

УДК 551.3.053, 551.435

А.Л. Гуринов¹, А.А. Лукашов², В.В. Рогов³**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ (ВЫВЕТРИВАНИЯ) ГРАНИТОВ ЗАБАЙКАЛЬЯ**

Выветривание — первый и важнейший этап в системе геоморфологических процессов. Интенсивность разрушения коренных горных пород в горах Северного и Юго-Восточного Забайкалья очень велика, что непосредственно влияет на все компоненты ландшафта. Ранее предполагалось, что суровые климатические условия Забайкалья определяют полное превосходство процессов физического выветривания. В ходе детального изучения образцов выветрелых гранитов при помощи растрового электронного микроскопа установлено, что разрушение горных пород протекает при взаимодействии комплекса факторов. Образование первичных трещин в породе при выветривании по типу сапролитизации происходит вследствие криогенного дробления кварца — наименее устойчивого в мерзлотных обстановках минерала. Дальнейшее выветривание идет при активном участии химического и биогенного факторов.

Ключевые слова: Забайкалье, выветривание, сапролитизация, гранит, микроморфология, криогенное дробление, кварц, полевые шпаты.

Введение. В последнее время в науках о Земле прогрессирует дифференциация разномасштабности исследований. В географических исследованиях стали широко использовать космические снимки, позволяющие охватить огромные территории, но разработка новых методик и оборудования позволила изучать микро- и нанообъекты географической среды. В геоморфологии подобные исследования связаны с изучением морфологии и состава первичных и вторичных минералов, слагающих скальные породы и рыхлые отложения, в том числе новообразования и включения. В статье рассмотрены особенности выветривания гранитов Северного и Юго-Восточного Забайкалья, изучавшиеся в ходе полевых работ и в лабораторных условиях при помощи растрового электронного микроскопа LEO 1450.

Выветривание — первый этап в системе геоморфологических процессов, отвечающий за мобилизацию материала [21]. Под выветриванием следует понимать комплекс процессов — дезинтеграцию, метаморфзм, замещение и т.п. [11].

Наиболее полную характеристику процессов выветривания для Забайкалья изложил Ю.Г. Симонов в монографии [11]. В рамках предложенной им классификации описаны как механизмы разрушения, так и типы выветривания, а именно фрактолитизация, сапролитизация, псаммитизация, алевритизация и пелитизация. В связи со сложностью разделения вклада физического и химического выветривания в общий процесс авторы склоняются к использованию именно классификации, построенной по морфологическому принципу и предложенной Ю.Г. Симоновым.

В формировании рыхлых отложений в Забайкалье в пределах зоны развития коры выветривания активно действуют два комплекса процессов — фрактолитизации и сапролитизации коренных пород. Особенностям процессов сапролитизации, в ходе которой происходит образование обломков фракции дресвы и мелкого щебня, и посвящена статья.

Термин “сапролит” введен в русскоязычную научную литературу известным мерзлотоведом С.П. Качуриным (в переводе с латыни сапролит — гнилой камень). Возникновение сапролитов, по мнению С.П. Качурина [3], связано с тем, что первоначально монолитная плотная кристаллическая горная порода постепенно под воздействием попеременного замерзания и оттаивания превращается в рыхлую субстанцию. Отличительная особенность сапролита — полное сохранение структурных и текстурных особенностей исходной породы: слоистости, полосчатости, видимых включений и т.д., но лишь до того момента, пока порода находится на некоторой глубине от дневной поверхности и еще не подверглась нарушению извне. При механическом воздействии на такую породу (даже при прикосновении) она теряет все видимые качества, свойственные кристаллической структуре пород, и становится совершенно рыхлой, выветрелой, по механическому составу чаще всего представляющей не только дресву или песок, но и пылеватые суглинок или супесь. С.П. Качурин не вкладывал в понятие “сапролит” детерминированный механический состав обломков, он акцентировал внимание на структуре, текстуре и прочности породы. Ю.Г. Симонов [11] в развитие взглядов С.П. Качурина определил основную размер-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; *e-mail:* gurinov.artem@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* smoluk@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* rogovvic@mail.ru

ность частей сапролита фракцией дресвы, не исключив участия в сапролитизированной массе более тонких частиц, в том числе глинистых.

