



Иванова Вера Леонидовна – к.г.-м.н., н.с. лаборатории метаморфических и метасоматических формаций, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Vera L. Ivanova – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Metamorphic and Metasomatic Formations, Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

Баринов Николай Николаевич – к.г.-м.н., с.н.с. лаборатории анализа благородных металлов Дальневосточный геологический институт ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток

Nicholay N. Barinov – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Analysis of Precious Metals, Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok



УДК 549.08; 550.47; 582.29.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛИШАЙНИКОВ С МИНЕРАЛАМИ РУДНЫХ ОТВАЛОВ

INTERACTIONS OF LICHENS WITH MINERAL ORE DUMPS

В статье представлены результаты исследований взаимодействия эпилитных и эпигенных лишайников с рудными и нерудными породами отвалов шеелит-сульфидного месторождения Восток-2. Показано, что при взаимодействии лишайников с минералами происходит обогащение железо-оксидных пленок на минералах углеродом, а лишайников такими элементами, как Fe, S, Si (иногда также Mg, Al, K, Mn).

Ключевые слова: биоминеральные взаимодействия, лишайники, рудные отвалы, микроанализ.

The paper presents results of studies epilithic and epigenic lichens interaction with metallic and nonmetallic rock dumps of scheelite-sulfide deposit Vostok-2. It is shown that the interactions of such lichens prooke concentration of ferrioxide film on minerals with carbon, and lichens with Fe, S, Si (sometimes with Mg, Al, K, Mn).

Key words: biomineral interaction, lichens, ore piles, microassay.

В процессе геоэкологического изучения старых отвалов шеелит-сульфидного скарнового месторождения Восток-2 выяснилось, что рудный и нерудный отвалы за-

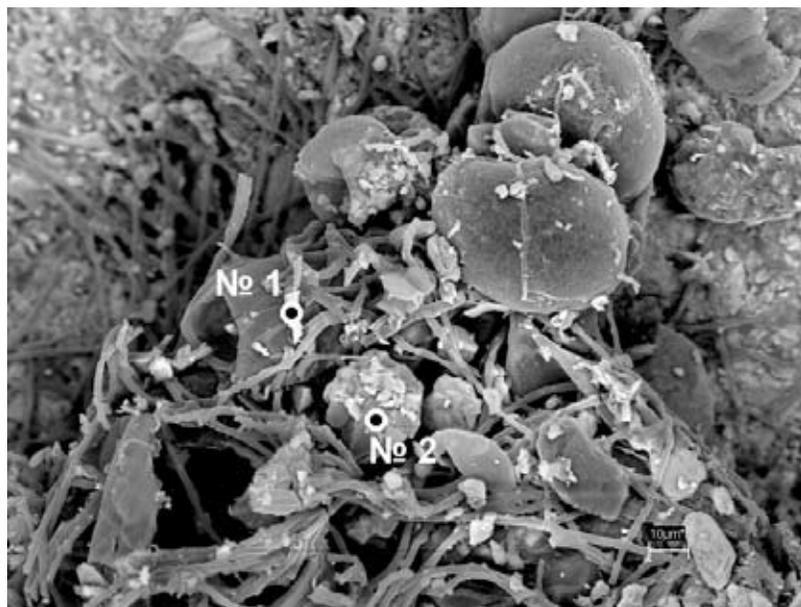


Рис. 1. Образец 235. Начало роста *Cladonia* sp. с указанными местами микрозондового анализа

гранодиориты, активно заселяется эпигейным лишайником кладония (*Cladonia* sp., *Cladonia gracilis* (L.) Wild.)

Биоинеральные взаимодействия лишайников и минеральной подстилки не новая тема для исследования. В одной из недавно опубликованных работ [7] приведены результаты изучения таких взаимодействий в водной среде. На хорошем аналитическом материале установлено, что водные накипные лишайники активно участвуют в процессах физического и химического выветривания горных пород. В отличие от биокосных систем, развивающихся в водных бассейнах, условия зарождения гео-биоценозов на суше более неоднородны, обладают большей степенью случайности. Нестабильность возникающей на отвалах минерало-биологической системы определяется, прежде всего, тем, что она образуется не на сложившихся в пространственном

