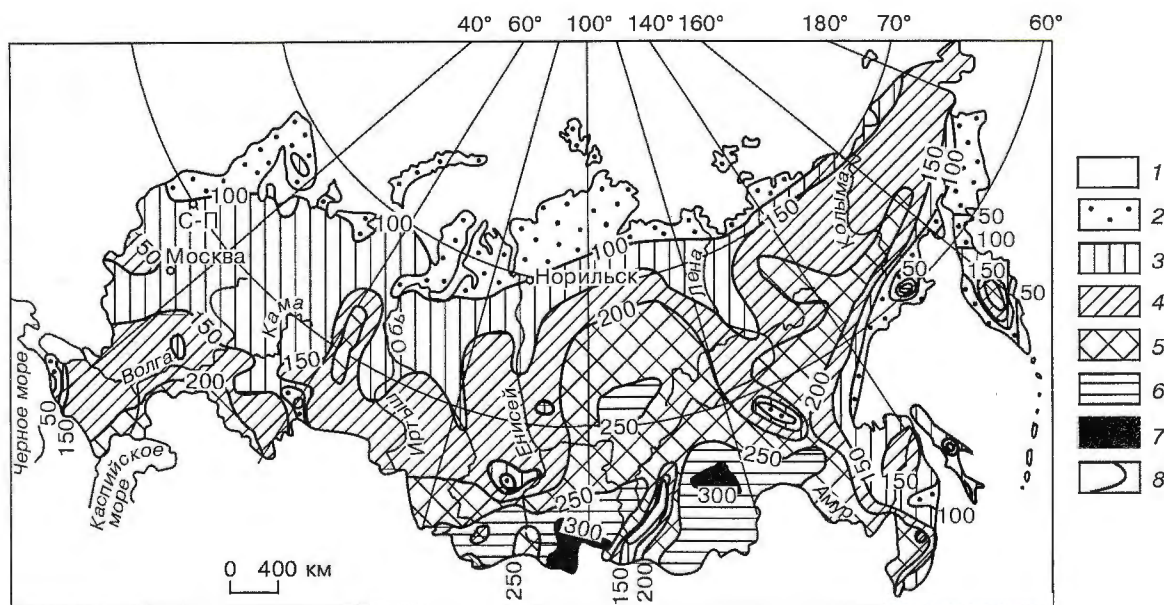


Рис. 3. Схема районирования территории России по числу дней в году (m_0) с суточной амплитудой температуры воздуха от 10 до 28 °С.

Области с m_0 1—8: 1 — $m_0 \leq 50$; 2 — $50 < m_0 \leq 100$; 3 — $100 < m_0 \leq 150$; 4 — $150 < m_0 \leq 200$; 5 — $200 < m_0 \leq 250$; 6 — $250 < m_0 \leq 300$; 7 — $300 < m_0 \leq 350$; 8 — граница областей.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Традиционные методы оценки физико-механических свойств (в частности, прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$) горных пород предполагают изготовление и испытание образцов правильной формы (кубиков, параллелепипедов, цилиндров) после заданного числа циклов ФВ, в результате чего образцы доводят до разрушения, т. е. они не могут быть использованы повторно в ходе дальнейших экспериментов по оценке влияния ФВ на состав и свойства пород. В отличие от разрушающих методов определения прочности, ультразвуковой метод позволяет оценить значения $\sigma_{сж}$ без нарушения целостности образцов пород любой (в том числе неправильной) формы, что дает возможность многократно использовать эти образцы, а также изучить динамику изменения $\sigma_{сж} = f(N, n, m)$.

Ультразвуковой метод оценки физико-механических свойств использует функциональные или корреляционные связи соответствующей характеристики со скоростью распространения продольной упругой волны V_p . Например, получив в результате эксперимента зависимости $V_p(N)$, значения V_p пересчитывают в эквивалентные им

характеристики физико-механических свойств. Таким образом, удается проследить: изменения динамического модуля упругости E_d ; статических значений модуля упругости E_c и модуля общей деформации E_0 ; предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, общей пористости $\Pi_{общ}$ и др.

Методика ультразвуковых исследований

Целью ультразвуковых исследований является периодический контроль в ходе опытов на ЦЗО за состоянием образцов горных пород, а также количественная оценка значения статических характеристик пород ($\sigma_{сж}$, E_c , E_0) путем использования корреляционных связей с величиной скорости распространения продольной упругой волны (либо по соответствующим связям с динамическим модулем упругости, скоростью поперечной волны, коэффициентом поглощения и др.).