В современной англоязычной научной литературе [18, 22] в понятие “сапролит” вкладывается “стратиграфический” смысл: сапролит представляет собой верхнюю часть коры выветривания *in situ*, это несмещенный слой выветрелых коренных пород, залегающий поверх разборной скалы. От последней сапролит отличается более высокой степенью дезинтеграции материала, однако в этот термин не вкладывается понятие о размерности обломков, входящих в его состав. Ближе к русскоязычному термину “сапролитизация”, возможно, англоязычные термины “granular disintegration” (разрушение до фракции дресвы), “grus weathering”, “grusification” (выветривание до фракции дресвы) [20].

Авторы вслед за Ю.Г. Симоновым придерживаются типизации продуктов разрушения горных пород, основанной на анализе их механического состава. Такой подход обусловлен в первую очередь тем, что гранулометрия новообразованного материала играет весомую роль в дальнейшем развитии процессов морфолито-генеза. Еще В.Л. Суходровский [13] отмечал, что в склоновых процессах в области вечной мерзлоты бывает задействован различный по крупности материал продуктов выветривания. Не менее важно и то, что гранулометрический подход позволяет определить долю тех или иных составляющих процесса выветривания.

Постановка проблемы. Исследование посвящено уточнению механизмов выветривания полнокристаллических пород в резкоконтинентальной горно-мерзлотной обстановке на примере Забайкалья. Авторы изучали морфологию и взаимное размещение составляющих граниты минералов (кварца, полевых шпатов, слюды и др.) в полуразрушенном (выветрелом) состоянии; выясняли роль криогенного разрушения кварца в ходе выветривания кристаллических горных пород; на макро- и микроморфологическом уровне определяли соотношения физических (включая биофизические) и химических (включая биохимические) процессов разрушения пород.

Материалы и методы исследований. При обработке собранного материала использованы опубликованные ранее материалы: во-первых, работы, посвященные особенностям процессов выветривания, их роли в рельефообразовании, среди них обобщающие монографии В.Н. Конищева [4], В.Л. Суходровского [14] и А.Г. Черняховского [15]; во-вторых, региональные работы, в которых наиболее комплексно охарактеризовано Забайкалье с точки зрения геологии и геоморфологии [1, 8]; в-третьих, труды, написанные по результатам экспериментальных работ с веществом, подвергавшимся многократному промораживанию и оттаиванию [5, 10].

В 2010 г. с поверхности скальных выходов авторы проводили отбор образцов гранитов, в разной степени подвергшихся выветриванию, для изучения сапролитизации в обрамлении Чарской котловины — на Ко-

даре и Удокане (рис. 1). Эти районы Забайкалья выбраны в связи с тем, что в них широко экспонированы разновозрастные крупнокристаллические граниты; сапролитизация приводит к развитию относительно мощных (несколько дециметров — несколько метров) кор выветривания; снос продуктов выветривания существенно воздействует на морфолито-генез (в классической триаде выветривание — склоновый снос — процессы в нижнем ярусе рельефа [12]).

Коренные породы на выпуклых перегибах скальной основы часто находятся в полуразрушенном состоянии. Поэтому при опробовании выбирали фрагменты, которые сохраняли строение, близкое к монолитному, но уже испытали заметное экзогенное воздействие. При этом учитывалась геолого-геоморфологическая обстановка ареалов сапролитизации [6, 7, 9]. Для уточнения механизмов выветривания в лабораторных условиях выполнен морфологический и минералогический анализ 12 образцов, в том числе 3 образцов с привлечением электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп LEO-1450, микрофотографии сделаны В.В. Роговым).

