

УДК 624.131

ГИРИНА О. А.

### ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ШЛАКОВ ТОЛБАЧИНСКОГО ДОЛА И ИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ХОДЕ ПОСТВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вулкан Толбачик — один из наиболее активных действующих вулканов — принадлежит Ключевской группе вулканов и располагается в центральной части п-ова Камчатка. Состоит он из двух слившихся вулканов — Острога и Плоского Толбачиков, первый из которых потухший, второй — действующий. Ареальная зона вулканизма — Толбачинский дол — представляет собой холмистую шлако-лавовую равнину, на которой располагается более 100 шлаковых и шлако-лавовых конусов, приуроченных в основном к осевой части зоны и фиксирующих собой глубинные разломы северо-северо-восточного простирания.

Настоящая работа посвящена изучению шлакового материала извержения 1975—1976 гг. Ход этого извержения описан во многих работах [6—8]. Во время извержения возникли 8 шлако-лавовых конусов высотой до 300 м и пирокластический чехол, мощность которого в зависимости от расстояния от центра извержения менялась от 16—18 м до нескольких сантиметров. Извержение продолжалось 1,5 года, и за это время было извергнуто более 2 км<sup>3</sup> вулканических продуктов общим весом 2,7 · 10<sup>9</sup> т. Объем пирокластического материала на Северном прорыве составил 0,069 км<sup>3</sup>, на Южном — 0,024 км<sup>3</sup> [1].

Пирокластический материал извержения 1975—1976 гг. представлен обломками застывших лав, вулканическими бомбами разной величины и формы, шлаками и пеплами. Бомбами принято называть образования размером более 50 мм, шлаками — пористые лапилли основного состава размером 2—10 мм, пеплами — породы, состоящие из частиц размером менее 2 мм [3]. Обломочный материал формирует конусы; в зависимости от направления, силы ветра при выпадении его из эруптивных туч, он покрывает сплошным ковром различной мощности значительную часть прилежащих окрестностей. Гравитационная дифференциация материала выражается в том, что наиболее крупный материал откладывается у подножия конусов, более тонкий — распространяется на значительные расстояния. Чехол обломочного материала, сформировавшийся в результате извержения, имеет слоистое строение, что говорит о неоднородности эруптивного процесса на базальтовых вулканах. Мощность слоев пеплов и шлаков не превышает 1 м.

Все твердые вулканические продукты извержения по составу отвечают базальтам. Однако базальты Северного и Южного прорывов резко различаются. Вулканиды Северного прорыва представлены магнезиальными базальтами умеренной щелочности, Южного — глиноземистыми субщелочными базальтами [1].

После окончания извержения интенсивное развитие на конусах прорывов и пирокластических чехлах лавовых потоков получили поствулканические процессы: процессы перерождения шлаков и пеплов, образования агглютинатов, рудообразования под воздействием металлоносных магматических газов.

Для постэруптивного процесса на Северном прорыве с повышенной дегазацией по магмоводу магматических газов, изначально обогащенных галоидами, наиболее характерны галоидный метасоматоз и медное эксгалационное рудообразование. Для поствулканического процесса на Южном прорыве с менее интенсивной дегазацией по магмоводу магматических газов, обогащенных серными газами, более характерно сернокислотное изменение вулканитов; фторметасоматоз и медная минерализация резко подавлены [5].

Наиболее активно поствулканические процессы развиваются в привершинных концентрических трещинах оседания конусов, на перемычке между I и II конусами. В процессе поствулканической деятельности приповерхностный слой шлаков спекается и образуются агглютинаты. Шлаки в этой зоне наиболее преобразованы. Под коркой агглютинатов залегают рыхлые измененные шлаки.

**«Первичные шлаки».** Гранулометрический состав шлаков Северного и Южного прорывов представлен на рис. 1. Шлаки прорывов по классификации крупнообломочных и песчаных грунтов (по СНиП II-15-74) относятся к дресвяным грунтам.

В составе их преобладают частицы размером 10—3 мм. На Южном прорыве количество частиц диаметром менее 0,5 мм почти в 2 раза превышает таковое на Северном прорыве. Шлаки Южного прорыва — ажурные, ломкие — легко разрушаются под влиянием внешних воздействий, что приводит к увеличению тонких фракций.