Для определения скорости распространения продольных волн V_p по методике прозвучивания использовалась серийная ультразвуковая аппаратура (ИПА-59, УК-10П). Применялись пьезоизлучатели и пьезоприемники поршневого типа с собственной частотой 25—500 кГц (с уменьшением размеров прозвучиваемых образцов частота используемых пьезопреобразователей долж-

Изменение механических характеристик (V_p , $\sigma_{сж}$, E_0) образцов горных пород с ростом числа циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО) по сравнению с начальными значениями

Порода	После 400 ЦЗО			После 1000 ЦЗО			После 1500 ЦЗО			После 2000 ЦЗО			После 2500 ЦЗО		
	V_p	$\sigma_{сж}$	E_0	V_p	$\sigma_{сж}$	E_0	V_p	$\sigma_{сж}$	E_0	V_p	$\sigma_{сж}$	E_0	V_p	$\sigma_{сж}$	E_0
	V_{p400}	$\sigma_{сж400}$	E_{0400}	V_{p1000}	$\sigma_{сж1000}$	E_{01000}	V_{p1500}	$\sigma_{сж1500}$	E_{01500}	V_{p2000}	$\sigma_{сж2000}$	E_{02000}	V_{p2500}	$\sigma_{сж2500}$	E_{02500}
<i>Сухое состояние (ТВ)</i>															
Гранитоиды	1,3	1,4	1,8	1,3	1,5	2,0	1,35	1,5	2,8	1,4	1,5	2,8	1,5	1,5	2,8
Метаморфические сланцы	1,1	1,3	1,2	1,4	2,0	2,0	1,35	2,0	2,0	1,35	2,0	2,0	1,6	2,9	2,4
Известняки	1,3	1,85	2,3	1,45	2,3	3,1	1,5	2,3	3,7	Не опр.	Не опр.	Не опр.	1,6	2,4	3,7
Песчаники	1,2	1,4	2,1	1,2	1,5	1,6	1,2	1,8	1,65	1,2	1,8	1,65	1,3	2,0	1,9
<i>Водонасыщенное состояние (МРВ)</i>															
Гранитоиды	1,4	1,7	2,2	1,5	2,0	2,4	1,8	2,1	3,5	1,8	2,1	4,0	1,8	2,1	4,0
Метаморфические сланцы	1,1	1,4	1,3	1,4	2,3	1,9	1,5	2,7	2,3	1,5	2,7	2,3	1,5	2,7	2,4
Известняки	1,3	1,95	2,2	1,5	3,4	3,2	3,0	8,7	12,6	3,4	8,7	14,0	3,4	10,8	14,0
Песчаники	1,35	1,8	2,3	1,65	1,8	3,2	2,2	5,9	4,1	2,5	7,5	7,1	2,7	8,6	7,9

на увеличиваться). Контакт образца с излучателем и приемником не следует улучшать с помощью масел, технического вазелина и т. д., так как это препятствует повторному водонасыщению пород, а следовательно — проведению дальнейших опытов. Для улучшения контакта с образцом поверхность пьезопреобразователей смачивалась водой, а поверхность образца в местах контакта по-возможности выравнивалась крупным напильником. Перед выполнением основного объема ультразвуковых исследований проводились контрольные измерения скорости V_p : а) либо на эталонных образцах (входят в комплект ряда ультразвуковых приборов), б) либо на эталонных средах, например, в дистиллированной воде, значение V_p в которой зависит только от ее температуры (при $t = 15^\circ\text{C}$ значение $V_p = 1470$ м/с, при $t = 20^\circ\text{C}$ $V_p = 1485$ м/с).

Для выполнения ультразвуковых исследований отбирались не менее 25 образцов пород каждого литотипа (петротипа). Линейные размеры образцов должны быть не менее — 40 мм, что обеспечивает погрешность определения V_p не более $\pm 3\%$.

Отобранные для ультразвуковых исследований образцы высушивались при температуре 100—110 °C в течение 24 час до абсолютно сухого состояния (до постоянной массы). После этого для исходного состояния пород (до проведения циклических испытаний) определялись значения V_p в каждом образце абсолютно сухого состояния по трем взаимно перпендикулярным направлениям ($V_{p_{\text{рох}}}$, $V_{p_{\text{роу}}}$, $V_{p_{\text{роз}}}$) вычислялось среднегеометрическое значение

$$V_{po} = \sqrt[3]{V_{p_{\text{рох}}} \cdot V_{p_{\text{роу}}} \cdot V_{p_{\text{роз}}}}$$

Для пород с выраженной слоистостью (сланцеватостью) выполнялось также раздельное определение средних значений V_{po} вдоль слоистости (сланцеватости) и вкрест ее.