Результаты исследований и их обсуждение. Важнейшая морфологическая особенность кодарских образцов (рис. 1) — почти регулярная трещиноватость, параллельная дневной поверхности. Во многих образцах на глубине 0,4; 0,7; 1,5 и 3—3,5 см от дневной поверхности наблюдаются субпараллельные дневной поверхности трещины. Трещины в породе образуются в основном вследствие температурных колебаний внешней среды, т.е. имеют экзогенную природу. Глубина от поверхности определяет не степень проникновения сезонных или суточных колебаний температуры, а реакцию породы на микроклиматические изменения. Таким образом, вследствие температурных колебаний происходит своего рода отслаивание внешней оболочки — “скорлупы” от скального основания. Эти нарушения, по-видимому, первичные, в то время как перпендикулярные им — производные. Природа трещин такого рода может быть связана с увеличением объема породного массива при снятии нагрузки, т.е. с дилатацией. Формирование как первичных, так и вторичных систем трещиноватости, вероятно, обусловлено комплексом эндогенно-экзогенных факторов, среди которых — морозное и биогенное выветривание, которые способствуют дальнейшему расширению трещин и отделению обломков.

Во всех образцах гранитов, отобранных на Кодарском хребте, заметны признаки интенсивного химического выветривания. Повсеместно присутствуют следы ожелезнения, что выражается в формировании бурой корки на поверхности образцов, рыжих пятен и затеков на сколах и по трещинам. Столь интенсивное ожелезнение вызвано, по-видимому, гидролизом биотита и роговой обманки — выносом по микротрещинам растворимого двухвалентного железа и его последующим окислением. Вокруг отдельных минеральных зерен иногда наблюдаются концентрические пятна ожелез-

нения шириной 2—4 мм. Толщина железистой корки достигает 5 мм. На поверхности нескольких образцов отмечена глинистая корка, формирование которой связано с гидролизом полевых шпатов. Дальнейшая миграция растворов и осаждение формируют у поверхности своего рода глинистую рубашку.

В микроморфологии образцов гранитов, отобранных на Кодарском хребте, обнаружены следы интенсивного воздействия мерзлотных процессов. По данным В.В. Рогова и В.Н. Конищева [5], в условиях криолитозоны один из наиболее устойчивых минералов отнюдь не кварц, как нередко полагают [2, 19, 21], а полевые шпаты и биотит. Минералы со слоистой структурой, в том числе слюды, доля которых в гранитах обычно не превышает 5%, характеризующиеся высокими значениями поверхностной энергии, мало подвержены криогенному дроблению, однако в сухих условиях разрушаются в ходе температурного выветривания.

Соотношение криогенной устойчивости кварца и полевых шпатов — основных породообразующих минералов — показывает, что зерна кварца во всех случаях оказываются менее устойчивыми по сравнению с неизмененными зернами полевых шпатов. Ведущим механизмом криогенного разрушения кварца, по мнению В.В. Рогова [10], следует считать расклинивание частиц кристаллами льда, которые растут в вакуолях — полостях, содержащих газово-жидкие включения (рис. 2). Размер полостей обычно составляет несколько десятков микрометров ($\mu\text{м}$), а ширина трещин не превышает 1 $\mu\text{м}$. Соответственно макроскопический визуальный анализ образцов не позволяет выявить следы криогенного разрушения зерен кварца. Трещины, вызванные разрывающим действием растущих в полостях кристаллов льда, распространяются по зернам кварца от включения к включению на доли миллиметра, разрушая минерал сразу на несколько частей.

