

## МЕХАНИЗМЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ ГРАНИТОВ МАССИВА АДУН-ЧЕЛОН В ЗАБАЙКАЛЬЕ

А.Л. Гуринов<sup>1</sup>, А.А. Лукашов<sup>1</sup>, В.В. Рогов<sup>1,2</sup>, А.Н. Курчатова<sup>2,3</sup>, М.П. Лебедева-Верба<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; gurinov.artem@gmail.com

<sup>2</sup> Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; rogovvic@mail.ru

<sup>3</sup> Тюменский государственный нефтегазовый университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия; kanni@mail.ru

<sup>4</sup> Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 109017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия; m\_verba@mail.ru

Рассмотрены механизмы выветривания позднеюрских гранитов Юго-Восточного Забайкалья. Проанализированы данные полевых и аналитических работ, выполненных с использованием растрового электронного микроскопа Hitachi TM 3000 в комплексе с энергодисперсионным спектрометром Swift 3000 и оптического поляризационного микроскопа Nikon Eclipse LV100. Оценен вклад физических, химических и биогенных процессов в разрушение гранитов и формирование их поверхностной структуры в ходе избирательного выветривания кварца и полевых шпатов. Выявлено, что определяющую роль в разрушении породы играет криогенное дробление кварца – слабоустойчивого в мерзлотных обстановках породообразующего минерала. Предложена генетическая интерпретация новообразований и включений, установленных при лабораторном анализе.

*Забайкалье, выветривание, гранит, микроморфология, криогенное дробление, кварц, полевые шпаты*

## MECHANISMS OF WEATHERING OF GRANITE MASS, ADUN-CHELON, TRANSBAIKALIA

A.L. Gurinov<sup>1</sup>, A.A. Lukashov<sup>1</sup>, V.V. Rogov<sup>1,2</sup>, A.N. Kurchatova<sup>2,3</sup>, M.P. Lebedeva-Verba<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; gurinov.artem@gmail.com

<sup>2</sup> Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; rogovvic@mail.ru

<sup>3</sup> Tyumen State Oil and Gas University, 625000, Tyumen, Volodarskogo str., 38, Russia; kanni@mail.ru

<sup>4</sup> Dokuchaev Soil Science Institute, 109017, Moscow, Pigevski per., 7, Russia; m\_verba@mail.ru

Weathering mechanisms and features of the Late Jurassic granites in South-Eastern Transbaikalia (Dauria) have been determined by the field work and laboratory analyses using Scanning Electron Microscope (SEM) Hitachi TM 3000 in complex with Energy Dispersive Spectrometer (EDS) Swift 3000 and Polarizing Microscope (PM) Nikon Eclipse LV100. The role of physical, chemical and biochemical processes in the formation of the unusual surface during the destruction of quartz, feldspars, and micas has been analysed. The cryogenic disintegration (shattering, crushing) of quartz (the least stable mineral in periglacial environments) plays the main role in the rock destruction. Authigenic minerals and inclusions detected by the laboratory analyses have been thoroughly described and genetically interpreted.

*Transbaikalia, grus weathering, granite, micromorphology, cryogenic disintegration, quartz, feldspars*

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в науках о Земле наблюдается устойчивая тенденция использования разномасштабных данных. Значительная часть географических исследований базируется на анализе космических снимков. В то же время разработки новых методик и оборудования сделали возможным изучение микро- и нанообъектов географической среды. В криолитологии, в частности, исследуется морфоскопия первичных и вторичных минералов, новообразований и включений льда, а также криогенных процессов преобразования горных пород. В настоящей работе рассматриваются особенности макро- и микростроения и механизмы выветривания гранитов Юго-Восточного За-

байкалья, изучавшиеся в ходе полевых работ и в лабораторных условиях.

