УДК 631.48

ПОЧВОПОДОБНЫЕ ЭНДОЛИТНЫЕ И ГИПОЛИТНЫЕ СИСТЕМЫ: ОТ МАКРО- ДО СУБМИКРОСТРОЕНИЯ

Н.С. Мергелов, И.Г. Шоркунов, А.В. Долгих, В.А. Шишков, Э.П. Зазовская, В.О. Таргульян, С.В. Горячкин

Институт географии РАН, Москва

В работе представлены исследования строения и состава эндолитных и гиполитных систем на всех уровнях организации – от макро- до субмикро; обсуждается вопрос их почвоподобия; освещается комплекс процессов биохимического выветривания под воздействием цианобактериальных биопленок, образования карбонатов и оксалатов *in situ*, миграции соединений железа; рассматриваются особенности пространственного распределения почвоподобных морфотипов эндолитных систем в различных ландшафтах планеты.

Ключевые слова: биокосные системы, почвоподобные тела, органо-минеральные взаимодействия.

ENDOLITHIC AND HYPOLITHIC SOIL-LIKE SYSTEMS: STRUCTURE AND COMPOSITION AT MACRO-SUBMICRO LEVELS

N.S. Mergelov, I.G. Shorkunov, A.V. Dolgikh, V.A. Shishkov, E.P. Zazovskaya, V.O. Targulian, S.V. Goryachkin

The paper presents a detailed study on structure and composition of endolithic and hypolithic systems. The following issues are discussed: morphology at macro to submicro levels, biochemical weathering, formation of carbonates and oxalates in situ, migration of Fe compounds, and spatial patterns of endolithic systems. Endolithic and hypolithic systems have major features attributed to soils: (a) rock layer exposed to external abiogenic factors, (b) lithomatrix inhabited by living

organisms which are synthesizing and decomposing organic matter, (c) as a result initial parent rock (lithomatrix) is transformed in situ by biogenic and abiogenic factors, the products of transformation are retained and/or removed, the vertical heterogenity is established in a form of microhorizons composing microprofile. Examined profiles of endolithic systems in granitoids of East Antarctica with high quartz content had clear eluvial-illuvial differentiation patterns. Similar patterns have been discovered in different landscapes from the Plateau Ozark in Missouri to the Table Mountain in South Africa.

Keywords: soil-like body, endolith, hypolith, organo-mineral interactions

Введение. Эндолитные и гиполитные биокосные системы часто не осознаются в качестве почвоподобных образований. Вместе с тем они являются предшественниками более развитых почвенных тел или равновесными с внешними факторами почвподобными системами в некоторых районах планеты с экстремальными условиями, например в криптогамных пустошах Восточной Антарктики. При различных внешних стрессах развитие биоты на дневной поверхности пород угнетается. Организмы находят свою экологическую нишу внутри скал (эндолиты) или под каменными мостовыми (гиполиты) (Chan et al., 2012; Pointing et al., 2012, Мергелов et al., 2012). Доминирующей автотрофной компонентой таких биотических комплексов являются цианобактерии и зеленые водоросли, существующие преимущественно в виде биопленок. Они способны к первичной продукции органического вещества при ограниченных уровнях освещенности, например, в приповерхностных слоях гранитов, гнейсов и песчаников, где присутствуют полупрозрачные кварц и полевые шпаты. Понимание строения и процессов в современных эндолитных и гиполитных системах имеет фундаментальное значение, так как они являются ближайшими современными аналогами протопочвенных тел, существовавших на планете до появления высших сосудистых растений с корневыми системами.

Строение и свойства гипо/эндолитных систем. Морфологический портрет эндолитных и гиполитных систем на различных уровнях организации (рис. 1) и образующиеся продукты органоминеральных взаимодействий во многом схожи. Общее свойство эндолитных и гиполитных систем – первичная продукция, последующее накопление органического вещества, а также наиболее интесивные биоминеральные взаимодействия, происходят не на поверхности, а внутри минерального каркаса. Такие климатические параметры как недостаток влаги, ультрафиолетовое излучение А и В, коррадирующий ветер полностью или частично препятствуют первичной продукции органического вещества и образованию органогенных горизонтов на поверхности рыхлых и скальных субстратов. Снижение климатической экстремальности происходит благодаря литогенному фактору (укрытие от ветра и иссушения, кварцполевошпатовый фильтр ультрафиолета, дополнительный инсоляционный нагрев): либо внутри скал под десквамационными плитками (рис. 1а,в), либо в рыхлых отложениях под каменными мостовыми (рис. 1б,г), где и формируются органогенные горизонты.