Однако образцы гранитов с Кодарского хребта наряду с проявлениями термического и мерзлотного выветривания содержат множество признаков химических и биологических процессов разрушения. Минералы подвергаются химическому разрушению в разной степени. Кварц, например, наиболее устойчив к химическому воздействию, а легче всего ему подвергаются зерна полевых шпатов. Выветривание калиевых полевых шпатов происходит с образованием серицита $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ — вторичной калиевой слюды. В итоге в результате химического воздействия полевые шпаты переходят в алюмокремниевые гидраты каолинового строения [17]. Глинистое вещество, образу-

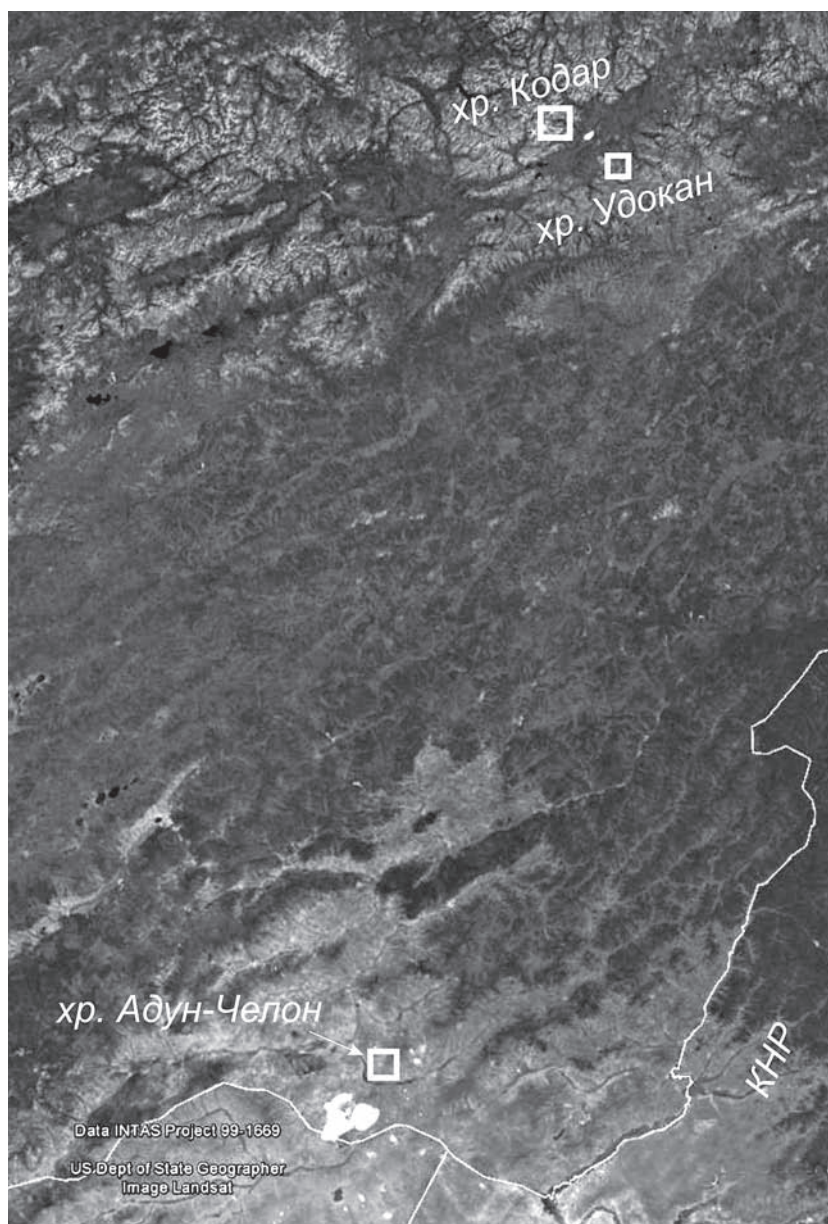


Рис. 1. Районы отбора образцов выветрелых гранитов, отмечены белыми квадратами

ющееся в ходе разрушения полевых шпатов, создает налеты на поверхности минералов и сгустки губчатого строения за счет коагуляции.