Шлаки Северного прорыва сложены преимущественно вулканическим стеклом с единичными вкраплениями зерен оливина, пироксена и плагиоклаза (не более 20—30% объема породы). Частицы шлаков остроугольные, пористые, иногда

оплавленные по краям. Пористость шлаков Северного прорыва складывается из открытой и закрытой. Наряду с преобладанием шаро- и эллипсообразных пор (рис. 2, а) наблюдаются поры с зазубренными краями (рис. 2, б). Размеры пор изученных образцов шлаков достигают 150 мкм.

Шлаки Южного прорыва также сложены вулканическим стеклом, но различия в составе базальтов прорывов, в ходе извержения и т. д. накладывают свой отпечаток на характер его пирокластического материала. Шлаки Южного прорыва ажурные, сильнопористые, с удлиненной формой частиц. В них наблюдается значительное количество кристаллов плагиоклаза размером до 2—3, иногда 4—5 см, часто в виде сростков. Шлаки Южного прорыва имеют сотовую структуру, обусловленную высокой пористостью [2]. Наиболее крупные поры изученных образцов имеют размеры до 0,5 мм; толщина пленок, разделяющих поры, меняется от 0,5 до 4 мкм.

Влажность шлаков на прорывах меняется от 1% в приповерхностных слоях до 23% на глубине 1,5 м на границе с мерзлыми отложениями. Плотности твердой фазы шлаков Северного и Южного прорывов различаются и составляют 2,96—2,97 и 2,58 г/см<sup>3</sup> соответственно, что объясняется разным составом базальтов прорывов.

Различаясь по составу, форме частиц, шлаки прорывов создают от-

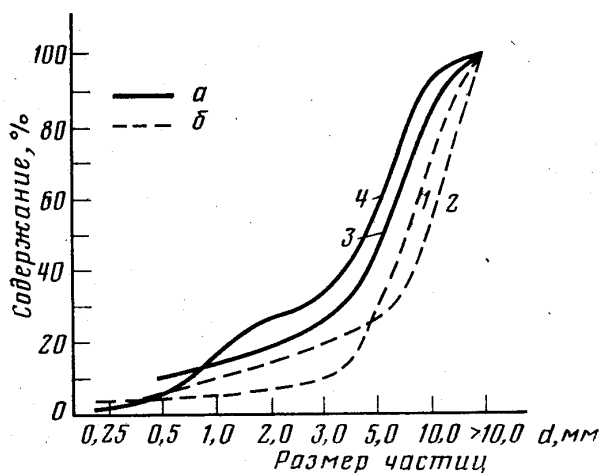


Рис. 1. Кумулятивные кривые шлаков Северного (1, 4) и Южного (2, 3) прорывов Толбачинского дола: а — «первичные» шлаки; б — «измененные» шлаки

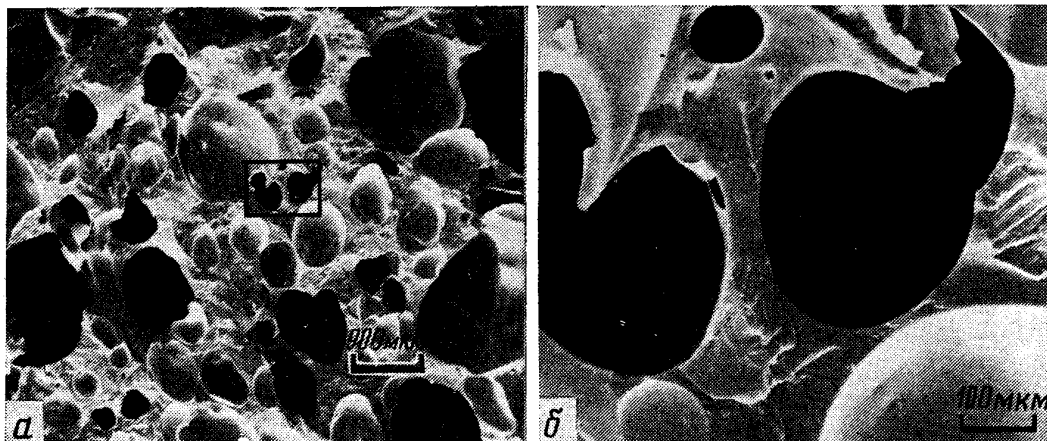


Рис. 2. Микрофотографии поверхности скола «первичного» шлака Северного прорыва извержения 1975—1976 гг.: а — общий вид поверхности; б — характер пор

