

СВОЙСТВА ЛЬДА И МЕРЗЛЫХ ПОРОД

УДК 624.131.25

ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА  
ДЕЗИНТЕГРАЦИИ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ  
ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ  
ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

О. К. Воронков, Л. Ф. Ушакова, В. О. Воронков\*

ОАО Всероссийский науч.-исслед. институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева,  
195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21, Россия  
\* Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/19, Россия

Разработана методика долгосрочного прогноза (десятки, сотни лет и более) дезинтеграции крупнообломочных грунтов, основанная на экспериментально выявленных закономерностях при исследованиях образцов пород различного минерального состава, испытанных более 3500 циклов температурно-влажностных воздействий: замораживания—оттаивания, водонасыщения—высушивания, охлаждения—нагрева. Методика предполагает наличие ограниченной информации об объекте исследований и ожидаемых температурно-влажностных воздействиях за период прогноза. Рассмотрены пределы применимости и достоверность методики. Приведен пример долгосрочного прогноза дезинтеграции горной массы песчанико-сланцевого состава из полезных выемок участка строящейся Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыма. Создано компьютерное приложение „Физическое выветривание“, позволяющее по программе реализовать долгосрочный прогноз дезинтеграции крупнообломочных, скальных и полускальных пород.

*Крупнообломочные грунты, физическое выветривание, гранулометрический состав, долгосрочный прогноз*

PROXIMATE PROCEDURE FOR LONG-TERM PREDICTION OF DISINTEGRATION OF COARSE-CLASTIC  
ROCK UNDER NATURAL AND TECHNOGENIC TEMPERATURE AND MOISTURE EFFECTS

O. K. Voronkov, L. F. Ushakova, V. O. Voronkov\*

Vedeneyev National Research Institute of Hydraulic Engineering, 195220, St.-Petersburg, Gzatskaya str., 21, Russia  
\* St.-Petersburg State University, 199034, St.-Petersburg, Universitetskaya embankment, 7/19, Russia

We present a procedure of long-term predictions (tens, hundreds years and more) of grain-size composition of coarse fragmentary rock, based on the experimentally established regularities when analyzing of rock samples subjected to 3500 cycles of temperature-moisture effects (TME): freezing—thawing, saturation—drying, cooling—warming. The procedure suggests the availability of limited information about the object of studies, and the number of expected TME is calculated on that basis. Considered are the applicability and confidence limits of the procedure in question and an example of long-term predictions of disintegration of rock mass of sand-shale composition from useful excavations of the construction site of Ust-Srednekanskaya hydropower plant on the Kolyma river. The „Physical weathering“ software is developed. It allows long-term prediction of disintegration of coarse-clastic, rocky and half-rocky grounds.

*Coarse-clastic rocks, physical weathering, grain-size composition, long-term prediction*

Температурно-влажностные воздействия (ТВВ) на грунты (скальные, полускальные, крупнообломочные, песчаные) неизбежно приводят к их дезинтеграции, уменьшению процентного содержания крупных фракций и росту содержания мелких, а следовательно, — к изменению физико-механических, фильтрационных и других характеристик.

Методика краткосрочного прогноза (в пределах десяти лет) изменения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов (в частности

горной массы), предполагающая использование экспериментального, экспериментально-расчетного и расчетного способов, описана нами ранее [Воронков, Ушакова, 1996]. Отдельные вопросы, связанные с краткосрочным прогнозом, затронуты также в работах отечественных и зарубежных исследователей [Шестернев, 2000; Nagai et al., 1991; Svantensson, 1985].

Ниже рассматривается методика долгосрочного прогноза (десятки—сотни лет и более) дезинтеграции крупнообломочных пород, основан-

ная на ранее выявленных закономерностях, а также на использовании результатов изучения грунтов-аналогов. Методика базируется на выполненных авторами экспериментах с сотнями образцов пород, испытавших более 3500 циклов ТВВ. Описание методики лабораторных исследований образцов пород приводится в нашей работе [Рекомендации..., 1989]. Опыты на циклическое замораживание—оттаивание раздельно группы водонасыщенных и группы воздушно-сухих пород выполнялись в режиме 10—16 часов замораживания при минимальной температуре  $-15...-20$  °С и 8—14 часов оттаивания при температуре воздуха около  $+20$  °С, что близко к „сибирскому“ типу выветривания [Wiman, 1963].

При циклическом увлажнении—высушивании режим следующий: 10—16 часов свободного водонасыщения и 8—14 часов высушивания. Общая продолжительность одного цикла замораживания—оттаивания (ЦЗО) и цикла увлажнения—высушивания (ЦУВ) в большинстве случаев составляла одни сутки.

Методика долгосрочного прогноза предполагает наличие весьма ограниченной информации об объекте исследований и ожидаемых ТВВ за период прогноза, в частности о:

- местонахождении изучаемого объекта с целью количественной оценки среднегодового числа циклов природных факторов ТВВ;

- возможных факторах техногенных ТВВ с оценкой среднегодового числа техногенных циклов ТВВ;

- сроках прогнозирования ( $T$ , лет) с целью оценки общего числа (природных и техногенных) циклов ТВВ;

- вещественном составе грунта (вид породы, которой представлены крупные и средние фракции) с целью выбора пород-аналогов из числа ранее изученных и использования ранее выявленных закономерностей их дезинтеграции;

- исходном гранулометрическом составе грунта (число фракций и процентное содержание каждого диапазона).

## ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

*I этап.* Раздельная оценка числа циклов морозного выветривания (МРВ), выветривания увлажнения—высушивания (ВУВ) и температурного выветривания (ТВ), которые обозначим соответственно  $N$ ,  $n$ ,  $m$ . За период прогноза  $T$  (в годах) эти оценки следующие:

$$N = 0,7N_0T, \quad (1)$$

$$n = (n_0 + n_{\text{ест}} + n_{\text{тех}})T, \quad (2)$$

$$m = (m_0 + m_{\text{тех}})T, \quad (3)$$

где  $N_0$ ,  $n_0$ ,  $m_0$  — среднегодовое число циклов соответственно МРВ, ВУВ и ТВ на дневной поверхности, определяемое по схемам районирования территории России, составленным авторами [Воронков, Ушакова, 1999];  $n_{\text{ест}}$ ,  $n_{\text{тех}}$  — среднегодовое число циклов водонасыщения—высушивания за счет естественных и техногенных колебаний уровня воды в грунтах основания или грунтового сооружения;  $m_{\text{тех}}$  — среднегодовое число циклов техногенных температурных воздействий при скорости изменения температуры выше  $1$  °С/ч;  $0,7$  — среднее значение понижающего коэффициента за период наличия снегового покрова.

Необходимо учитывать, что формулы (1)—(3) позволяют оценить число циклов ТВВ на дневной поверхности; при оценке числа циклов ТВВ во внутренних элементах сооружения или основания необходимо учитывать затухание естественных температурных воздействий с удалением от дневной поверхности, в частности при оценке значений  $N$  — его уменьшение по экспоненциальному закону [Рекомендации..., 1989].

*II этап.* Определение эквивалентного — приведенного к МРВ суммарного числа циклов температурно-влажностных воздействий ( $N_{\Sigma}$ ). Это связано с основной ролью МРВ в дезинтеграции пород, а также с наличием более полной информации о параметрах дезинтеграции пород при МРВ, необходимой для долгосрочного прогноза.

Для случая, когда крупные фракции грунта представлены скальными породами:

$$N_{\Sigma} \approx N + 0,1n + 0,01m. \quad (4)$$

Для случая, когда крупные фракции грунта представлены полускальными породами:

$$N_{\Sigma} \approx N + n + 0,1m. \quad (5)$$

Таким образом, полученное значение  $N_{\Sigma}$  определяет конечную абсциссу графика прогноза изменений гранулометрического состава грунта при физическом выветривании.

*III этап.* Выбор породы-аналога (либо сходной по вещественному составу породы) из числа ранее изученных и определение для нее параметра  $h_1$  — средней мощности слоя дезинтеграции за 1 цикл замораживания—оттаивания (ЦЗО) в образцах скальных и полускальных пород различного состава (табл. 1). Приведенные в табл. 1 данные получены авторами на основе определения „потери массы“ образцов в диапазоне 0—3000 ЦЗО для скальных и 0—200 ЦЗО для полускальных пород. Расчет значений  $h_1$  (мм) выполнялся по формуле:  $h_1 = \frac{\Delta M_1}{\delta S} 10^3$ , где  $\Delta M_1$  — среднее изменение массы образца за 1 ЦЗО, кг;  $S$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;  $\delta$  —

Таблица 1. Средняя мощность  $\bar{h}_1$  слоя дезинтеграции за 1 цикл замораживания—оттаивания в образцах скальных и полускальных пород (после предварительного водонасыщения)

Порода	$\bar{h}_1$ , мм
Диабазы	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Гранито-гнейсы, гнейсы, гнейсо-граниты	$9,0 \cdot 10^{-5}$
Граниты нетрещиноватые	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Метаморфические орто- и парасланцы	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Граниты выветрелые	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Известняки неразмокающие	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Порфиры	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Песчаники кварцевые, аркозовые	$4,8 \cdot 10^{-4}$
Песчанико-сланцевый комплекс пород флишеидного типа	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Глинисто-карбонатные породы (глинистые известняки, глинистые доломиты), размокающие	1,0
Мергели	3,5

средняя плотность образца, кг/м<sup>3</sup> [Рекомендации..., 1989, с. 16].

IV этап. Разделение фракций исходного гранулометрического состава грунта на две группы: 1) фракции „генератора“ (процентное содержание этих фракций уменьшается при воздействии ТВВ); 2) „дочерние“ фракции (процентное

содержание этих фракций увеличивается при воздействии ТВВ).

Генератором являются чаще всего 2—3 наиболее крупные фракции, суммарное содержание которых составляет приблизительно 50 %. В отдельных случаях генератором может служить одна, наиболее крупная фракция, если ее исходное содержание  $\Phi_0 \geq 50$  %.