Выветривание горных пород – сложный и многообразный процесс, в котором невозможно учесть все механизмы их разрушения. В большинстве классических работ выветривание подразделяется на физическое, химическое и биогенное. Деление это достаточно условное, поскольку в одной и той же массе элювия могут фиксироваться результаты как доминирующего, так и сопутствующих процессов. В определении химического выветривания, например, не акцентируется внимание на том, что присущее ему растворение одновременно является ведущим механизмом сов-

сем другого процесса – карста. При изучении биогенного выветривания обычно не разделяются процессы агрессивного воздействия на породу продуктов жизнедеятельности организмов и биомеханического разрушения. В понимании физического выветривания также нет единообразия. Под физическим выветриванием чаще всего понимается механическое дробление исходной монолитной породы в ее производные: глыбы, обломки фракции валунов, щебень, хрящ, песок и пыль. При этом главным механизмом считается температурное выветривание, а также колебание количества и фазового состава влаги, что получило название морозного [Попов, 1967] или криогенного [Ершов, 2002] выветривания. За последние десятилетия произошла трансформация взглядов на криогенное выветривание: от простого механического процесса расклинивания трещин в обломках породы в результате изменения фазового состояния воды [Полтев, 1966] до сложного физико-химического процесса взаимодействия горной породы и воды в разном структурном состоянии [Конищев, 1981]. Последние разработки в этой области позволили выяснить гранулометрический состав продуктов криогенного разрушения породообразующих минералов и установить количественные критерии степени криогенного преобразования [Конищев, 1994]. В условиях криогенного воздействия кварц оказывается менее устойчивым минералом относительно полевых шпатов, что прямо

противоположно закономерности выветривания в теплых гумидных условиях [Рогов, 2011].

### РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим особенности и основные механизмы выветривания коренных пород в районе массива Аду-Челон. Низкогорный массив Аду-Челон юго-востока Забайкальского края располагается на правом берегу нижнего течения р. Борзя в 25–40 км к восток-юго-востоку от ее впадения в р. Онон, на орографическом юго-западном продолжении оси хр. Кукульбей (рис. 1). Экспонированная на современном уровне эрозионного среза часть массива охватывает диапазон абсолютных высот 760–986 м и обладает плавным выпуклым профилем, который осложнен десятками резких скальных останцов высотой до 20 м. Массив расчленен системой падей с умеренно крутыми бортами, образующей рисунки, близкий к радиальному. Характер денудационного расчленения массива указывает на его восходящее развитие, продолжающееся или возобновившееся на неотектоническом этапе. Горные породы Аду-Челона разбиты нерегулярной сетью крутопадающих трещин, сгущения которых подвержены процессам избирательной (селективной) денудации, поскольку в таких местах горным породам свойственна пониженная сопротивляемость ко всем видам экзогенного воздействия [Ананьев, 1992; Лукашов, 2013]. Полосам разрежения крутопадаю-

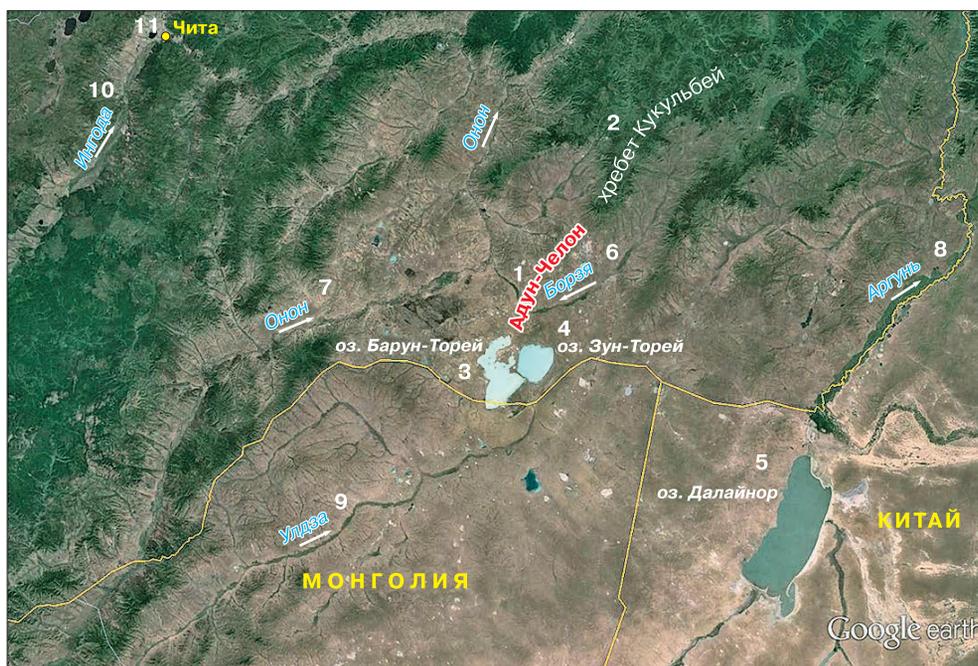
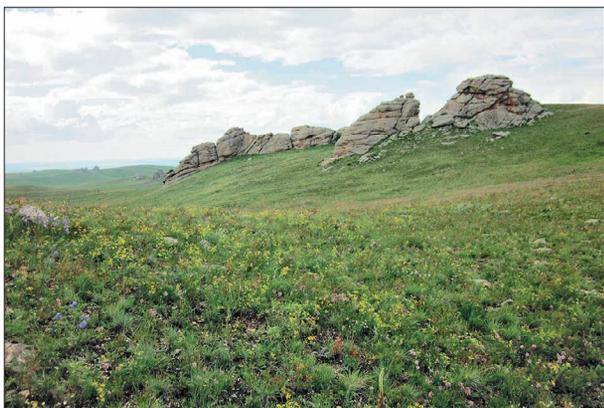