Последующие определения V_p выполнялись лишь после 30, 60, 100, 150, 200, 300 и т. д. ЦЗО (скальные породы), либо 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 и т. д. ЦЗО (полускальные породы). Перед очередным прозвучиванием образцы вновь высушивались до абсолютно сухого состояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ФИЗИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СКАЛЬНЫХ И ПОЛУСКАЛЬНЫХ ПОРОД

Основные результаты представлены в таблице и на рис. 4, 5. Коротко их можно сформулировать следующим образом:

а) при использовании традиционных (разрушающих) методов, из-за невозможности повторного испытания одних и тех же образцов, требуется большое количество проб. В связи с этим в известных из литературных источников опытах по оценке влияния МРВ на физико-механические свойства пород максимальная величина N , как правило, не превышала нескольких десятков ЦЗО, что эквивалентно выветриванию породы на дневной поверхности за короткий срок (1—2 года). Начиная с 1976 г., нами исследуется влияние физического выветривания на состояние и свойства большой группы образцов скальных пород, что позволило к настоящему времени выполнить около 3000 циклов МРВ и ТВ и около 1000 циклов ВУВ;

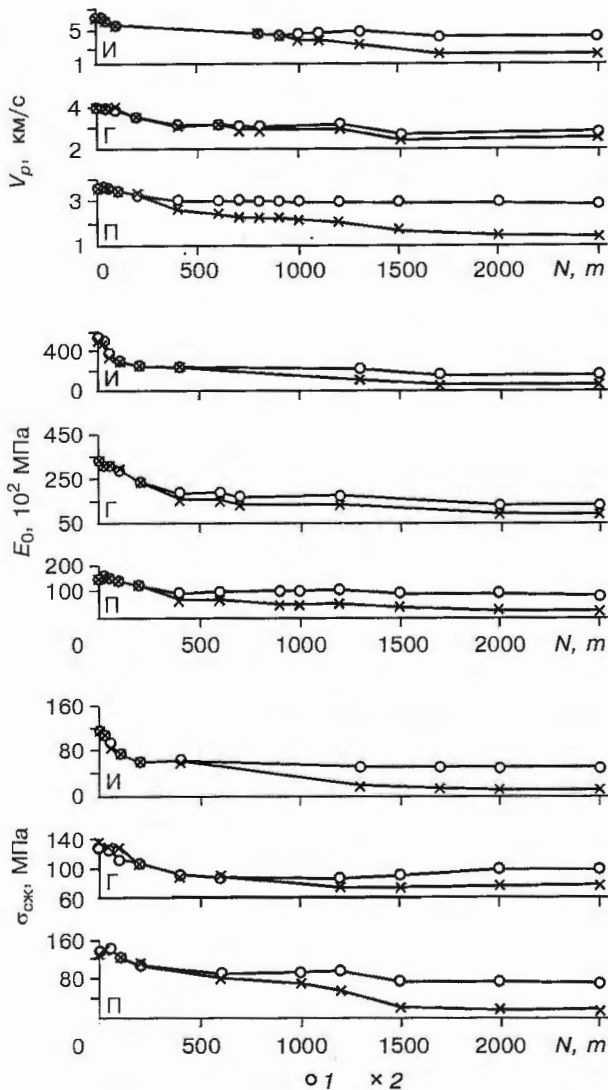


Рис. 4. Характер изменения скорости упругой волны (V_p), статического модуля деформации (E_0) и прочности на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) в процессе продолжительного (2500 циклов) выветривания: известняков (И), гранитоидов (Г), песчаников (П).

1 — температурное выветривание, 2 — морозное выветривание.

б) для всех скальных и полускальных пород независимо от их состава, текстурно-структурных особенностей, пористости, заполнителя пор и т. д. характерно общее уменьшение названных выше показателей свойств по мере роста числа циклов N и n . Это уменьшение в целом нелинейно: наряду с отдельными диапазонами N (или n), где характеристики изменяются очень сильно,

например, от 0 до 100—200 и более (рис. 4), имеют место диапазоны N и n , где характеристики практически не меняются (например, для известняков при $N = 600—1000$ ЦЗО; для гранитоидов — при $N = 600—1200$ ЦЗО, для песчаников и сланцев слабометаморфизованных — при $N = 150—250$ ЦЗО (см. рис. 4);

в) начальная часть графиков связи характеристик свойств с числом циклов (в диапазонах 0—200, иногда 0—400 ЦЗО) при ТВ (сухие породы) и МРВ (водонасыщенные породы) для большинства скальных грунтов (см. рис. 4) практически совпадает и лишь при больших значениях N и n эти графики заметно расходятся, и роль МРВ в снижении показателей прочности и деформируемости пород явно преобладает (по сравнению с ТВ). Изменения свойств образца горной породы происходит не только за счет трещинообразования в его приповерхностной части, но и деструктивных изменений во внутренних элементах образца;