Дочерние фракции крупнообломочных грунтов подразделяются на средние (чаще всего 1—20 мм) и мелкие (менее 1 мм).

Деление на эти фракции в известной мере условно, поскольку в процессе дезинтеграции грунта по мере истощения генератора его роль начинают выполнять наиболее крупные дочерние фракции. Выявлена и подтверждена многочисленными экспериментами следующая закономерность: по мере уменьшения процентного содержания фракций генератора, когда сумма снизится до величины  $20 \pm 5$  %, в его состав подключается наиболее крупная дочерняя фракция (смежная с генератором), процентное содержание которой начинает уменьшаться нелинейно по мере роста числа циклов ТВВ. После того, как в генераторе вновь останется 15—25 % грунта, к нему присоединится следующая, наиболее крупная из дочерних фракций и т. д., т. е. процесс дезинтеграции приобретает закономерный циклический характер (рис. 1).

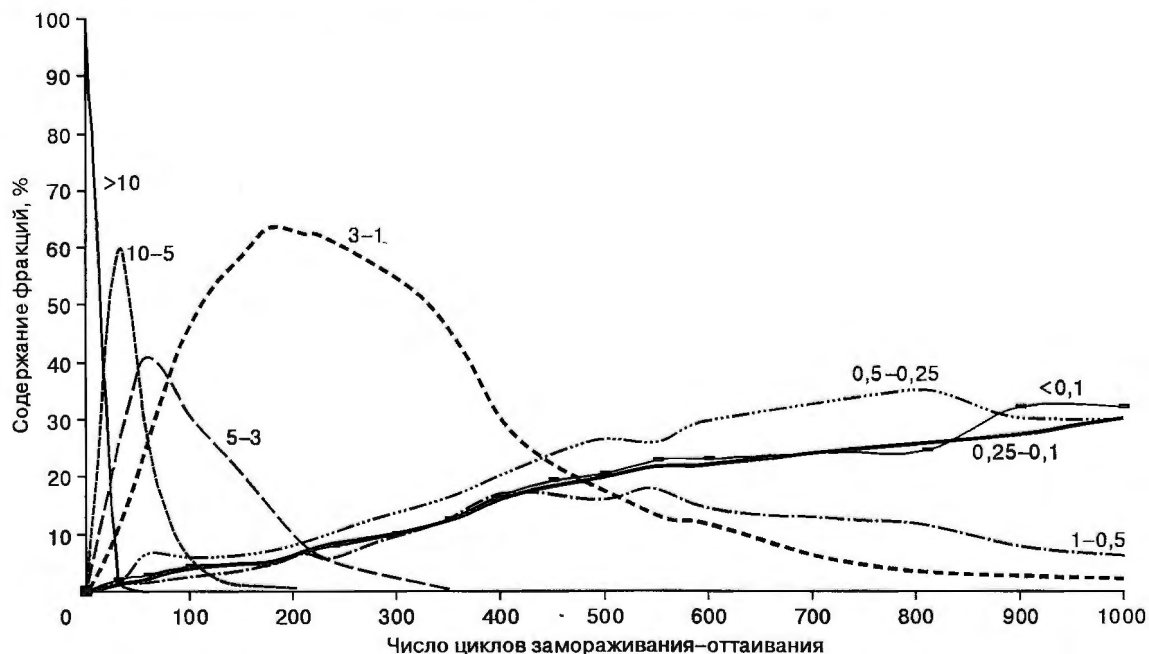


Рис. 1. Характер дезинтеграции крупной фракции породы, представленной водонасыщенным алевролитом (основание Зирани ГЭС), в зависимости от числа циклов замораживания—оттаивания (ЦЗО).

Экспериментальные данные — авторов.  
В поле рисунка указаны диаметры частиц фракции, мм.