Рис. 1. Район исследований (мозаика GoogleEarth, [www.google.com](http://www.google.com)).

1 – массив Аду-Челон; 2 – хр. Кукульбей; 3 – оз. Барун-Торей; 4 – оз. Зун-Торей; 5 – оз. Далайнор; 6 – р. Борзя; 7 – р. Онон; 8 – р. Аргунь; 9 – р. Улдза; 10 – р. Ингода; 11 – г. Чита.



**Рис. 2. Гранитные останцы массива Адун-Челон. Фото А.А. Лукашова.**

щей тектонической трещиноватости, наоборот, соответствуют гребни горных отрогов, формирующих водоразделы разных рангов. В таких позициях избирательной денудации обособляются скальные останцы, характерные для Адун-Челона. Издали они напоминают стадо пасущихся животных, что и дало название массиву (с монгольского – табун камней) (рис. 2).

Местность упоминается в научной литературе с 1772 г., когда здесь побывал академик П.С. Паллас, посещали Адун-Челон академики В.И. Вернадский и А.Е. Ферсман. Массив стал широко известен благодаря добыче самоцветных камней, в том числе мориона – черного кварца, добыча которого прекратилась, так как большая часть отобранного мориона оказалась не ювелирного качества из-за большого количества трещин, газово-жидких включений и мути. Скальные останцы Адун-Челона имеют высоту от 3–5 до 20–25 м и сложены преимущественно метаморфическими сланцами и гранитом, который богат кремнеземом и многими рудными элементами. Породы останцов сильновыветрелые, обломки их легко разламываются рукой. Особенностью выходов на поверхность гранитов массива Адун-Челон является то, что сравнительно крупные (до 2 см) прочные кристаллы светлого полевого шпата рельефно (на 0.5–1.0 см) выделяются на выветрелой поверхности породы (рис. 3). Это наиболее заметно на отвесных и нависающих стенах останцов, где практически исключается застаивание атмосферной влаги и поэтому отсутствуют водоросли, мхи и лишайники [Гуринов и др., 2014].

Внутриконтинентальное положение описываемой территории определяет весьма суровые климатические условия, что сказывается на скорости процессов выветривания. Интенсификации разрушения гранитов массива Адун-Челон способствует высокая годовая и суточная амплитуда темпе-



**Рис. 3. Поверхность выветривания гранитов. Фото А.А. Лукашова.**

ратур пород, небольшое количество атмосферных осадков в зимний период (менее 5 мм в месяц), а также чрезвычайно низкие (для умеренных широт) зимние температуры воздуха: средние минимальные температуры января  $-34^{\circ}\text{C}$  при абсолютном минимуме до  $-50^{\circ}\text{C}$  [Качурин, 1950].

С целью оценки соотношения физических, химических и биогенных процессов разрушения и своеобразной поверхностной структуры пород были отобраны образцы гранита, которые после визуального осмотра и описания были исследованы при помощи растрового электронного микроскопа Hitachi TM3000 в комплексе с энергодисперсионным спектрометром Swift 3000, а также оптического поляризационного микроскопа Nikon Eclipse LV100.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