г) в результате продолжительного процесса МРВ, после 2500 циклов (т. е. через 40—60 и более лет выветривания в природных условиях) значения прочности $\sigma_{сж}$ и модуля деформации E_0 скальных пород понизилось: в изверженных и метаморфических породах в среднем в 2,5—3,2 раза, а в скальных породах осадочного генезиса — приблизительно в 10 раз. При этом же количестве циклов температурного выветривания (ТВ) прочность скальных пород разного генезиса понизилась в среднем в 2,2 раза, а модуль деформации в 2,7 раза по сравнению с исходными значениями (до начала циклических испытаний). Прочность образцов горной массы песчанико-сланцевого комплекса (бассейна р. Колыма) после 250 ЦЗО в среднем понизилась в 1,86 раза;

д) общая пористость породы $P_{общ}$, включающая межгранулярную пористость (открытую и закрытую) и микротрещиноватость корреляционно связана со многими физическими и физико-механическими характеристиками пород, в частности, с коэффициентом размягчения K_p , коэффициентом морозостойкости K_m , деформационными и прочностными характеристиками. Располагая графиками $P_{общ}(N)$, $P_{общ}(n)$, можно проследить изменения ряда характеристик в процессе МРВ и ТВ (рис. 5).

Например, принимая расчетные среднегодовые значения для бассейна р. Колыма $N = 40$ ЦЗО (на дневной поверхности, покрываемой на зимний период снегом), получим для гранитов в обнажении через 40 лет следующее снижение K_m : с 0,86 до 0,64 (в зоне аэрации) и с 0,86 до 0,46 (в водонасыщенных-льдонасыщен-

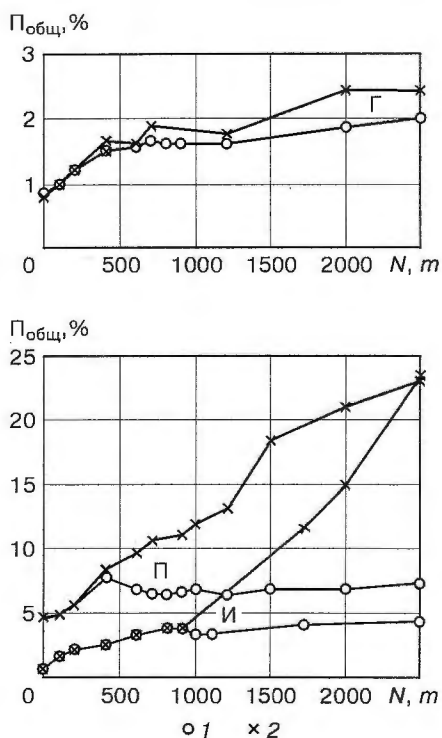


Рис. 5. Влияние морозного и температурного выветривания на значение общей пористости ($P_{общ}$) образцов скальных пород:

Гранитоидов (Г), известняков (И), песчаников (П); 1 — температурное выветривание, 2 — морозное выветривание.

ных породах). Для гранитов на глубине 20 см (расчетное значение $N = 10$ ЦЗО) такое изменение наступит приблизительно через 150 лет;

е) исследования доломитизированных известняков подтверждают преобладающую роль МРВ в общем процессе дезинтеграции горных пород. При МРВ после 20 циклов установлено уменьшение значения $\sigma_{сж}$ в 3 раза, а после 60 циклов образцы полностью разрушились. Роль ТВ и ВУВ в снижении характеристик свойств в этих породах оказалась приблизительно одинаковой: после 500 циклов значение $\sigma_{сж}$ понизилось в 1,2 раза (при ТВ) и в 1,3 раза (при ВУВ).

Литература

- Воронков О.К., Ушакова Л.Ф. Закономерности дезинтеграции скальных и крупнообломочных пород под воздействием физического выветривания // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1996, т. 231, с. 25—45.
- Воронков О.К., Ушакова Л.Ф. К прогнозу морозного выветривания и морозостойкости скальных пород на территории СССР // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1980, т. 137, с. 86—92.
- Конищев В.Н. Криогенное выветривание // II междунар. конф. по мерзлотоведению. Докл. и сообщ., вып. 3. Якутск, 1973, с. 38—45.
- Лушнов Н.П. Использование выветрелых горных пород в каменно-земляных плотинах. М., Стройиздат, 1981.
- Мазуров Г.П., Тихонова Е.С. Преобразование состава и свойств грунтов при многократном замораживании // Вестник ЛГУ. № 18, сер. геол. и географ. Вып. 3, 1964, с. 35—44.
- Матвеев Ю.Д. Динамика выветривания осадочных пород. М., Наука, 1972.
- Рекомендации по изучению влияния морозного выветривания на состояние и механические свойства скальных пород / Воронков О. К., Ушакова Л. Ф. / П 39-88 / ВНИИГ. Л., 1989, 68 с.
- Ярг Л.А. Инженерно-геологическое изучение процесса выветривания. М., 1987.

Поступила в редакцию
24 апреля 1998 г.