ложения разной плотности. Шлаки Северного прорыва, обладая более жесткой структурой частиц и большей плотностью твердой компоненты, имеют плотность грунта в пределах  $0,62—1,16 \text{ г/см}^3$ ; шлаки Южного прорыва —  $0,55—0,58 \text{ г/см}^3$  (табл. 1). Высокую недоуплотненность отложений шлаков отмечал Б. П. Маркин [4], который выделил несколько причин такого сложения: 1) специфика формирования толщ (выпадение мелких остроугольных частиц из эруптивных туч в условиях луговых пространств) определила опережающий рост сил сцепления по отношению к уплотнению; 2) незначительный возраст толщ; 3) наложение макропористости от корневых систем; 4) предположение наличия в шлаках нескольких типов структурных связей — электростатических и магнитных, капиллярных и др., которые способствуют недоуплотненности отложений шлаков. Вышеуказанные причины макро- и микропористость шлаков обуславливают их высокую пористость (64—79% у шлаков Северного прорыва и 80% у Южного).

Размеры, форма частиц шлаков, текстурные особенности оказывают главное влияние на своеобразие их деформационных и прочностных свойств. Сжимаемость шлаков Северного и Южного прорывов резко различается (рис. 3). Коэффициенты сжимаемости шлаков Северного прорыва в среднем равны  $0,03—0,07 \text{ МПа}^{-1}$ , Южного прорыва —  $0,17—0,29 \text{ МПа}^{-1}$ . Модуль общей деформации шлаков Северного прорыва в 4—5 раз больше модуля общей деформации шлаков Южного прорыва (5—11 и  $1,5—2,5 \text{ МПа}$  соответственно). Шлаки Южного прорыва, имея ажурную структуру и рыхлое сложение, под нагрузкой разрушаются и уплотняются, изменяя коэффициент пористости на величину 1—1,2 при начальном коэффициенте пористости 3,7. Шлаки же Северного прорыва, имея более жесткую структуру частиц, уплотняются существенно меньше.

Для шлаков прорывов наиболее характерно сцепление механической природы — зацепление. Для шлаков Северного прорыва оно изменяется в пределах от 0 до  $0,11 \text{ МПа}$ , для шлаков Южного прорыва равно 0 (рис. 4). Углы внутреннего трения шлаков равны  $23—55$  и  $30^\circ$  соответственно. Снижение сцепления до нуля связано, вероятно, со степенью окатанности частиц шлаков, уплотненностью грунтов и т. д. Углы внутреннего трения повышаются с увеличением шероховатости поверхности частиц шлаков.

**«Измененные» шлаки.** Эти шлаки по классификации крупнообломочных и песчаных грунтов (по СНиП II-15-74) также относятся к дресвяным грунтам. В составе их преобладают частицы размером крупнее 3 мм (см. рис. 1).

«Измененные» шлаки представляют собой обломки вулканического

стекла, подвергшиеся различной степени преобразования. В осевой зоне прорыва (на перемычке между конусами I и II), на площадках конусов, расположенных на этой линии, шлаки значительно преобразованы — до красных, оранжевых, зеленоватых, желтых, голубых окрасок частиц. Острых, колющих выступов на них нет, выступы сглажены, местами оплавлены. Здесь вулканические процессы протекают наиболее интенсивно. На других участках конусов наблюдается большая округленность частиц шлаков, меньшая интенсивность их окрасок, иногда на черных шлаках различные соли откладываются лишь в виде корочек. Различная округленность частиц связана, вероятно, с интенсивностью поствулканических процессов. В осевой зоне скорость преобразования шлаков высокая, поэтому острые углы у частиц не успевают быстро разрушаться, а лишь оплавляются. На других участках конусов процессы изменения шлаков идут медленнее — острые края шлаков постепенно разрушаются и частицы приобретают более округлую форму.

Различия в составе «первичных» шлаков Северного и Южного прорывов, динамике их извержений и поствулканических процессов накладывают отпечаток на преобразование шлаков Южного прорыва. Ажурные шлаки «перерождены» полностью (высокая пористость способствует проникновению в них магматических газов); обломки лав, слабопористые разновидности шлаков Южного прорыва часто имеют лишь внешнюю зону изменения частиц, не захватывающую частицы полностью.

«Измененные» шлаки Северного прорыва имеют обработанную, «изъеденную» поверхность (рис. 5, а). Выступы, зазубренные края их сглажены, поры в разной степени заполнены новообразованиями — возгонами и рудными минералами (рис. 5, б, в). Степень заполнения пор зависит от их размера: мелкие поры (размером до  $7 \times 10$  мкм) залечены почти полностью, крупные — значительно меньше.

Так как шлаки находятся в зоне развития поствулканических процессов, где господствуют высокотемпературные магматические газы, влажность их незначительна — не превышает 5—6%.