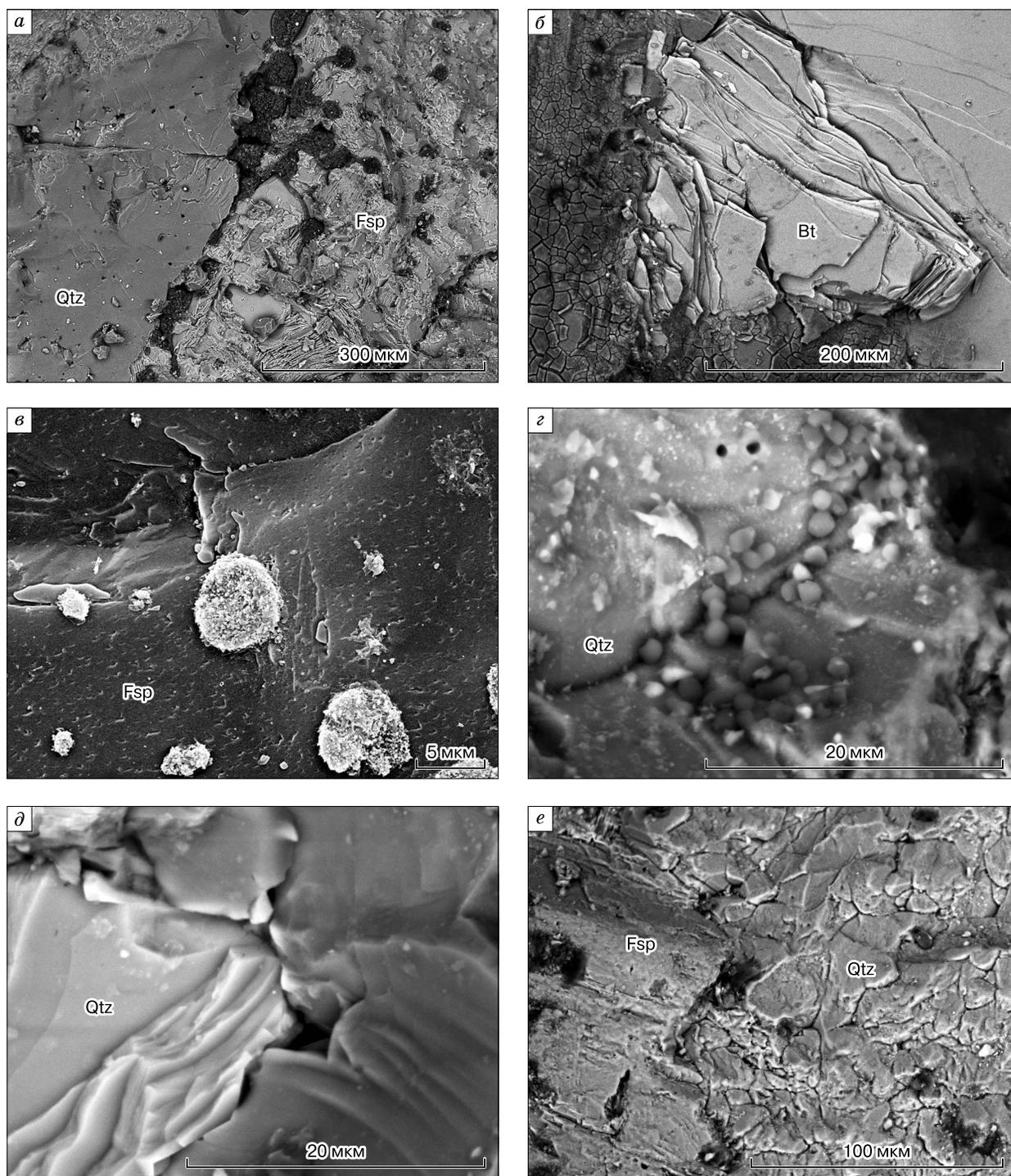
- изучение морфологии и взаимного размещения составляющих граниты минералов (кварца, полевых шпатов, слюд) в полуразрушенном (выветрелом) состоянии;
- выяснение роли криогенного разрушения кварца в ходе выветривания кристаллических горных пород;
- макро- и микроморфологическое изучение механизмов выветривания полнокристаллических горных пород в горно-мерзлотных обстановках умеренного пояса на примере Юго-Восточного Забайкалья.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ состояния гранитов Адун-Челона целесообразно начать с поверхности, поскольку различные агенты выветривания действуют с поверхности вглубь, что позволяет рассмотреть каждый

из них в отдельности. Поверхность образцов гранитов покрыта тонкой и разрозненной пленкой лишайников, практически незаметной невооруженным глазом. Микроскопическим анализом ус-