Другой важный фактор выветривания гранитов на Кодарском хребте, установленный в ходе микроморфологического анализа, — разрушение породы в ходе процессов жизнедеятельности живых организмов. Влияние биогенного фактора можно разделить на прямое и косвенное. Прямое воздействие живых организмов проявляется в расклинивающем действии корней растений и гиф грибов, проникающих в трещины и растущих в них, это биофизическое разрушение. Живые организмы выступают в данном случае как фактор, который способствует расширению трещин, но не как агент, их создающий. Корни растений и гифы грибов проникают, как правило, в трещины

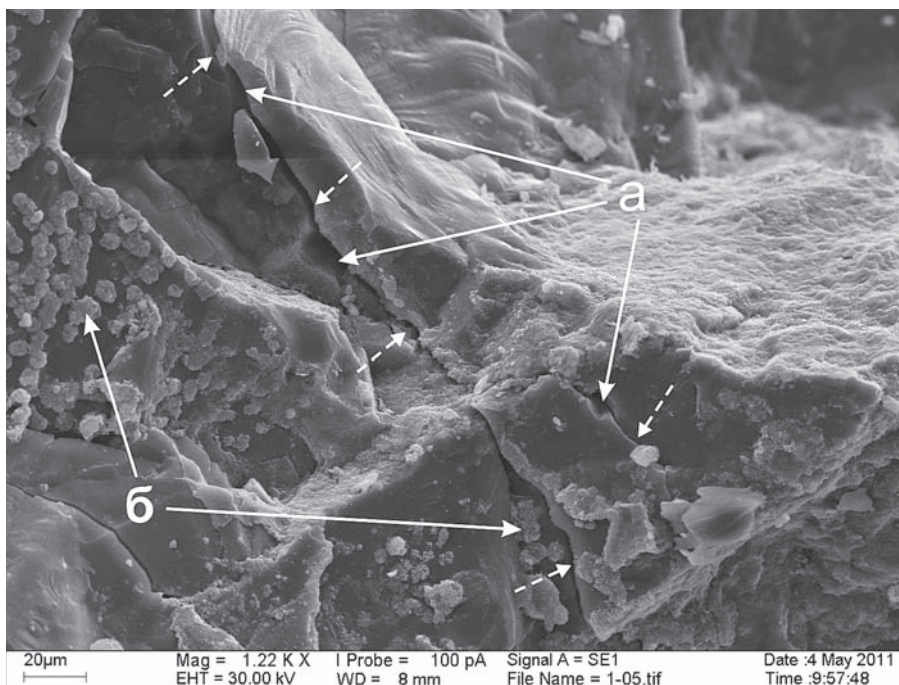


Рис. 2. Криогенные трещины в кварце (показаны пунктирными стрелками) по полостям газово-жидких включений (а) и глинистые ступки (б), образовавшиеся при гидролизе полевых шпатов (кодарский образец)

температурного и мерзлотного происхождения. Косвенное воздействие выражается в биохимическом или органическом выветривании [17]. Выделяя углекислый газ, бактерии и другие микроорганизмы при наличии воды создают благоприятные условия для образования уголекислоты и растворения минералов.

Таким образом, на Кодарском хребте разрушение гранитов начинается вследствие температурных колебаний, в то время как биогенные процессы и морозное выветривание способствуют расширению трещин и отделению обломков от основного массива породы. Очень велика роль химического выветривания — гидролиза полевых шпатов, вследствие чего ковалентные связи в кристаллической решетке минералов в породе ослабевают.

Образцы, отобранные с контакта гранитов с протерозойскими песчаниками Удоканского хребта (рис. 1), содержат мельчайшие проявления тектонической трещиноватости. Взаиморасположение трещин в образцах отличается от такового в кодарских образцах: основные трещины перпендикулярны к дневной поверхности. Часто трещины расположены параллельно жилам кислых пегматитов. Отметим, что мономинеральные жилы не подвержены сапролитизации, в то время как вмещающие их граниты разрушены достаточно сильно. В целом удоканские образцы более монолитные и прочные, чем кодарские.