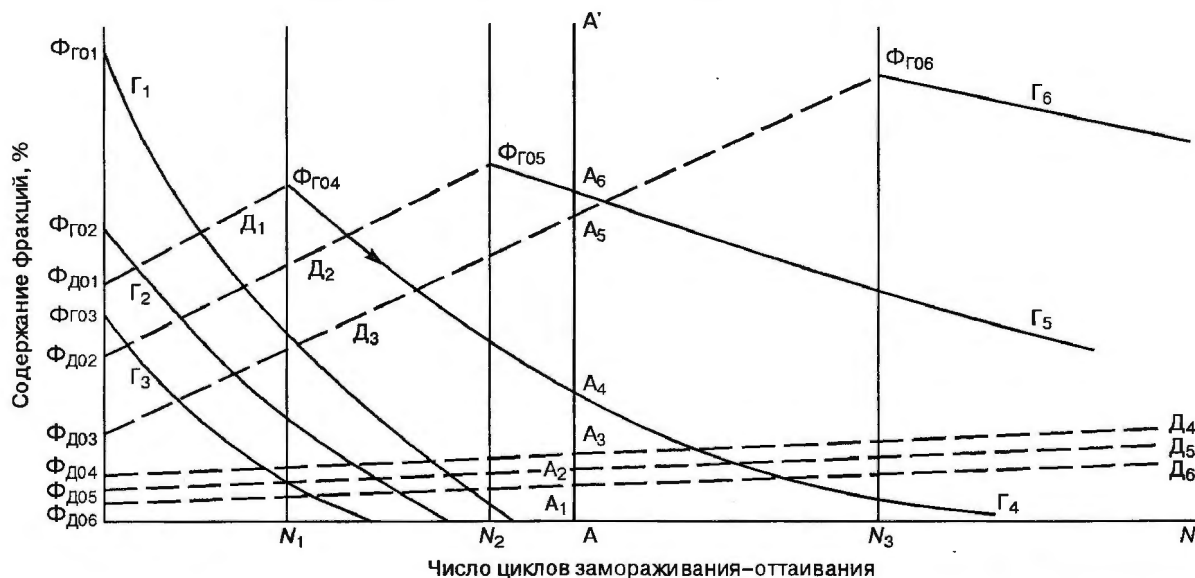


Рис. 2. Схематизация процесса изменения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов при физическом выветривании.

$\Phi_{Г01}$ ,  $\Phi_{Г02}$ ,  $\Phi_{Г03}$  — начальное содержание трех фракций генератора;  $\Phi_{Д01}$ ,  $\Phi_{Д02}$ ,  $\Phi_{Д03}$  — начальное содержание трех дочерних фракций среднего размера;  $\Phi_{Д04}$ ,  $\Phi_{Д05}$ ,  $\Phi_{Д06}$  — начальное содержание трех дочерних мелких фракций;  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ ,  $\Gamma_4$ ,  $\Gamma_5$ ,  $\Gamma_6$  — фракции генератора, содержание которых уменьшается по гиперболическому закону;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  — дочерние фракции среднего размера, содержание которых растет по линейному закону;  $D_4$ ,  $D_5$ ,  $D_6$  — дочерние мелкие фракции, содержание которых растет по линейному закону;  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  — числа ЦЗО, при которых наиболее крупная из дочерних фракций начинает выполнять функции генератора;  $AA'$  — любое вертикальное сечение, в котором сумма ординат фракций  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_6$  равна 100 %.

Схематизация процесса дезинтеграции в форме, удобной для понимания методики прогноза, показана на рис. 2.

При этом условно (для наглядности) принято, что грунт характеризуется девятью диапазонами фракций: по 3 диапазона в генераторе ( $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ ), средних дочерних ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ) и мелких дочерних ( $D_4$ ,  $D_5$ ,  $D_6$ ) фракциях.

*V этап.* Начальный процесс дезинтеграции каждой фракции генератора описывается эмпирическим уравнением:

$$\Phi_{Г} = \Phi_{Г0} / (1 + AN), \quad (6)$$

где в качестве начальных значений  $\Phi_{Г0}$  (применительно к рис. 2) выступают  $\Phi_{Г01}$ ,  $\Phi_{Г02}$ ,  $\Phi_{Г03}$ ;  $A$  — коэффициент, численное значение которого берется из табл. 2.

*VI этап.* Продукты дезинтеграции фракций генератора распределяются приблизительно равномерно (по массе) в пределах  $(K + 1)$  диапазонов дочерних фракций:  $K$  — число диапазонов средних фракций,  $1 / (K + 1)$  — часть общей массы продуктов дезинтеграции, пополняющая в сумме мелкие фракции (менее 1 мм). Распределение этой доли мелких фракций внутри нескольких диапазонов принимается приблизительно равномерным.

*VII этап.* Содержание дочерних фракций в ходе физического выветривания увеличивается в первом приближении линейно с ростом числа  $N$ :

$$\Phi_{Д} = \Phi_{Д0} + BN, \quad (7)$$

где  $\Phi_{Д0}$  — начальное содержание дочерней фракции;  $B$  — коэффициент, определяемый, как следует из рис. 3, по формулам типа (8) и (9). Например, для средних фракций (отдельно для каждой фракции):

$$\lg B = 0,6478 \lg h_1 - 0,1263, \quad (8)$$

для мелких фракций (суммарно для фракций менее 1 мм):

$$\lg B = 0,3527 \lg h_1 - 0,9368, \quad (9)$$

где численные значения  $h_1$  — средняя мощность слоя дезинтеграции породы за один ЦЗО (мм).

Эти формулы получены в диапазоне  $\lg h_1 = -3,7 \dots 0,5$ ; коэффициент корреляции  $R = 0,95$  для формулы (8) и  $R = 0,83$  для формулы (9).