Живая и мертвая биомасса организмов организуется в виде отдельного микрогоризонта в пределах 1-2 см от поверхности для эндолитной системы и 2-5 см для гиполитной и покрывает зерна минералов биопленками толщиной до десятков микрон. Компоненты органического вещества участвуют биохимическом выветривании силикатов, новообразовании минералов, а также оструктуривании выветрелой минеральной массы. Такие функции гипо- или эндолитного органогенного горизонта роднят его с «классическими» поверхностными органогенными горизонтами почв. Органическое вещество слабо гумифицировано. Содержание углерода варьирует в пределах 0,1-10%, азота – 0,01-1%. Биопленки – это основная форма существования криптогамных и микробных комплексов (выявляются на различных уровнях: рис. 1д, е – мезо-, 1ж, з – микро- 1и, к – субмикро-). Они состоят из клеток, погруженных во

внеклеточный полимерный матрикс. Практически каждое зерно кварца, полевого шпата, граната или биотита покрыто микроэкосистемой пленочного типа (цианобактерии, хлорофиты, миромицеты и др.). На рис. 1д, е виден результат деградации идиоморфных зерен кварца в «зализанные» пластинчатые формы под воздействием цианобактериальной биопленки. Ее потенциал по преобразованию минеральной поверхности крайне велик, например, при фотосинтезе цианобактерий pH локально поднимается до 9,0, что способствует растворению кварца (образованию аморфного кремнезема). Интегральные показатели pH, измеренные по стандартной почвенной методике, часто не информативны для описания взаимодействия биопленки с минералом на микроуровне. При взаимодействии биопленок с минеральной поверхностью образуется новый продукт – органоминеральные пленки. Они являются инситными микропродуктами биохимического выветривания/почвообразования и выявляются преимущественно тонкими методами сканирующей или трансмиссионной микроскопии, микротомографии, рентгеновского микроанализа и т.д.