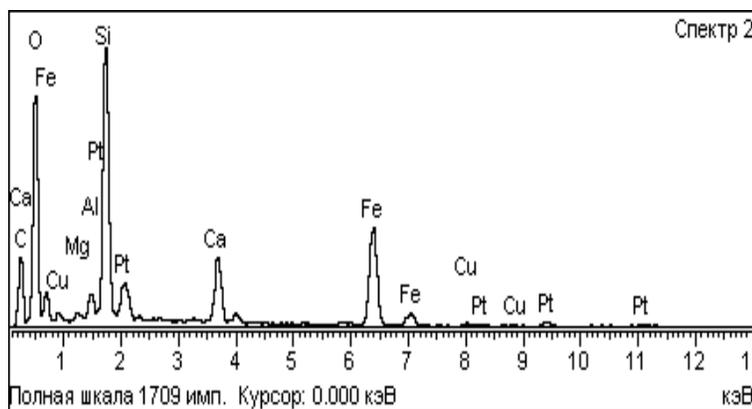


Рис. 2. Микрозондовый спектр № 1: авгит с примесью органического вещества и меди

заселяются разными лишайниками. Обломки окисленной руды обильно обрастают эпилитным кустистым лишайником *Stereocaulon* sp., при этом нерудные участки обломков и глыб игнорируются. Здесь же, на руде, встречаются черные мелкие пятна накипных лишайников. На нерудных отвалах мелкие обломки вмещающих пород, в основном

и энергетическом плане седиментационных системах, а на обломках бывшей рудно-магматической системы, на материале, который системой еще не является [2], к тому же отсутствует водная среда, способствующая обмену веществом как внутри системы, так и с окружающей средой. Эти особенности тре-

буют специфических методов изучения, в частности, точечный микроанализ здесь дает более надежную информацию о химических процессах, чем классический анализ сред.

Для изучения особенностей биоминерального взаимодействия образцы, отобранные с отвала № 3 окисленных забалансовых руд (обр. 233) и с нерудного отвала № 5 (обр. 235), изучались макроскопически, с помощью светового микроскопа (бинокуляра), и на электронном сканирующем микроскопе EVO-50 XVP, оснащенный системой INCA Bruery 350.

Энергодисперсионный спектрометр, входящий в эту систему, позволяет изучать химический состав вещества с определением элементов от В до U. Отобранные с помощью светового микроскопа препараты помещались на двустороннюю проводящую углеродную клейкую пленку и напылялись слоем Pt (около 50 А) для снятия электрического заряда, возникающего при воздействии электронного зонда микроскопа. Снимки получались с использованием вторичных (SE) и обратнорассеянных электронов (BSE).