тановлено, что толщина ее составляет десятки доли миллиметра, в плане она представляет сросшуюся корку или соединенные гифами отдельные тела (талломы) (рис. 4, *a*). Разрез пленки показы-



**Рис. 4. Особенности микростроения гранита:**

*a* – распределение тел лишайников на границе зерен кварца (Qtz) и полевого шпата (Fsp); *б* – железистая пленка на контакте с зерном биотита (Bt); *в* – сгустки коллоидного вещества на поверхности полевого шпата; *г* – опаловые глобулы на поверхности кварца; *д* – трещина в кварце, проходящая через полость газовой-жидкой включения; *е* – характерная поверхность кварца и полевого шпата.

ваит типичное слоистое строение лишайника, при этом хорошо видно, что ризины (выросты) на нижней коре проникают в трещины породы. В теле лишайника заметно наличие большого количества тонких минеральных частиц глинистого и коллоидного размера, анализ химического состава показывает значительную адсорбцию различных элементов – от составляющих подстилающую породу биофильных (фосфор Р) до аксессуарных (Ni до 1.5 %, Ti до 2.7 %, Ag до 3.5 %). Обнаруживается присутствие серы, хотя известно, что определенное ее количество губительно для лишайников. Интересно распределение лишайниковых тел – они явно тяготеют к трещинам между минералами и к граням поверхности полевых шпатов и слюд. Поверхность кварца от лишайников, как правило, свободна. Можно предположить, что лишайнику не удается закрепиться на кварце либо из-за отсутствия питательных элементов, либо из-за частого обновления поверхности данного минерала при его разрушении. Как показывают наблюдения, роль лишайников в разрушении гранитов (но не кварца) довольно значительна. Возможно, их биогенное выветривание начинается с деятельности бактерий, которые встречаются в трещинах и иных дефектах породы.

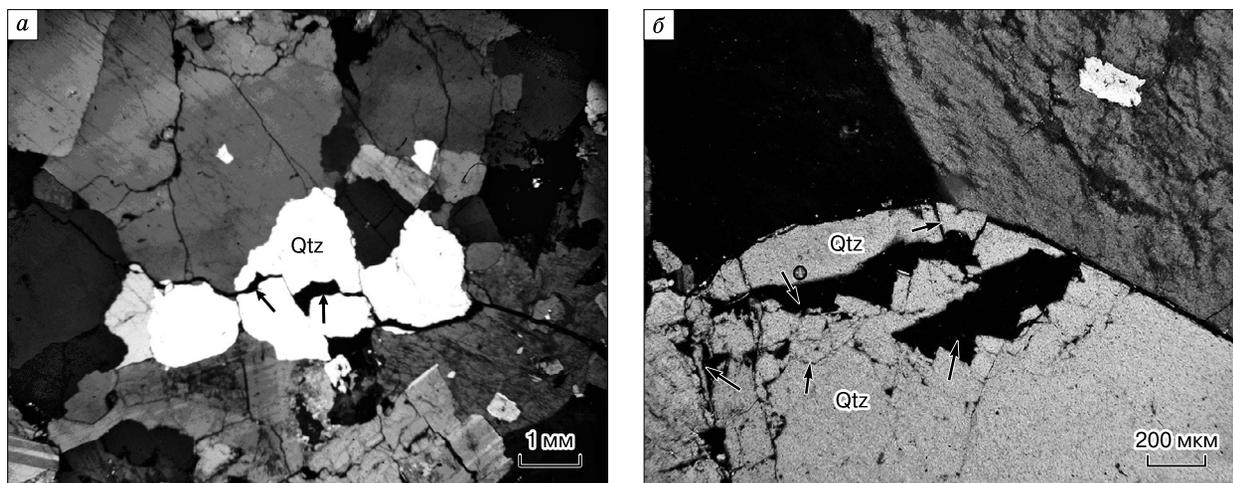
Биогенное выветривание, безусловно, тесно связано с химическим преобразованием минералов, слагающих гранитные останцы Адун-Челона. Визуально наблюдаются следы ожелезнения, которое проявляется в формировании бурой корки на поверхности образцов и рыжих пятен, “затеков” на сколах и по трещинам. Интенсивное ожелезнение вызвано, по-видимому, разложением биотита, поскольку высохшие пленки коллоидного железа чаще наблюдались вблизи его частиц (см. рис. 4, б). Однако формы железистых образований не огра-

ничиваются пленкой железоглинистых коллоидов. Железо на поверхности породы встречается также в виде мельчайших шаровидных конкреций размером от 1 до 10 мкм. В пленке лишайника концентрация железа идет активнее и конкреции его достигают 20 мкм, кроме того, оно участвует в образовании более крупных (до 100 мкм) конкреций сидерита.