Первичное трещинообразование в сапролитизированных гранитах Удокана, по-видимому, определяется эндогенными факторами, а именно повышенной напряженностью пород в приконтактной зоне. Признаки гидролиза полевых шпатов и разрушения биотита неочевидны, однако на многих образцах есть на-

леты глинистого вещества. Выходя на поверхность, скальные обнажения биотитовых и микроклиновых гранитов, уже находящиеся в нестабильном, хрупком состоянии, испытывают воздействие температурного и мерзлотного выветривания. При этом за счет разности значений коэффициента теплового расширения минералов в составе вмещающей породы происходит ее разрушение и дробление на отдельные древесной размерности. Экзогенные процессы, которые определили современный облик породы, вероятно, наложенные, т.е. вторичные по отношению к эндогенному трещинообразованию.

Микроскопический анализ удоканских образцов позволяет говорить, что физическое разрушение выражается в образовании трещин с помощью двух механизмов. Первый механизм — образование трещины между разными минералами за счет разных значений коэффициента температурного расширения при колебаниях температуры [16]. Кварц с хорошо организованной и химически прочной кристаллической решеткой трехмерного “пустотелого” каркаса из кремнекислородных тетраэдров меньше изменяет объем по сравнению с полевыми шпатами, имеющими более сложное строение. В результате на границе слагающих породу минералов возникает температурная трещина (рис. 3), которая может расширяться далее за счет действия других процессов (биогенных, хемогенных, мерзлотных).

Второй механизм — собственно криогенное воздействие. В удоканских образцах отмечены следы мерзлотных микротрещин в кварце, образующихся по описанному ранее механизму — по полостям газово-жидких включений. В этих образцах наблюдается

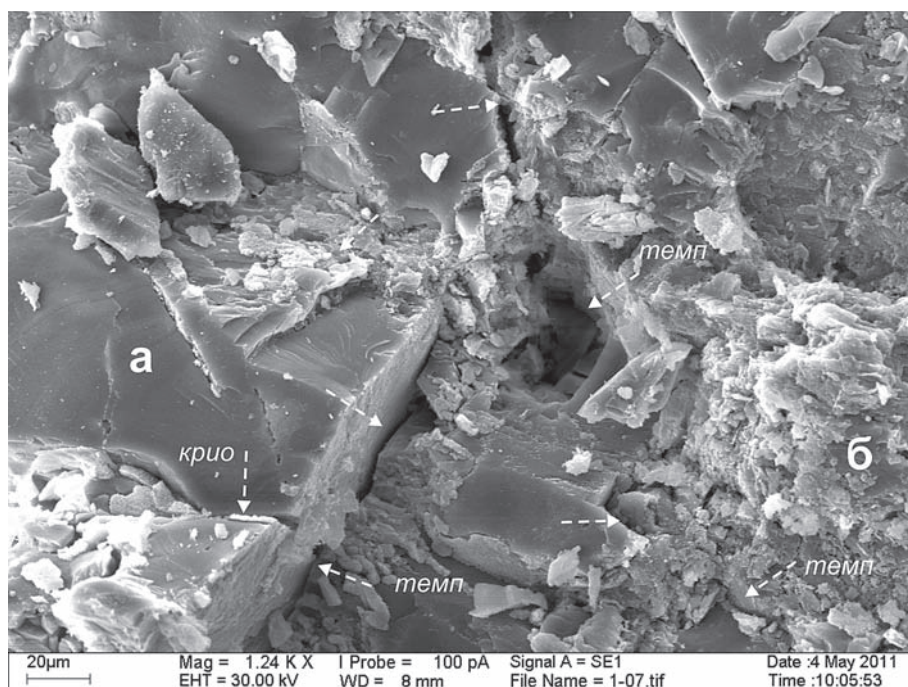


Рис. 3. Криогенные и термические трещины (показаны пунктирными стрелками) среди кристаллов кварца (а) и полевого шпата (б) (удоканский образец)

большое количество зерен кварца мелкоалевритовой фракции, которые представляют собой продукт разрушения более крупных зерен при неоднократном промерзании и протаивании [5]. Все это свидетельствует о высокой интенсивности мерзлотного выветривания кварца и в коренных породах.