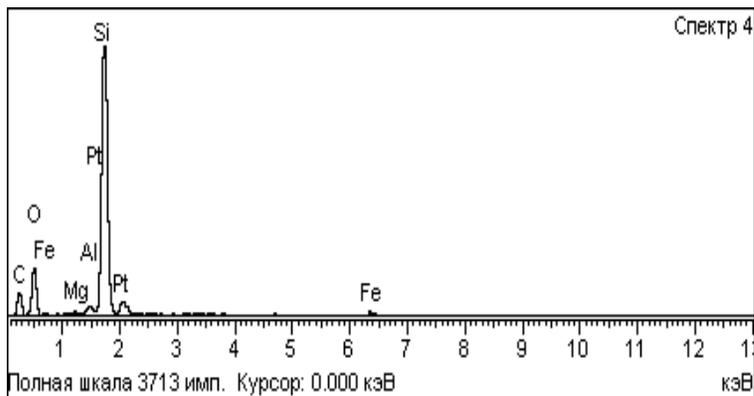


Рис. 3. Микронзондовый спектр № 2: кварц с примесью пироксена и органики

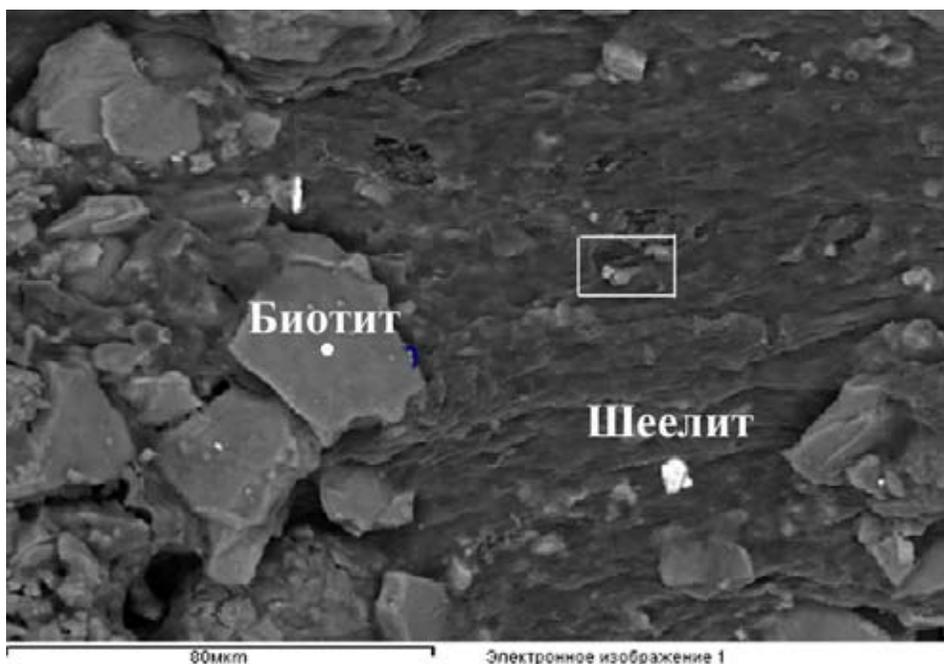


Рис. 4. Образец 235. Внутренняя поверхность пододея кладонии с приросшими минералами. Участок, выделенный прямоугольником, показан на рис. 5 при увеличении; пластина биотита с точкой микрозондового анализа (спектр см. на рис. 6); зерно шеелита (микронзондовый спектр см. на рис. 7)

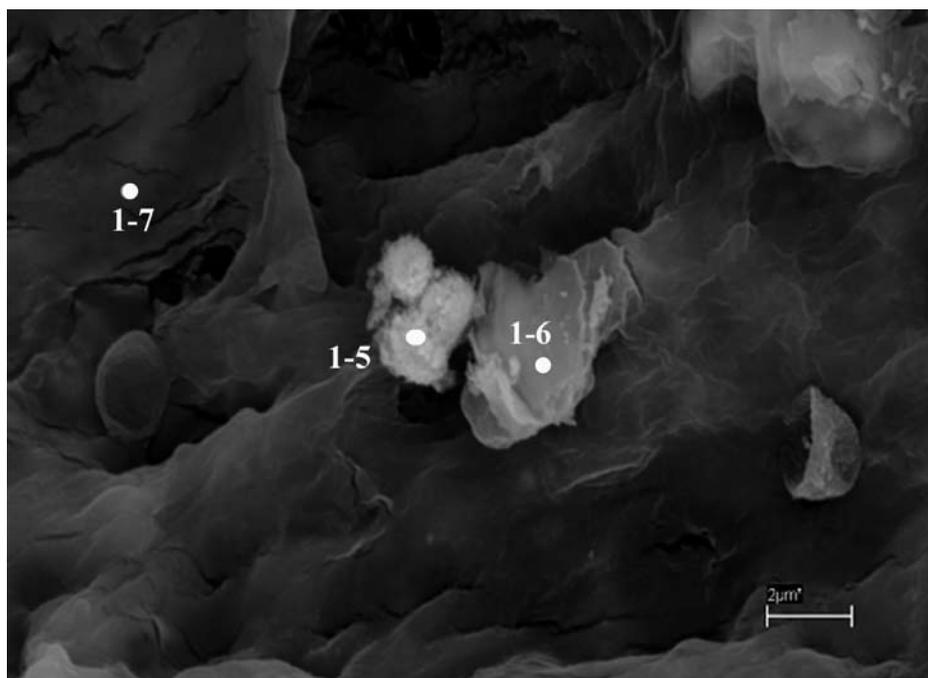


Рис. 5. Образец 235. Фрагмент подтепия кладонии: округлые включения пирита. Отмеченные точки анализов соответствуют номерам в табл. 2