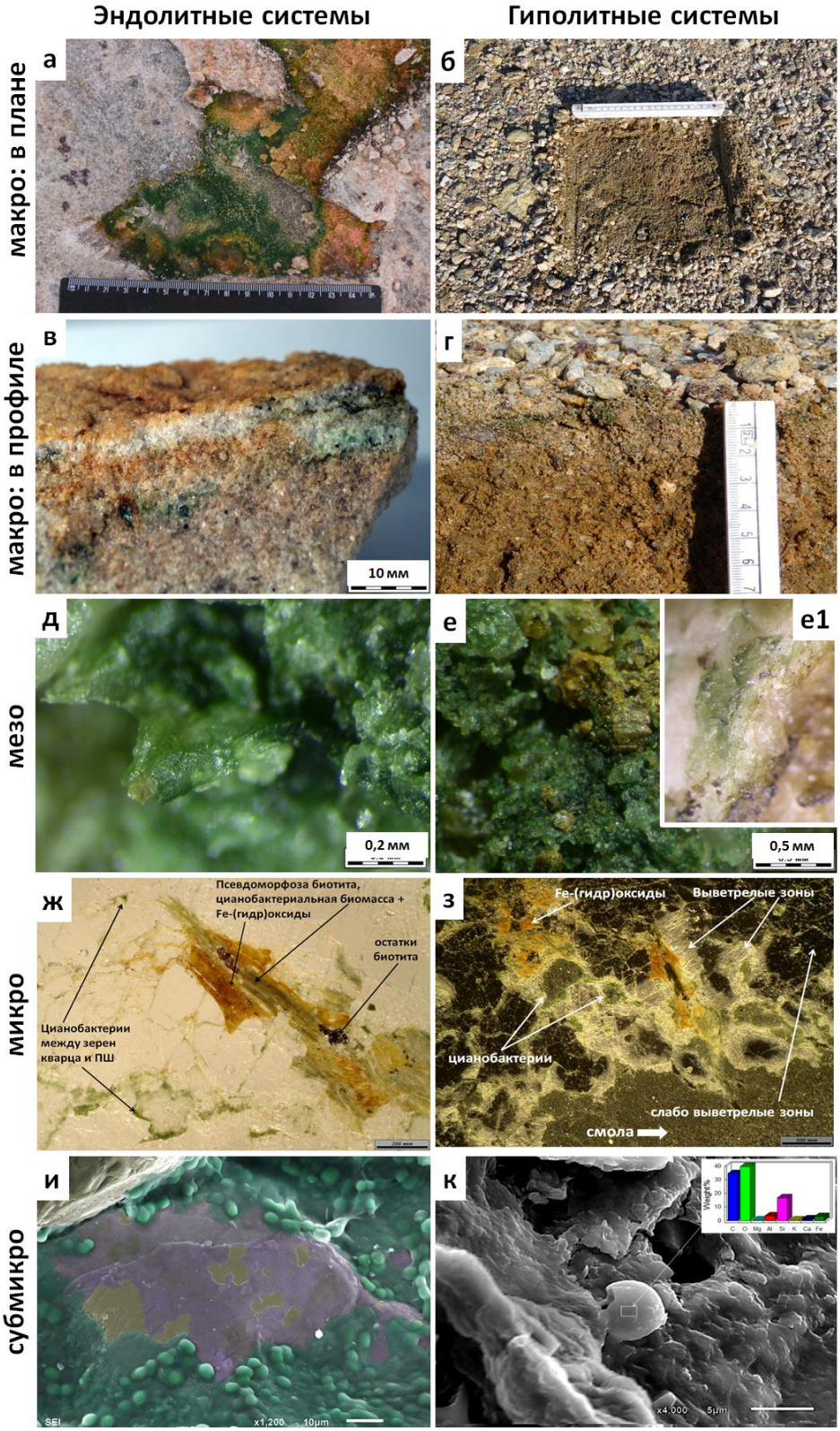

Рис. 1. Примеры строения эндолитных и гиполитных систем на различных уровнях организации (на гранитах и гнейсах в Восточной Антарктике, объяснения даны в тексте).

Отдельные клетки в гипо/эндолитных системах частично фоссилизированы (рис. 1к), минерализации подвергается и внеклеточный матрикс; основным *минеральным* элементом, входящим в состав органоминеральных пленок, является кремний. В их состав также входят следующие элементы: C (до 50%), O, Al, Fe, K, Ca, Na, Mg. Очевидно, что состав органоминеральных пленок обусловлен составом биопленок и первичных минералов, с которыми они реагируют. В эндолитных системах нами зафиксировано образование карбонатов *in situ* при взаимодействии цианобактериальных пленок с содержащими Ca и Mg минералами породы (рис. 2а,б), а также образования оксалатов под воздействием эксудатов эндолитных и гиполитных протолишайников (рис. 2в,г).