Таблица 1

Физико-механические свойства шлаков Толбачинского дола

Тип шлаков	Район	Плотность грунта *, г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости	Пористость, %	Модуль общей деформации, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
«Первичные»	Северный прорыв	$\frac{0,90(16)}{0,62-1,16}$	$\frac{0,80(16)}{0,62-1,04}$	$\frac{2,80(16)}{1,78-3,77}$	$\frac{73(16)}{64-79}$	$\frac{7,0(16)}{5,0-11,0}$	$\frac{0,06(16)}{0-0,11}$	$\frac{36(16)}{23-55}$
	Южный »	$\frac{0,57(2)}{0,55-0,58}$	$\frac{0,51(2)}{0,49-0,52}$	$\frac{3,71(2)}{3,96-3,45}$	80(2)	$\frac{2,0(2)}{1,5-2,5}$	0	30
«Измененные»	Северный прорыв	$\frac{0,96(12)}{0,78-1,54}$		$\frac{1,82(7)}{1,36-2,54}$	$\frac{64(7)}{58-68}$	$\frac{6,0(6)}{4,5-7,0}$	$\frac{0,07(8)}{0,01-0,19}$	$\frac{33(8)}{22-45}$
	Южный »	$\frac{1,20(3)}{1,01-1,31}$		$\frac{0,75(3)}{0,58-1,07}$	$\frac{52(3)}{37-52}$	$\frac{1,8(2)}{1,6-2,0}$	$\frac{0,04(2)}{0,03-0,05}$	22(2)

\* Здесь и далее в числителе дробы — среднее значение и в скобках — количество образцов; в знаменателе — минимальное и максимальное значения. То же для табл. 2.

Плотность твердой компоненты шлаков Северного прорыва равна 2,62—2,89 г/см<sup>3</sup>, Южного — 2,74 г/см<sup>3</sup>, что отвечает преобразованию их породообразующих минералов и появлению новых с меньшей плотностью твердой фазы.

Различная степень преобразования шлаков, заполнение их пор новообразованиями оказывают влияние на плотность шлаковых грунтов прорывов: на Северном прорыве она меняется от 0,78 до 1,54 г/см<sup>3</sup>, на Южном — от 1,0 до 1,31 г/см<sup>3</sup> (см. табл. 1), хотя в среднем плотность шлаков на Южном прорыве (1,20 г/см<sup>3</sup>) выше, чем на Северном (0,96 г/см<sup>3</sup>). Ажурные шлаки легче преобразуются, их поры легче заполняются новыми минералами. Эти же факторы определяют изменение пористости преобразованных шлаков, значения которых варьируют от 58 до 68% на Северном и от 37 до 52% на Южном прорывах.

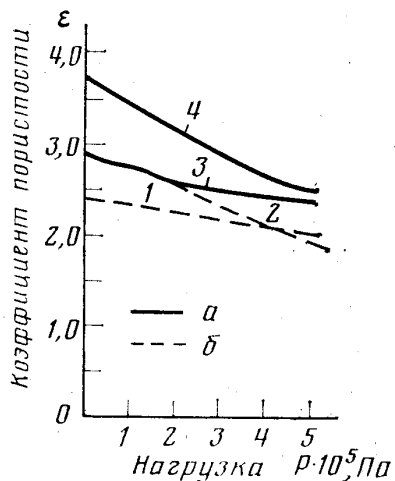


Рис. 3

Рис. 3. Компрессионные кривые шлаков Северного (1, 3) и Южного (2, 4) прорывов Толбачинского дола: а — «первичные» шлаки; б — «измененные» шлаки

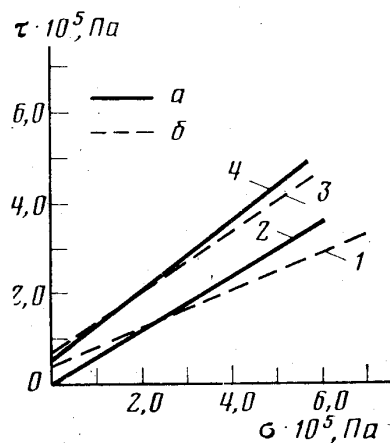


Рис. 4

Рис. 4. Сопротивление сдвигу шлаков Северного (3, 4) и Южного (1, 2) прорывов Толбачинского дола: а — «первичные» шлаки; б — «измененные» шлаки

Как и у «первичных», деформационные и прочностные свойства «измененных» шлаков во многом определяются их структурно-текстурными особенностями. Характер сжимаемости «первичных» и «измененных» шлаков прорывов сходен (см. рис. 3). Различия сжимаемости «измененных» шлаков прорывов связаны примерно с теми же факторами, что и у «первичных». Коэффициенты сжимаемости шлаков Северного прорыва равны 0,04—0,07 МПа<sup>-1</sup>, Южного — 0,15—0,20 МПа<sup>-1</sup>, модули общей деформации их равны 4,5—7,0 и 1,6—2,0 МПа соответственно.