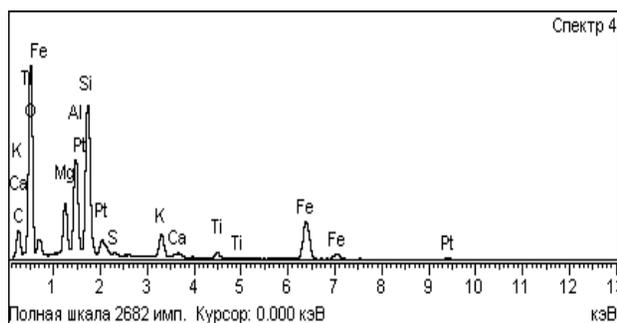


Рис. 6. Микрозондовый спектр биотита (место анализа показано на рис. 4)

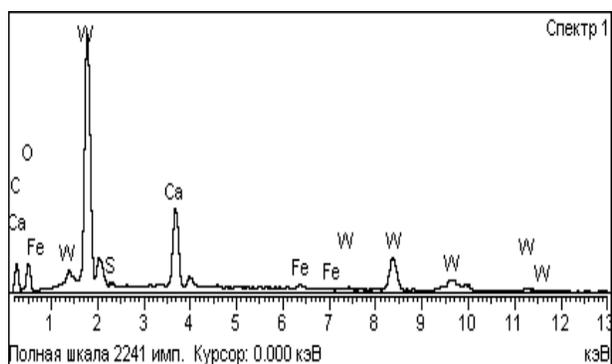


Рис. 7. Микрозондовый спектр шеелита (место анализа показано на рис. 4)

Отмечено, что срастание лишайников с минеральными обломками подстилки очень прочное, их не удастся отряхнуть, легче происходит разрыв тела лишайника. Такое же прочное «склеивание», скорее всего, с помощью выделяемых ферментов присутствует и на микронном уровне, что дало возможность проанализировать в контакте и органику, и минералы с поверхности или захваченные при росте. Результаты точечных микроанализов приведены в табл. 1, 2 (места анализов см. рис. 1–10). Спектры во всех точках снимались полностью, отсутствие данных в ячейках означает, что содержание элемента ниже чувствительности прибора.

В табл. 1 приведены данные о составе органики (таллом лишайника). Характерные особенности

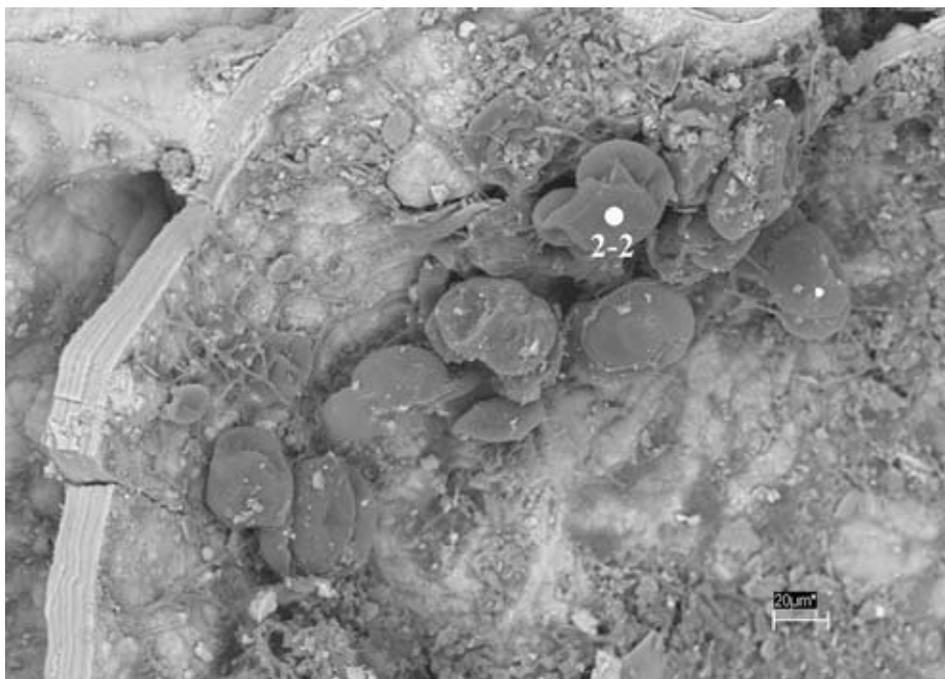


Рис. 8. Образец 233. *Stereocaulon* sp. на гидратированных железистых корочках и пленках. Отмеченные точки анализов соответствуют номерам в табл. 1