Полевые шпаты в составе гранита Адун-Челона представлены главным образом плагиоклазами. Сколы частиц шпатов поперек спайности имеют вид сложенных пачкой заостренных пластинок; параллельные спайности плоскости имеют следы осаждения коллоидов в виде ступков размером от 10 до 50 мкм. Форма ступков различная: наименьшие имеют неправильную хлопьевидную форму, большие – форму кольца или его сегмента, самые крупные – шарообразную форму (см. рис. 4, в).

В кварце, несмотря на его химическую стойкость, также видны следы растворения и осаждения кремниевых растворов в виде опаловых глобул размером 1–3 мкм (см. рис. 4, з).

Важной морфологической чертой образцов гранита Адун-Челона является почти регулярная трещиноватость, разделяющая породу на многогранники объемом 0.25–0.50 см<sup>3</sup>, что легко обнаруживается при разламывании обломков. Микроскопический анализ показывает, что эти трещины закладываются по границам агрегатов и кристаллов, слагающих породу минералов, и прежде всего по границам кварца и полевых шпатов. Такие трещины, по-видимому, возникают вследствие температурных колебаний внешней среды. Сказываются и различия теплофизических характеристик породообразующих минералов. Наиболее крупные зерна, как показано выше, имеют ожелезненные стенки и осваиваются лишайниками, что приводит



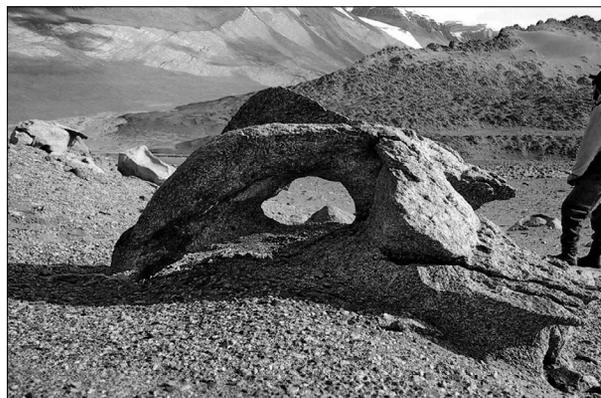
**Рис. 5. Особенности микростроения гранита в шлифах:**

а – трещины в кварце (Qtz), проходящие через полости включений (показаны стрелками); б – отщепление фрагментов с поверхности зерна кварца.

к потере прочности гранита. Другая категория трещин имеет меньший масштаб и связана с иными процессами. Это трещины в объеме минералов, слагающих гранит: слюдах, полевых шпатах и кварце. В слюдах и полевых шпатах такие трещины следуют спайности этих минералов и возникают в результате температурных деформаций, а также, по нашему мнению, расклинивания трещин льдом. При этом происходит дальнейшее расширение трещин (особенно в слюдах). В кварце практически все трещины так или иначе связаны с полостями газовой-жидких включений (см. рис. 4, *д*). Формирование таких трещин вызвано образованием льда в закрытых или большей частью открытых полостях газовой-жидких включений и, следовательно, имеет криогенную природу [Рогов, 2000]. Размер полостей обычно исчисляется десятками микрометров, а ширина трещин не превышает одного микрометра. Именно такие трещины ухудшают ювелирные качества мориона (черного кварца), поскольку разбивают зерна на отдельные блоки размером 10–50 мкм (см. рис. 4, *е*). На рис. 4, *е* видно, что разбитое трещинами зерно кварца контактирует с зерном полевого шпата, которое слабо затронуто трещинообразованием.

Исследования шлифов с использованием поляризационного микроскопа подтверждают и дополняют картину криогенного разрушения гранита. Кварц породы разрушается не только трещинами, проходящими через включения, но и с поверхности (рис. 5, *а*, *б*). Полученные результаты подтверждают концепцию В.Н. Конищева [Конищев, 1981, 1994] о криогенном преобразовании минерального вещества: криогенная устойчивость кварца меньше, чем у полевых шпатов. Сочетание межминерального трещинообразования, биогенного освоения этих трещин и криогенного разрушения кварца приводит к выкрашиванию зерен кварца из породы и образованию на ее поверхности выступов зерен полевых шпатов, что хорошо фиксируется визуально. Такой своеобразный микрорельеф поверхности гранитных останцов сформировался именно вследствие различной криогенной устойчивости минералов.