Если мелкие фракции (<1 мм) представлены не одной, а несколькими (например,  $S$ ) диапазонами, то в соответствии с этапом VI они растут с одинаковой скоростью (их графики имеют одинаковый наклон). При этом, естественно, в фор-

Таблица 2. Уменьшение начального содержания наиболее крупных фракций (генератора  $\Phi_0$ ) при морозном выветривании водонасыщенных (льдонасыщенных) горных пород в зависимости от числа циклов замораживания—оттаивания ( $N$ )

Порода	Размер крупной фракции отдельных частей, мм	Значение коэффициента $A$	Уравнение связи $\Phi_N = f(\Phi_0, N)$	Пределы изменения $N$ в эмпирических формулах
Гранит кварцплагноклазовый и микроклиновый	>20	$4 \cdot 10^{-5}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 4 \cdot 10^{-5}N)$	0—2000
Гранит ортоклазплагноклазовый	»	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 1,4 \cdot 10^{-4}N)$	»
Порфир кварцевый трещиноватый	»	$2 \cdot 10^{-3}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 2 \cdot 10^{-3}N)$	»
Песчаники кварцевые и аркозовые	»	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 1,7 \cdot 10^{-3}N)$	»
Известняки мраморизованные	»	$2 \cdot 10^{-3}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 2 \cdot 10^{-3}N)$	»
Деловий филлитовых и углистых сланцев	»	$2 \cdot 10^{-3}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 2 \cdot 10^{-3}N)$	0—150
Песок кварцевый и полевошпатовый, крупнозернистый	>0,5	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 3,2 \cdot 10^{-3}N)$	0—700
Песчаники, алевролиты, глинистые сланцы (цемент, преимущественно кремнистослюдистый, породы метаморфизованные)	>20	$3 \cdot 10^{-3}$	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 3 \cdot 10^{-3}N)$	0—400
Известняк мергельный, известняк доломитизированный	»	$7 \cdot 10^{-2}$	Минимальные значения: $\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 7 \cdot 10^{-2}N)$ *	0—200
		$10^{-2}$	Максимальные значения: $\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 10^{-2}N)$	
Мергель	»	0,18	$\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 0,18N)$	0—5
Алевролит размокающий, низкопрочный (Сев. Кавказ)	»	18,5	Минимальные значения: $\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 18,5N)$ *	0—5
		1,3	Максимальные значения: $\Phi_N = \Phi_0 / (1 + 1,3N)$	0—30

\* Соответствуют наиболее слабым, размокающим разностям указанных пород.

мулу (7) подставляя не коэффициент  $B$ , полученный из (9), а  $B/S$ .

*VIII этап.* Необходимо учитывать, что при любом значении  $N$  суммарное содержание всех фракций:

$$\sum_{i=1}^p \Phi_i = 100 \%, \quad (10)$$

где  $p$  — общее число фракций. Это требование очень важно как критерий справедливости эмпирических уравнений, принятых для описания поведения фракций генератора и дочерних.

*IX этап.* В соответствии с этапом IV, необходимо определить точку  $N_1$ , где суммарное содержание фракций генератора  $\Phi_{Г1} + \Phi_{Г2} + \Phi_{Г3} \approx 20 \%$ . На графике  $D_1$  происходит излом при  $N_1$ , и эта наиболее крупная из дочерних фракций начинает работать как генератор  $\Gamma_4$ .

Другим способом приближенное положение точки  $\Phi_{Г04}$  можно определить так: поскольку в точке  $N_1$  значение  $\sum_1^3 \Phi_{Гi} = 20 \%$ , то сумма всех шести ординат дочерних фракций составит 80 %, из них на три средние приходится около 60 %, а на три мелкие — около 20 %. Поэтому ордината  $\Phi_{Г04}$  приблизительно равна:

$$\Phi_{Г04} \approx \Phi_{Д1} + \frac{(60 - \Phi_{Д1} - \Phi_{Д2} - \Phi_{Д3})}{3}. \quad (11)$$

Ход графика  $\Gamma_4$  описывается уравнением:

$$\Phi_{Г4} = \Phi_{Г04} / \left[ 1 + \frac{A}{\alpha} (N - N_1) \right]. \quad (12)$$

Рекомендуются следующие значения коэффициента  $\alpha$ :

$\alpha = 8$  для сильноразмокающих полускальных пород (мергелей, алевролитов и др.);

$\alpha = 4$  для слаборазмокающих полускальных пород (доломиты, доломитизированные известняки, песчаники с размокающим цементом);

$\alpha = 2$  скальные неразмокающие породы (граниты, гнейсы, диабазы и др.).

Аналогично находим точку  $N_2$ , где содержание генератора снизится до 20 %. При этом график вновь возникшего из дочерней фракции генератора 5 будет описываться следующим уравнением:

$$\Phi_{Г5} = \Phi_{Г05} / \left[ 1 + \frac{A}{\alpha^2} (N - N_2) \right], \quad (13)$$

а для следующего генератора  $\Gamma_6$ :

$$\Phi_{Г6} = \Phi_{Г06} / \left[ 1 + \frac{A}{\alpha^3} (N - N_3) \right]. \quad (14)$$

Следует отметить, что наклон каждого графика генератора, возникающего из дочерней фракции, контролируется (и при необходимости



корректируется) при любом  $N_i$  приведенным выше соотношением (10).