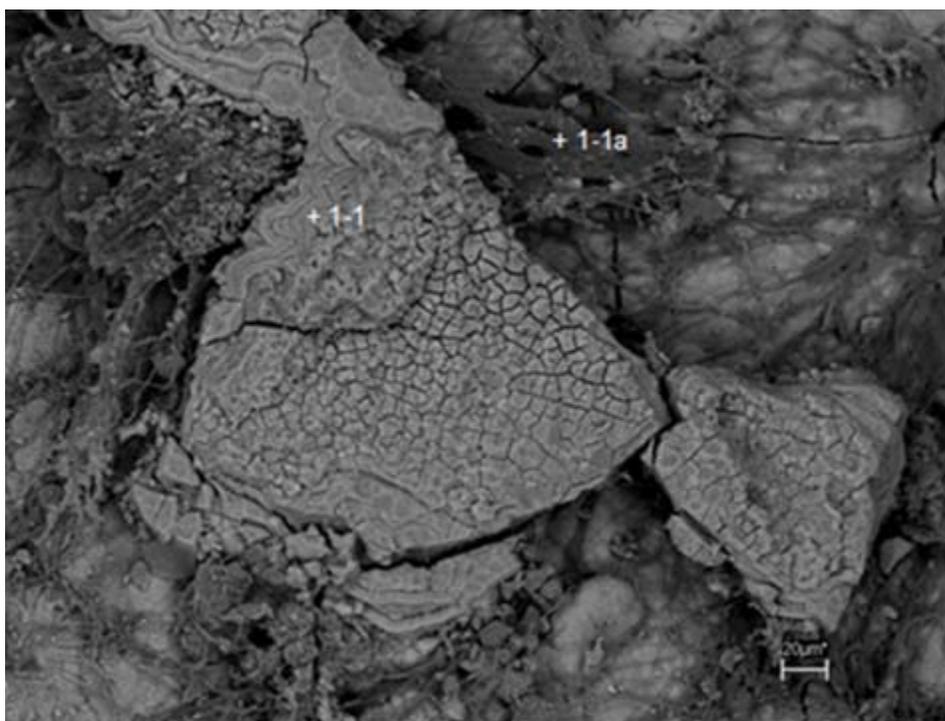


Рис. 9. Образец 233. Железистая пленка. Отмеченные точки анализов соответствуют номерам в табл. 2

Таблица 1

Элементный состав лишайников по данным микронзондового опробования

Элемент	Образец									
	235-1-4		235-1-6		235-1-7		235-2-2		233-2-2	
	Вес. %	Ат. %								
C	75,64	81,20	63,72	72,00	75,57	82,25	26,97	33,07	79,01	83,72
O	22,56	18,18	30,50	25,87	19,80	16,18	72,39	66,64	20,10	15,99
Mg	0,23	0,12	0,71	0,40	0,27	0,14	–	–	–	–
Al	–	–	0,46	0,23	0,25	0,12	0,16	0,09	0,11	0,05
Si	–	–	0,92	0,44	0,34	0,16	0,25	0,13	0,12	0,05
S	0,20	0,08	0,33	0,14	0,43	0,17	0,05	0,02	0,20	0,08
Cl	0,23	0,08	0,27	0,10	0,48	0,18	–	–	–	–
Ca	0,74	0,24	0,60	0,20	1,37	0,45	–	–	–	–
K	–	–	–	–	–	–	0,03	0,01	–	–
Mn	–	–	0,48	0,12	–	–	–	–	–	–
Fe	0,40	0,09	1,99	0,48	1,49	0,35	0,16	0,04	0,46	0,10