В удоканских образцах присутствуют признаки химического выветривания — налеты глинистого материала. Химическому воздействию подвергаются в основном полевые шпаты, в результате чего и образуется глинистое вещество. Мельчайшие частички глины в ходе процессов коагуляции сначала образуют сгустки величиной до 10 мкм, а затем происходит формирование более крупных глинистых конкреций размером до 30 мкм. Форма конкреций на разных стадиях образования различна, так, на первой стадии конкреции-сгустки имеют неправильную или округлую форму, на второй — форму кольца или его сегмента, на конечной стадии — шарообразную форму.

В обнажении гранитов на Удоканском хребте ведущий фактор трещинообразования и дальнейшей сапролитизации эндогенный. Породы на некоторой глубине теряют свои прочностные характеристики из-за “усталости” кристаллической решетки вследствие продолжительных динамических напряжений в зоне тектонической активности и, выходя на поверхность, в зону действия экзогенных процессов, подвергаются выветриванию с еще большей интенсивностью.

Таким образом, в результате микроморфологического и минералогического анализа установлено, что в выветривании горных пород в Северном Забайкалье по типу сапролитизации, помимо физических процессов (температурного и криогенного выветри-

вания), важную роль играют процессы химического разрушения, связанные с гидролизом полевых шпатов и образованием глинистого вещества, а также биологические процессы, связанные с ростом корней растений, гиф грибов и с выделением углекислого газа. Каждый из этих процессов вносит свою долю в разрушение горных пород, и только в особых случаях один из них выступает в качестве ведущего.

Для примера можно привести данные о выветривании гранитов в мерзлотной — семиаридной обстановке Юго-Восточного Забайкалья. На выходах порфировидных гранитов в массивах Адун-Челон (рис. 1) и Малый Батор крупные (до 2 см), сравнительно прочные кристаллы полевого шпата рельефно выделяются на выветрелой поверхности породы. В то же время химически устойчивый кварц (субдоминант в составе гранитов составляет ~30% массы) хотя и выдерживает собственно термические напряжения, подвержен разрушительному криогенному дроблению. Составляющие основную массу гранитов ($\geq 60\%$) полевые шпаты в сухих условиях оказываются устойчивее других минералов по отношению как к термическому, так и к криогенному воздействию. Однако при участии влаги — в микропонижениях и на уровне грунта — полевые шпаты подвергаются гидролизу и разрушаются, что приводит к “подтачиванию” скальных выступов и образованию ванн выщелачивания — орисангов.

Выводы:

— ранее предполагалось, что суровые климатические условия Северного Забайкалья определяют превосходство процессов физического выветривания. В ходе детального изучения процессов сапролитизации стало очевидно, что выветривание гранитов протекает

при взаимодействии комплекса факторов. Химические процессы участвуют в выветривании достаточно активно, их следы отмечены повсеместно. Этому способствует и биохимическая деятельность организмов;

— образование первичных трещин в породе при выветривании по типу сапролитизации происходит вследствие криогенного разрушения кварца по полостям газовой-жидких включений — вакуолей. Рост кристаллов льда в вакуолях оказывает разрывающее воздействие на минерал и породу в целом;

— в процессе сапролитизации при доминировании физических факторов выветривания (криогенного и температурного) второстепенную, но вполне заметную роль играет гидролиз полевых шпатов, протекающий интенсивнее при участии живых организмов и продуктов их жизнедеятельности;