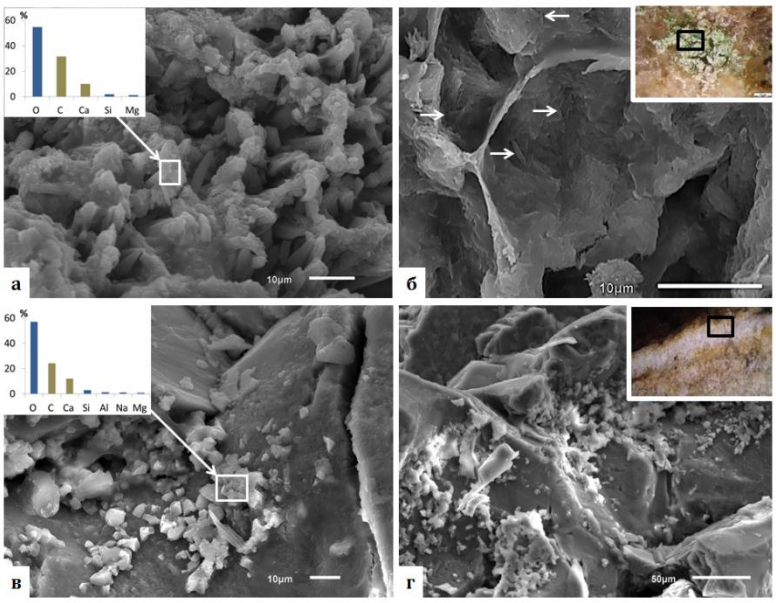

Рис. 2. Инситные продукты органо-минеральных взаимодействий в эндолитной системе: а – кристаллы карбонатов на внешней части цианобактриальной биопленки; б – образование кристаллов карбонатов во внеклеточном полимерном матриксе биопленки (отмечено стрелками); в, г – оксалаты в осветленном элювиальном горизонте (Mergelov et al., 2016).

Элювиально-иллювиальный морфотип эндолитных систем. При функционировании эндолитного сообщества в теле массивно-кристаллических пород в ряде случаев возникает феномен формирования элювиально-иллювиально дифференцированных почвоподобных микропрофилей (рис. 3).