Таблица 2

Состав железистых пленок и включений

Элемент	Образец									
	233-1-1		233-2-1		233-2-2		233-1-1а		235-1-5 (бакт.)	
	Вес. %	Ат. %	Вес. %	Ат. %	Вес. %	Ат. %	Вес. %	Ат. %	Вес. %	Ат. %
C	9,49	20,61	9,09	17,47	21,58	48,04	48,74	59,31	56,53	67,55
O	32,70	53,32	44,71	64,55	10,98	18,35	41,37	37,80	32,59	29,23
Mg	–	–	–	–	0,47	0,52	0,10	0,06	0,15	0,09
Al	1,20	1,16	0,72	0,61	1,64	1,62	0,57	0,31	0,18	0,10
Si	1,01	0,94	1,01	0,83	2,79	2,66	0,73	0,38	0,47	0,24
S	0,83	0,68	0,49	0,35	0,37	0,31	0,17	0,08	0,45	0,20
Cl	–	–	–	–	0,22	0,17	–	–	0,14	0,05
K	–	–	–	–	0,41	0,28	–	–	0,08	0,03
Na	–	–	–	–	–	–	–	–	0,20	0,13
Ca	–	–	–	–	–	–	–	–	0,34	0,12
Fe	47,79	22,33	36,72	15,19	54,85	26,27	7,72	2,02	8,87	2,28
Zr	–	–	–	–	5,50	1,61	–	–	–	–
As	–	–	0,55	0,17	–	–	–	–	–	–
W	2,81	0,40	2,75	0,35	1,19	0,17	0,59	0,05	–	–
Ir	4,16	0,57	3,97	0,48	–	–	–	–	–	–

следующие: во всех спектрах, кроме главного органического элемента С, присутствуют S и Fe, а заражение другими элементами зависит от подстилающих минералов.

Окисленные руды содержат обилие гипергенных железистых пленок и корочек (рис. 8, 9), именно на них поселяется лишайник *Stereocaulon* sp., точнее, водоросли локализованы исключительно на корочках, а гифы грибов – на корочках и под ними, проникая между обломками минералов. В табл. 2 показан состав этих корочек, а также состав округлых железистых включений размером 1,5–2 мкм, обнаруженных в теле подеция лишайника *Cladonia gracilis* (обр. 235-1-5). В составе всех железистых образований (табл. 2), кроме Fe, S, присутствует углерод, все корочки содержат W, остальные примесные элементы варьируют в зависимости от наличия в первичной руде тех или иных рудных минералов. Железистые включения в кладонии (рис. 5)