Например, в сечении AA' ордината точки  $A_6$  графика  $\Gamma_5$  равна:

$$AA_6 = 100 \% - AA_1 - AA_2 - AA_3 - AA_4 - AA_5.$$

Передвинув сечение AA' вправо на 1—1,5 см, снова уточняем величину ординаты  $AA_6$  по этому новому сечению. Если еще раз передвинуть вправо сечение AA', то уточнив новое значение  $AA_6$ , по трем точкам проводим прямую, экстраполируем ее влево и тем самым уточняем положение точки  $\Phi_{105}$ , поскольку ее положение мы нашли, определив на оси абсцисс точку  $N_2$ , отвечающую ординате  $\Gamma_4 \approx 20 \%$ , а на самом деле это может быть диапазон  $\Gamma_4 = 15 - 25 \%$ .

Приведенные выше рассуждения показывают, что точку излома графика наиболее крупной (на данный момент процесса дезинтеграции) дочерней фракции можно определить тремя способами, а затем принять среднее значение, что повышает точность оценки в  $\sqrt{3}$  раз.

Отметим, что достаточно общая картина дезинтеграции присуща скальным, полускальным, крупнообломочным и песчаным грунтам. Естественно, что диапазоны фракций генератора, а также средних и мелких дочерних фракций для каждого вида пород свои. Данная методика не распространяется на глинистые грунты, в которых при ТВВ наряду с процессами дезинтеграции имеют место процессы коагуляции и др. [Ершов, 1982; Конищев, 1973; Мазуров, Тихонова, 1964].

Приведенный анализ носит оценочный характер, поскольку комплекс факторов физического выветривания (ФВ) на основе выявленных закономерностей в конечном счете приводится к эквивалентному числу  $N_{\Sigma}$  — числу циклов МРВ, а далее — к зависимости фракционного состава от числа  $N$ .

В дальнейшем по мере накопления экспериментального материала возможно уточнение методики прогноза на основе раздельного учета каждого из выделенных факторов физического выветривания (МРВ, ВУВ, ТВ). В частности, как показывают опыты, характер дезинтеграции пород при ВУВ несколько отличается от такового при МРВ и ТВ. Особенностью дезинтеграции грунтов при ВУВ является относительно меньшее (по сравнению с МРВ и ТВ) содержание средних фракций. В дочерних фракциях при ВУВ зачастую преобладают мелкие, в том числе пылеватые фракции. Характер же дезинтеграции при МРВ и ТВ достаточно сходный; естественно, что скорости изменения фракционного состава при

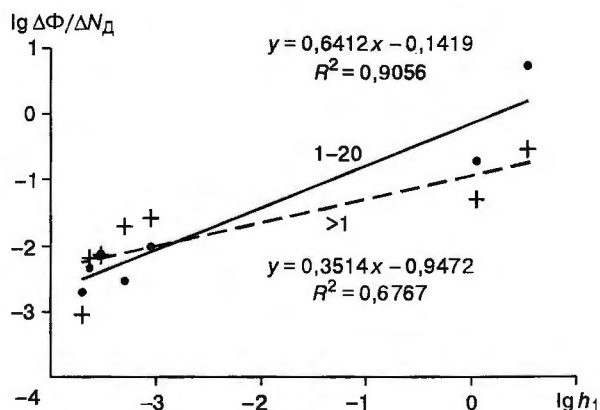


Рис. 3. Экспериментальные данные о скорости роста содержания дочерних фракций ( $\Delta\Phi/\Delta N$ ) образцов горных пород при физическом выветривании.

В поле рисунка указан диаметр частиц, мм.

МРВ много больше таковых при ТВ, что по сути дела учитывается формулами (4) и (5).

Достоверность предлагаемой методики прогнозирования гранулометрического состава крупнообломочных грунтов проверялась путем сравнения значений  $\Phi_{\text{эос}}$  (данных экспресс-оценочного способа) со значениями  $\Phi_3$  (данными эксперимента). При этом абсолютное отклонение оценивалась следующим образом:

$$\Delta_{\text{эос}} = \sum_1^p |\Phi_{\text{эос}} - \Phi_3| / p,$$

где  $p$  — число диапазонов фракций.

Сравнения  $\Phi_{\text{эос}}$  и  $\Phi_3$  выполнены после 150, 250 и 400 ЦЗО. Значения  $\Delta_{\text{эос}}$  составили соответственно 1,4; 1,7 и 2,4 %, т. е. с ростом числа  $N$  отклонение увеличивалось. Это необходимо учитывать при долгосрочном прогнозировании. Основной путь повышения точности прогноза — в разумном сочетании экспериментальной и экспресс-оценочной методик, т. е. в обосновании экспериментом начальной области прогнозирования (например, в диапазоне  $N = 0-100$  ЦЗО), а значит и более точном определении значения  $h_1$  (применительно к конкретному грунту — объекту исследований).

Создано компьютерное приложение „Физическое выветривание“, позволяющее по программе реализовать долгосрочный прогноз дезинтеграции крупнообломочных, скальных и полускальных пород. Основные возможности этого приложения следующие: а) исходные данные (общее количество фракций, их содержание, скорость дезинтеграции, число циклов ТВВ) задаются пользователем и могут записываться в файл и читаться из файла; б) просмотр процесса изме-

нения гранулометрического состава грунтов, представленного в графическом виде; в) экспорт полученных результатов (таблицы и графики) в MS Excel.