Особенности механизмов выветривания оказывают влияние и на форму самих останцов. Полевые шпаты в континентальных условиях при низкой влажности оказываются устойчивее других минералов к термическому и криогенному воздействию. Однако при участии влаги (в микропонижениях и особенно на контакте с грунтом) шпаты подвергаются гидролизу и разрушаются, что приводит к образованию ванн выщелачивания (орисангов) и “подтачиванию” пьедесталов скальных выступов. Благодаря интенсивному выветриванию даже на сравнительно монолитных скальных останцах массива коренные породы находятся в сильно разрушенном и хрупком состоянии, что в



**Рис. 6. Формы выветривания гранитов в массиве долины Райта, Земля Виктории, Антарктида. Фото Майк Вейсс (www.rossea).**

итоге сказывается на дальнейшем ходе экзогенных процессов.

Криогенный фактор в разрушении гранитов подробно рассмотрен и обоснован Х. Френчем и М. Гугльельмином при исследовании форм выветривания в Антарктике [French, Guglielmin, 2000]. Авторами подтверждается положение о более активном криогенном разрушении кварца, диагностируется последующее его удаление эоловыми процессами и образование особых форм рельефа – таффони (рис. 6). Подобные формы встречаются и в массиве Адун-Челон (см. рисунок на обложке), хотя роль криогенеза в их образовании следует уточнить.

## ВЫВОДЫ

1. Разрушение гранитов массива Адун-Челон проходит при взаимодействии нескольких механизмов: биогенного, химического и температурного, однако особый характер выветривания гранитов в этом районе обусловлен криогенным механизмом разрушения.

2. Криогенный механизм разрушения определяется спецификой выветривания основных породообразующих минералов. Кварц активно разрушается при формировании льда в полостях газовой-жидких включений, образуя мелкие обломки, которые интенсивно выкрашиваются из породы. Полевые шпаты и слюды, в которых лед образуется по трещинам спайности, расслаиваются, сохраняя объем и остаются в породе дольше, чем кварц.

3. Различия в криогенной устойчивости кварца и полевых шпатов определяют характер поверхности гранита останцов массива Адун-Челон и форм рельефа, связанных с эоловыми процессами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-17-00131).

## Литература

- Ананьев Г.С.** Динамическая геоморфология / Г.С. Ананьев, Ю.Г. Симонов, А.И. Спиридонов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1992, 448 с.
- Гуринов А.Л., Лукашов А.А., Рогов В.В.** Механизм разрушения (выветривания) гранитов Забайкалья // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2014, № 2, с. 49–54.
- Ершов Э.Д.** Общая геокриология / Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.
- Качурин С.П.** Типы вечной мерзлоты Центрального и Восточного Забайкалья // Тр. Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1950, т. 8, с. 5–41.
- Конищев В.Н.** Формирование состава дисперсных пород в криолитозоне / В.Н. Конищев. Новосибирск, Наука, 1981, 196 с.
- Конищев В.Н.** Методы криолитологических исследований / В.Н. Конищев, В.В. Рогов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1994, 135 с.
- Лукашов А.А.** Тектоно-гидрографические загадки территории заповедника Даурия // Земля из космоса – наиболее эффективные решения, 2013, № 16, с. 84–95.
- Полтев Н.Ф.** Изменение гранулометрического состава песчаных грунтов при воздействии на них растворов электролитов и процесса заморзания–оттаивания // Мерзлотные исслед., 1966, вып. 6, с. 199–206.
- Попов А.И.** Мерзлотные явления в земной коре (криолитология) / А.И. Попов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 304 с.
- Рогов В.В.** Особенности морфологии частиц скелета криогенного элювия // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 67–73.
- Рогов В.В.** Основы криогенеза / В.В. Рогов. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2011, 203 с.
- French H.M., Guglielmin M.** Cryogenic weathering of granite, Northern Victoria Land, Antarctica // Permafrost and Periglacial Processes, 2000, vol. 11, p. 305–314.

*Поступила в редакцию  
15 января 2015 г.*