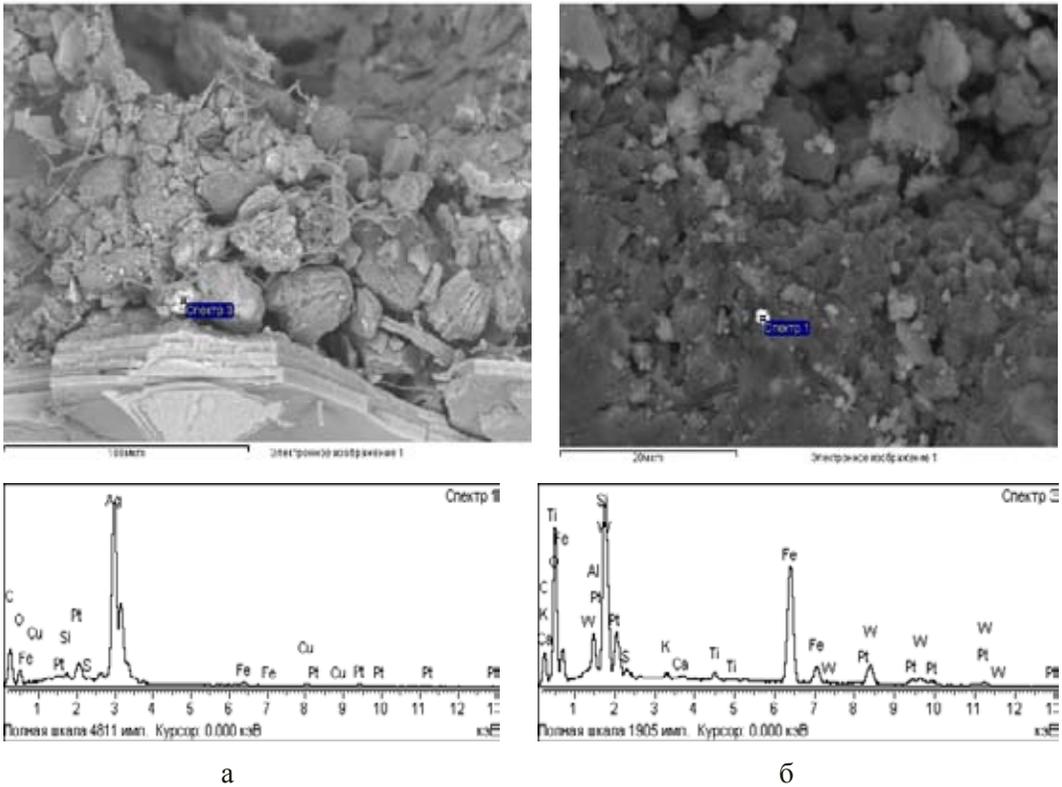


Рис. 10. Минералы из подложки *Stereocaulon* sp.: а – кварц с рудными включениями, б – самородное серебро

похожи по морфологии на фрамбоиды пиритов [3], но по составу, видимо, выполнены окислами железа и, возможно, являются результатом жизнедеятельности тех тиобактерий, которым отводится большая роль в преобразовании гипергенных руд [8]. Наблюдается постепенное нивелирование их в теле лишайника (обр. 235-1-7, обр. 235-1-6 табл. 1; обр. 235-1-5 табл. 2). От «бактерии» к лишайнику уменьшается содержание Fe, увеличиваются концентрации C, Ca, Cl. Способность бактерий выделять минеральные обособления округлой, фрамбоидальной или кристаллической формы широко известна. Эти организмы образуют разные биоминералы: пириты [3, 5], полифосфаты и магнетиты [1]. Выявлено такое свойство и у микромицетов [6], но в нашем случае нелогично предполагать, что гриб, входящий в симбиоз лишайника, выделил железистый минерал, а потом стал его ассимилировать. Скорее всего, в период роста лишайника в экологической системе появляются бактерии и другие микроорганизмы, которые, возможно, являются биостартовыми, а потом используются для питания высшим организмом.

Минералы подложки, присосшие к лишайникам, разнообразны. Породообразующие минералы представлены полевыми шпатами, пироксенами, кварцем. Из рудных минералов присутствует шеелит, другие встречаются реже. Интересно, что в спектрах этих минералов (рис. 2, 3, 6, 7, 10) тоже присутствует углерод, а стехиометрия их состава обычно нарушена. Это еще раз показывает, что минералы обработаны ферментами биоты.

Рассчитанные формулы проанализированных минералов, контактирующих с лишайником

№ образца	Минерал	Формула	Примечание
233-2 Сп. 1	Серебро	$Ag_{15,15}Cu_{0,5}Fe_{0,37}$	—
	Халькопирит	$Cu_{0,12}Fe_{0,12}S_{0,25}$	—
	Кварц	$Si_{0,46}O_{0,92}$	—
	Органика	$C_{51,89} + O_{30,13}$	—
233-1 Сп. 1	Шеелит*	$(Ca_{5,22}Fe_{0,81})_{8,03}W_{6,79}O_{25}$	—
	Галенит	$Pb_{0,06}S_{0,06}$	—
	Органика	$S_{0,41} + C_{23} + O_{0,40}$	—
233-н Сп. 1	Калишпат	$K_{5,24}Al_{5,50}(Si_{16}Fe_{0,19})_{16,19}O_{44}$	С накипным лишайником
	Органика	$C_{16,84} + O_{12,08} + \text{примесь } Cu_{0,15}$	
233-2-1 Сп. 1	Альмандин	$Fe_{1,8}Al_{0,61}Si_{0,83}O_{12}$	Включения в железистой корочке
	Ирарсит	$Ir_{0,48}As_{0,17}S_{0,35}$	
	Вольфрамит	$Fe_{0,35}W_{0,35}O_{1,4}$	
235-2 Сп.2	Авгит	$(Ca_{0,86}Mg_{0,15}Fe_{2,59}Al)_{3,60}(Si_{3,17}Al_{0,32})_{3,19}O_{10,80}$	Примесь Cu
	Органика	$C_{27,44}O_{54,50}$	
235-2 Сп.3	Биотит	$(K_{0,15}Ca_{0,48}Mg_{0,22}Fe_{0,20})_{1,05}[Al_{1,05}Si_{3,16}O_{10,5}]$	F, H не определены
	Халькопирит	$Cu_{0,17}Fe_{0,17}S_{0,22}$	—
	Магнетит	$Fe_{5,5}O_{8,25}$	—
	Органика	$C_{24,28}O_{48}$	—
235-1 Сп. 1	Шеелит*	$Ca_{3,03}Fe_{0,26}W_{3,48}O_{13,16}$	—
	Органика	$S_{0,06}O_{0,18} + C_{26,43}O_{53,41}$	—