Прочностные характеристики «измененных» шлаков отличаются от «первичных». Сцепление повышается от 0,01—0,19 МПа у шлаков Северного прорыва и до 0,03—0,05 МПа у Южного; угол внутреннего трения несколько уменьшается — до 22—45° на Северном и 22° на Южном прорывах (см. рис. 4). Помимо сцепления — зацепления здесь под влиянием магматических газов, преобразующих шлаки и дающих начало росту новых минералов, возникают, вероятно, новые виды связи физико-химической природы между частицами, которые и обуславливают вариации значений физико-механических свойств «измененных» шлаков. Виды связи и степень влияния их на свойства «измененных» шлаков пока не выяснились.

Кроме процессов «перерождения» шлаков под влиянием высокотемпературных магматических газов происходит их спекание — образование агглютинатов. Агглютинаты (или псевдоагглютинаты) представляют со-

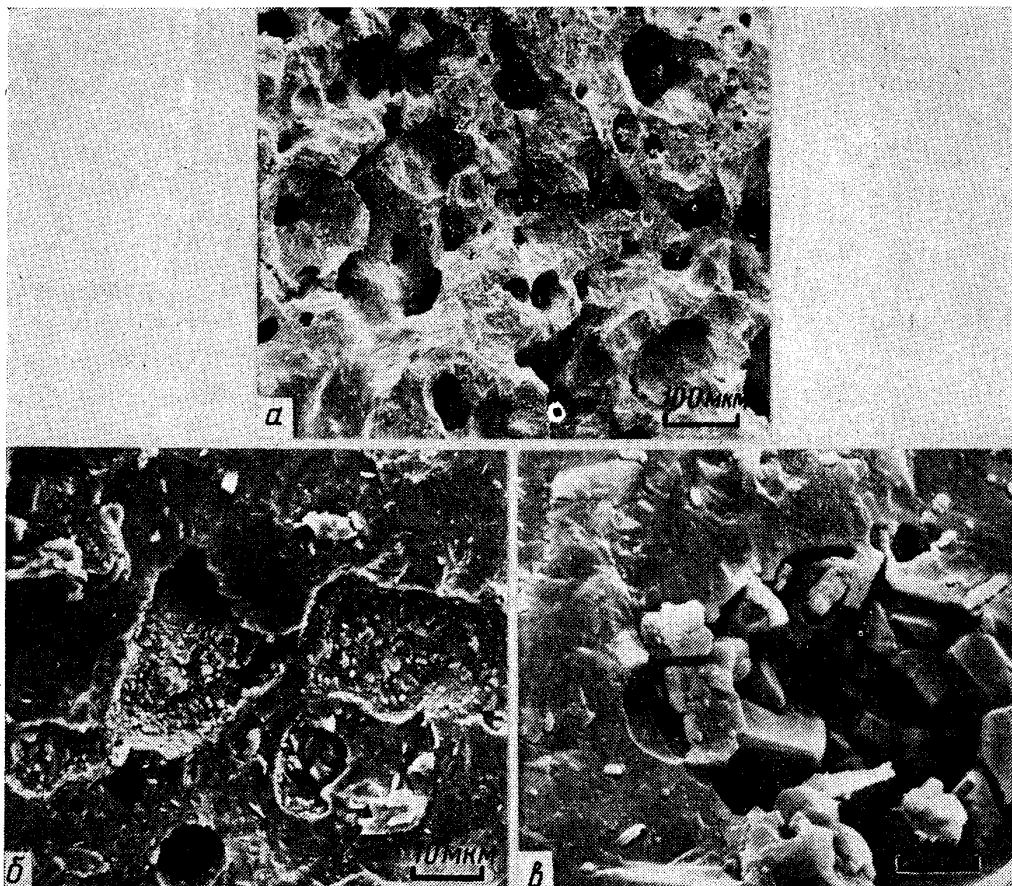


Рис. 5. Микрофотографии поверхности скола «измененных» шлаков Северного прорыва извержения 1975—1976 гг.: *a* — внешний вид поверхности; *б* — детали микростроения; *в* — новообразования в поре

бой спекшуюся породу, состоящую из недеформированных обломков шлаков [3].