Приложение реализовано на Delphi-6 и является 32-разрядной оконной программой для операционных систем Windows. Для взаимодействия с MS Excel используется технология COM — одна из современных моделей обмена данными между клиентом и сервером.

### ПРИМЕР ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Объект исследований — горная масса из подземных выемок участка Усть-Среднеканской ГЭС на р. Колыма. Она состоит из скальных осадочных пород верхоянского комплекса нижней юры ( $J_1^2$ ), метаморфизованных. В качестве исходного гранулометрического состава горной массы был принят вариант, приведенный в табл. 3 и на рис. 4, а. В соответствии со схемами мелкомасштабного районирования территории России [Воронков, Ушакова, 1999], объект исследований характеризуется следующими значениями числа циклов ТВВ на дневной поверхности  $N_0 = 50 \dots 70$  ЦЗО (по схеме крупномасштабного районирования среднее  $N_0 = 57$  ЦЗО);  $n_0 = 10 \text{—} 15$  ЦУВ;  $m_0 = 150 \text{—} 200$  ЦТВ. Данные об  $n_{\text{тех}}$ ,  $n_{\text{ест}}$ ,  $m_{\text{тех}}$  отсутствуют, но на основе опыта предыдущих исследований можно приблизительно полагать, что  $n_{\text{тех}} \approx n_{\text{ест}} \approx 0,1n_0$ ;  $m_{\text{тех}} \approx 0,1m_0$ ; срок прогноза принимаем — 150 лет. В этом случае в соответствии с (4) получаем оценку  $N_{\Sigma} \approx 6500$  ЦЗО. Следует отметить, что если рассматривать ТВВ на глубине 20 см, то здесь  $N_{\Sigma} \approx 2000$  ЦЗО.

В качестве исходных фракций генератора выступают четыре наиболее крупные диапазона (от 100 до 20 мм), в сумме составляющие 50,5 %. Эти фракции изменяют свой состав по закону (см. табл. 2):

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{\Phi_{\Gamma 0}}{(1 + 3 \cdot 10^{-3}N)} \quad (15)$$

Содержание дочерних фракций среднего размера (5—10, 2—5, 1—2 мм) растет линейно:

$$\Phi_{\text{д}} = \Phi_{\text{до}} + 8,5 \cdot 10^{-3}N_{\Sigma} \quad (16)$$

Коэффициент  $B = 8,5 \cdot 10^{-3}$  получен по формуле (8) при  $\bar{h}_1 = 10^{-3}$  мм (см. табл. 1).

Для мелких (менее 1 мм) дочерних фракций в соответствии с формулой (9) суммарный коэффициент  $B = 10^{-2}$ , а поскольку этих фракций в данном случае четыре, то содержание каждой из мелких фракций растет линейно следующим образом:

$$\Phi_{\text{д}} = \Phi_{\text{до}} + 2,5 \cdot 10^{-3}N_{\Sigma} \quad (17)$$

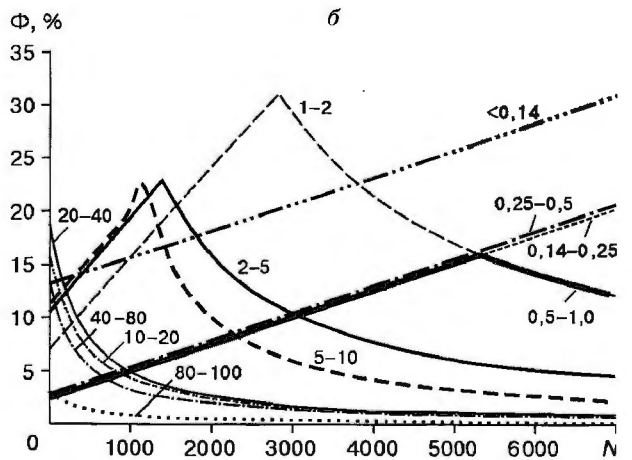
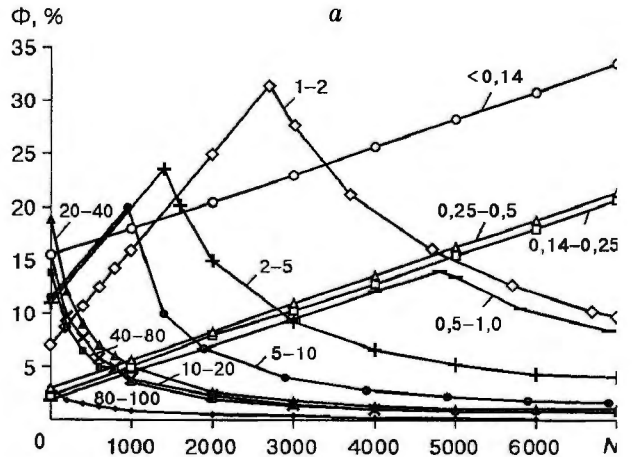


Рис. 4. Пример долгосрочного (более 150 лет) прогнозирования изменения гранулометрического состава горной массы (песчаники, сланцы) на дневной поверхности под воздействием комплекса температурно-влажностных условий (МРВ, ВУВ, ТВ).