— в процессе сапролитизации гранитов Юго-Восточного Забайкалья (Даурия) ведущую роль парадоксальным образом также играет криогенное дробление кварца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базаров Д.-Д.Б., Резанов И.Н., Будаев Р.Ц. и др. Геоморфология Северного Прибайкалья и Станового нагорья. М.: Наука, 1981.
2. Казанский Ю.П. Выветривание и его роль в осадко-накоплении. М.: Наука, 1969.
3. Качурин С.П. Вечная и сезонная мерзлота Забайкалья // Тр. Ин-та мерзлотоведения имени В.А. Обручева. Т. 8. М., 1950.
4. Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 1981.
5. Конищев В.Н., Рогов В.В. Экспериментальная модель криогенной устойчивости основных породообразующих минералов // Проблемы криолитологии. 1978. Вып. 7. С. 189—197.
6. Лапердин В.К., Качура Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. Иркутск, 2010.
7. Лантев М.К., Лукашов А.А. Хребет Кодар // Побежденные вершины, 1970—1971. Сборник советского альпинизма. М.: Молодая гвардия, 1972. С. 243—251.
8. Лопатин Д.В. Геоморфология восточной части Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1972.
9. Пластинин Л.А., Плюснин В.М., Чернышов Н.И. Ландшафтно-аэрокосмические исследования экзогенного рельефообразования в Кодаро-Удоканском горном районе. Иркутск, 1993.
10. Рогов В.В. Особенности морфологии частиц скелета криогенного элювия // Криосфера Земли. 2000. Т. 4, № 3. С. 67—73.
11. Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972.
12. Симонов Ю.Г., Конищев В.Н., Лукашов А.А. и др. Учение о морфолитогенезе и его место в географической науке: Исторические аспекты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1998. № 4. С. 41—48.
13. Суходровский В.Л. Рельефообразование в перигляциальных условиях (на примере Земли Франца-Иосифа). М.: Наука, 1967.
14. Суходровский В.Л. Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М., 1979.
15. Черняховский А.Г. Современные коры выветривания. М.: Наука, 1991.
16. Шанцер Е.В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1966.
17. Щукин И.С. Общая геоморфология. Т. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960.
18. Anderson R.S., Anderson S.P. Geomorphology: mechanics and chemistry of landscapes. Cambridge University Press, 2010.
19. Hamblin K.W., Christiansen E.H. Earth's dynamic systems. Web edition 1.0. URL: <http://www.earthds.info/index.html> (дата обращения: 11.02.2014).
20. Migon P., Thomas M.F. Grus weathering mantles — problems of interpretation // Catena. 2002. Vol. 49. Iss. 1—2. P. 5—24.
21. Penck W. Die morphologische Analyse: ein Kapitel der physikalischen Geologie. Stuttgart, 1924.
22. Sequeira Braga M.A. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization // Catena. 2002. Vol. 49. P. 41—56.

Поступила в редакцию
04.07.2013

A.L. Gurinov, A.A. Lukashov, V.V. Rogov

SPECIFIC FEATURES OF GRANITE WEATHERING IN THE TRANSBAIKAL REGION

Particularly intensive weathering of massive rocks in the mountains of the north and south-east Transbaikalian region has a direct impact on all landscape components. Previously it was supposed that harsh climate of the Transbaikalian region provides for the total dominance of physical weathering processes. Detailed study of the samples of weathered granite using the LEO 1450 scanning electronic microscope has shown that the destruction of rocks takes place under the influence of an interacting complex of factors. Under the saprolite-type weathering initial fissures in the rock are formed through the cryogenic breaking of quartz which is the least stable mineral in the permafrost conditions. Along the physical factors of granite weathering (cryogenic and thermal) there are also the chemical ones, i.e. the hydrolysis of feldspars which becomes more intensive if living organisms and the products of their metabolism are present.

Key words: Transbaikalian region, weathering, saprolite development, granite, micromorphology, cryogenic breaking.