Плотности твердой фазы спеченных шлаков прорывов довольно близки между собой, но отличаются от соответствующих показателей измененных рыхлых шлаков прорывов ( $2,62$ — $2,79$  г/см<sup>3</sup> на Северном и  $2,61$ — $2,68$  г/см<sup>3</sup> на Южном), что связано, вероятно, с большей преобразованием спеченных шлаков.

Плотность агглютинатов по сравнению с «измененными» и «первичными» шлаками прорывов увеличивается ( $1,28$ — $1,37$  г/см<sup>3</sup> на Северном и  $1,36$ — $1,90$  г/см<sup>3</sup> на Южном прорывах) (табл. 2). Шлаки Южного прорыва создают более плотную упаковку частиц при спекании, макропоры между ними заполняются новообразованиями. Пористость агглютинатов уменьшается до  $48$ — $54\%$  на Северном прорыве и до  $29$ — $49\%$  на Южном. При спекании шлаков резко увеличивается их прочность. Ее величина на разрыв достаточно высока:  $0,08$ — $12$  МПа на Северном и  $17$ — $30$  МПа на Южном прорывах. Структурные связи в агглютинатах химической

Таблица 2

Свойства агглютинатов Толбачинского дола

Район	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости	Пористость, %	Прочность на разрыв, МПа
Северный прорыв	1,32 (3)	1,25 (3)	51 (3)	3,0 (3)
	1,28—1,37	0,91—1,18	48—54	0,08—12,0
Южный прорыв	1,53 (4)	0,70 (4)	41 (4)	23 (2)
	1,37—1,90	0,41—0,79	29—49	17—30

природы, но непродолжительность поствулканических процессов (8 лет), совместное действие высокотемпературных магматических газов снизу и атмосферных осадков сверху не позволяют частицам шлаков прочно цементироваться. Обломки лав и слабопористые шлаки Южного прорыва спекаются, но преобразуются только с поверхности. Это повышает прочность данной разновидности агглютинатов Южного прорыва. Прочность агглютинатов, созданных ажурными шлаками, измерить не удалось.

Таким образом, в процессе поствулканического преобразования шлаков Толбачинского дола происходят следующие явления: 1) чистая поверхность шлаков превращается в «изъеденную», 2) появляются разнообразные окраски частиц — от красных до синих; 3) появляются новые типы связи физико-химической природы между частицами шлаков; 4) широко развиваются процессы заполнения пор частиц новообразованиями — возгонами и рудными минералами; 5) в результате постепенного разрушения острых краев шлаков частицы их приобретают вид окатанных. Все это приводит к изменению физико-механических свойств преобразованных шлаков, которое выражается в следующем: 1) повышается плотность грунтов; 2) снижается пористость образцов; 3) увеличиваются прочности образцов шлаков (сцепление рыхлых шлаков и прочности на разрыв агглютинатов).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Будников В. А., Малеев Е. Ф., Овсянников А. А. Сравнительная характеристика пеплов Северного и Южного прорывов БТТИ 1975—76 гг.— Бюл. вулканол. ст., 1979, № 56, с. 131—141.
2. Ковалев Г. Н., Слезин Ю. Б. Динамика дегазации магмы при извержении Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—76 гг.— Бюл. вулканол. ст. 1979, № 56, с. 15—24.
3. Малеев Е. Ф. Вулканыты. М.: Недра, 1980. 240 с.
4. Маркин Б. П. Просадки в пепловых толщах Камчатки.— Инж. геол., 1980, № 1, с. 61—75.
5. Набоко С. И., Главатских С. Ф. Постэруптивный метасоматоз и рудообразование. М.: Наука, 1983. 165 с.
6. Федотов С. А., Ковалев Г. Н., Мархинин Е. К. и др. Хронология и особенности Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—76 гг.— В сб.: Геологические и геофизические данные о БТТИ. М.: Недра, 1978, с. 11—22.
7. Федотов С. А., Чирков А. М. и др. Краткое описание трещинного Толбачинского извержения в 1975 году.— Бюл. вулканол. ст., 1978, № 53, с. 3—12.
8. Хренов А. П. Динамика извержений и процессы кристаллизации магм. М.: Наука, 1982, 130 с.

Институт вулканологии  
ДВНЦ АН СССР

Поступила в редакцию  
3.X.1984