Обработка выполнена: а — вручную, б — по компьютерной программе „Физическое выветривание“. В поле рисунка указан диаметр частиц, мм.

Излом графика наиболее крупной дочерней фракции (5—10 мм) можно ожидать, начиная с  $N_{\Sigma} = 600$ , где суммарное содержание фракций генератора снизилось до 20 %. Однако руководствуясь условием (10), находим, что лишь при  $N_{\Sigma} = 900$  наиболее вероятен переход этой дочерней фракции во фракцию генератора. Начальную часть этого генератора (при  $N_{\Sigma} = 1000 \text{—} 1400$ ) определяем на основе условия (10), а зная ее, уточняем величину коэффициента  $A/\alpha = 0,002$ , а значит уравнение этого генератора следующее:

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{900}{1 + 0,002(N_{\Sigma} - 900)} \quad (18)$$

Таблица 3. Исходный и прогнозируемые гранулометрические составы горной массы из полезных выемок участка Усть-Среднеканской ГЭС

Состав, %	Размеры частиц, мм										
	80—100	40—80	20—30	10—20	5—10	2—5	1—2	0,5—1,0	0,25—0,5	0,14—0,25	<0,14
Исходный	3,0	13,0	19,0	15,5	11,5	10,7	7,0	2,3	2,7	2,3	13,0
На поверхности после 150 лет	0,1	0,6	0,9	0,8	1,7	4,2	10,5	9,1	20,2	19,6	32,3
На глубине 20 см после 150 лет	0,4	1,5	2,2	1,8	4,9	11,6	29,5	8,3	9,5	8,8	21,5

Аналогично определяем точку излома дочерней фракции 2—5 мм (при  $N_z = 1400$ ) и уравнение возникшего генератора:

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{1400}{1 + 0,001(N_z - 1400)} \quad (19)$$

Фракция 1—2 мм превращается в генератор при  $N_z = 2700$ , уравнение которого:

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{2700}{1 + 0,0005(N_z - 2700)} \quad (20)$$

При  $N_z = 4800$  наиболее крупная из мелких дочерних фракций также превращается в генератор, который описывается уравнением:

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{4800}{1 + 0,0003(N_z - 4800)} \quad (21)$$

Таким образом, после 150 лет эксплуатации гидроузла, как следует из рис. 4, горная масса на дневной поверхности (и вообще в приповерхностном слое) претерпевает существенные изменения гранулометрического состава, что видно и по данным, приведенным в табл. 3.

Пример долгосрочного прогнозирования изменения гранулометрического состава этой же горной массы, выполненного по компьютерной программе „Физическое выветривание“, приведен на рис. 4, б.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика долгосрочного прогноза изменения гранулометрического состава крупнообломочных грунтов, подверженных воздействию комплекса природных и техногенных факторов физического выветривания (морозного, температурного, увлажнения—высушивания), позволяет с достаточной для практических целей точностью количественно оценить дезинтегра-

цию грунтов во времени (десятки, сотни лет и более). Такие оценки необходимы для определения возможных изменений характеристик физико-механических и фильтрационных свойств оснований и грунтовых сооружений в целом (плотин, дамб, насыпей), при эксплуатации горно-технических объектов, а также для решения вопросов инженерной геодинамики и геоморфологии. Реализовать методику возможно как с помощью компьютерной программы, так и без нее. Предлагаются возможные пути совершенствования методики.

### Литература

Воронков О.К., Ушакова Л.Ф. Закономерности дезинтеграции скальных и крупнообломочных пород под воздействием физического выветривания // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева / Сб. науч. тр., 1996, т. 231, с. 25—45.

Воронков О.К., Ушакова Л.Ф. Климатологическое обоснование методики моделирования физического выветривания горных пород // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева / Сб. науч. тр., 1999, т. 235, с. 10—17.

Ершов Э.Д. Криолитогенез. М., Недра, 1982.

Конищев В.Н. Криогенное выветривание // II междунар. конф. по мерзлотоведению: Докл. и сообщ. Вып. 3. Якутск, 1973, с. 38—45.

Мазуров Г.П., Тихонова Е.С. Преобразование состава и свойств грунтов при многократном замораживании // Вестн. ЛГУ. Сер. геол. и геогр., 1964, вып. 3, № 18, с. 35—44.

Рекомендации по изучению влияния морозного выветривания на состояние и механические свойства скальных пород. П 39-88/ ВНИИГ. Л., 1989, 68 с.

Шестернев Д.М. Научно-методические основы оценки воздействия криогенного выветривания на физико-механические свойства массивов горных пород: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Чита, 2000, 42 с.

Nagai M., Aoki S., Ban K. Long-term durability of riprap materials for rockfill dams // Dix-septieme Congres des Grands Barrages Vienne, 1991, p. 321—338.

Svantesson I. Preliminary results from experimental weathering studies. Fennia, 1985, vol. 163, No. 2, p. 303—307.

Wiman S. A preliminary study of experimental frost weathering // Geogr. Ann., 1963, vol. 45, No. 2—3, p. 113—121.

Поступила в редакцию  
12 мая 2002 г.