Анализ набора минералов в табл. 3 показывает, что лишайник на рудном отвале (обр. 233) контактирует и взаимодействует с более разнообразным минеральным составом, чем это возможно на нерудном отвале (обр. 235). Однако ни *Stereocaulon* sp., ни *Cladonia gracilis* (L.) Wild. не ассимилируют тяжелые рудные металлы. Рудные минералы – самородное серебро, шеелит, вольфрамит, халькопирит, магнетит и чрезвычайно редкий ирарсит – остаются нетронутыми лишайником, если не считать появившихся на них следов органики в форме CO, CO₂, SO₃ или в неясной форме этих элементов. Накипной лишайник вообще слабо воздействует на подложку: калишпат только «приклеен» к нему органическими ферментами.

На основании выполненной работы можно сделать вывод о том, что лишайники, поселяющиеся на горных породах, используют породы не только в качестве опоры, но и в качестве вещественного субстрата с которым осуществляется химическое взаимодействие. При взаимодействии лишайников с минералами происходит обогащение углеродом железо-оксидных пленок на минералах, а лишайников – такими элементами, как Fe, S, Si (иногда также Mg, Al, K, Mn). Тяжелые металлы (W, As, Zr, Ag, Ir) не используются растущим организмом, они токсичны для него, поэтому шеелит, серебро и некоторые сульфиды при обработке их ферментами сохраняются в неизменном виде. Описанные взаимодействия минералов и лишайников характеризуют зарождение начальных элементов будущего биогеоценоза.

Отдельные вопросы изложенного материала обсуждались на Международном минералогическом семинаре в г. Сыктывкар в 2011 г. и на III Международной конференции «Biosphere Origin and Evolution» в Греции в 2011 г.

Авторы выражают благодарность И.Ф. Скириной за таксонометрическое определение лишайников [4] и В.В. Кононову за фотографию образцов под бинокляром.

Литература

1. Горленко В.М., Дзюба М.В., Малеева А.Н., Пантелеева А.Н., Колганова Т.В., Кузнецов Б.Б. *Magnetospirillum aberrantis* sp. nov. – новая пресноводная бактерия с магнитными включениями // Микробиология. 2011. Т. 80. № 5. С. 679-690.
2. Иванова В.Л. Природные системы и геоэкология. Владивосток: Дальнаука, 2000. 83 с.
3. Иванова В.Л., Медведева Л.А., Афанасьева Т. Б., Баринов Н.Н., Карабцов А.А. Результаты геолого-биологических исследований лечебных грязей залива Петра Великого // Успехи наук о жизни. 2009. № 1. С.162-170.
4. Иванова В.Д., Баринов Н.Н., Скирина И.Ф. Фрагмент биоминеральных взаимодействий на рудных отвалах // Минералогические перспективы. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ Уро РАН, 2011. С. 49-51
5. Изотов В.Г., Ситдикова Л.М., Аухатов Я.Г. Типоморфизм фрамбоидальных выделений пирита флюидоупоров нефтяных месторождений // Минералогия и жизнь. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ Уро РАН, 2007. С. 97-98.
6. Кумова Н.Г. Биогенное минералообразование с участием микромицетов // Структура и разнообразие минерального мира. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ Уро РАН, 2008. С. 339-340.
7. Куликова Н.Н., Сатурин А.Н., Сайбаталова Е.В., Бойко С.М., Воднева Е.П., Тимошкин О.А., Лиштва А.В. Геологическая и биогеохимическая роль накипных водных лишайников оз. Байкал // Геохимия. 2011. № 1. С. 71-80.
8. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии гипергенеза. Владивосток: Дальнаука, 2000. 336 с.