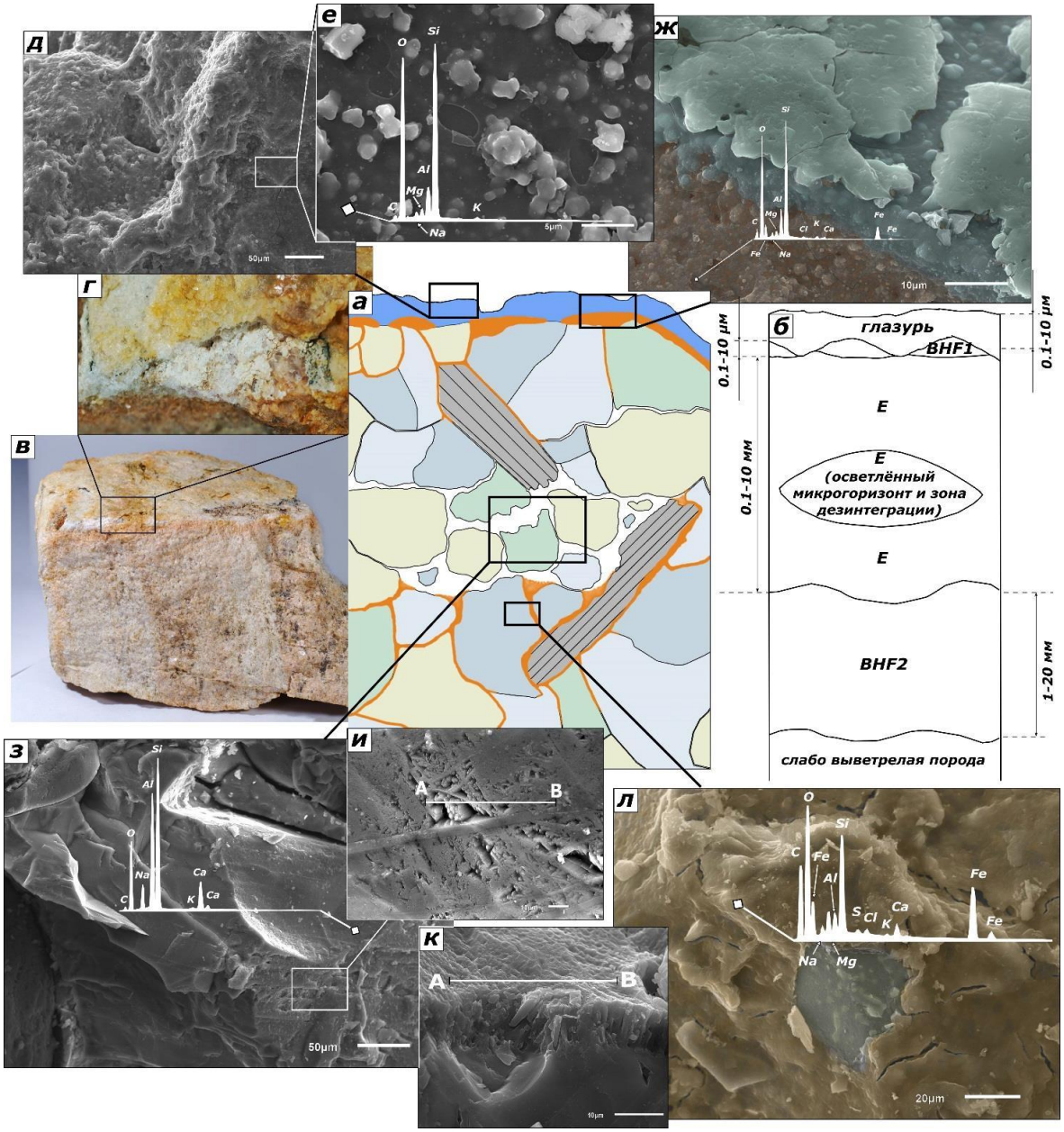

Рис. 3. Структурная организация элювиально-иллювиально дифференцированного микропрофиля в эндолитной системе: модель и элементы строения микрогоризонтов

а) графическая внемасштабная модель строения микропрофиля, где

- зёрна кварца; - зёрна амфиболов; - глазурь;
- зёрна полевых шпатов; - зёрна биотита; - микрогоризонты BHF;

б) схематическая внемасштабная модель горизонтного строения микропрофиля;

в) искусственный субвертикальный скол исходной породы с эндолитным микропрофилем, субпараллельным поверхности образца (отражённый свет, 5000 К);

г) естественная поверхность микропрофиля: прозрачная глазурь и просвечивающий жёлто- и красно-бурый верхний микрогоризонт BHF; искусственный субгоризонтальный скол: осветлённый (тусклый белый) матовый микрогоризонт, корка протолишайника под десквамационной плиткой, фрагмент колонии цианобактерий (отражённый свет, 5000 К); (продолжение на следующей странице)

д) естественная поверхность микропрофиля, общий вид глазури: крапчато-микрогрядовая текстура, закрытые микропоры, трещины дегидратации (изображение – СЭМ, вторичные электроны);

е) фрагмент поверхности глазури: нанометровая ($n*10^9$ – $n*10^8$ м) слоистая плёнка аморфного оксида кремния с включёнными ассоциатами кристаллов глинистых минералов (снимок, сканирующий электронный микроскоп – СЭМ, вторичные электроны, спектр дисперсии энергии вторичных электронов – рентгеновский микроанализатор);

ж) фрагмент естественного расслоения глазури: голубыми тонами подчёркнуты аморфные кремнекислые слои, тусклый жёлто-красный крап выделяет кремнекислый слой с повышенным содержанием железа в микро- и нанодепрессиях – кровля верхнего микрогоризонта BHF (тонированный снимок, СЭМ, вторичные электроны);

з) искусственный скол осветлённого элювиального микрогоризонта: скол зерна полевого шпата (центр снимка и часть первой четверти), естественная кавернозная поверхность зерна полевого шпата – альбит-анортитовый ряд (центр снимка и часть четвёртой четверти), естественные скруглённые, кавернозные поверхности зёрен кварца (края первой и третьей четверти) – СЭМ, вторичные электроны);

и) фрагмент кавернозной поверхности полевого шпата (альбит-анортитовый ряд) в плане; A-B – направление скола (СЭМ, вторичные электроны);

к) искусственный скол зерна, перпендикулярный поверхности: кавернозный профиль в полевом шпате; A-B – направление скола (СЭМ, вторичные электроны);

л) естественная поверхность зерна кварца в нижнем микрогоризонте BHF: тонкая аморфная кремнекислая плёнка на поверхности зерна (подчёркнута серым тоном с тусклым жёлтым крапом), перекрытая мощной (1-4 μм) аморфной кремнекислой плёнкой сложного состава с высоким содержанием железа и углерода (тусклый красновато-бурый тон) – тонированный снимок, СЭМ, вторичные электроны.

Ранее методом рентгеновской компьютерной микротомографии (Мергелов и др., 2013) было показано, что субаэральный сегмент гранитоидов с поверхностными эндолитными системами в оазисах Восточной Антарктики имеет не герметичный минеральный каркас, который проницаем для растворенных продуктов выветривания. В сочетании со сканирующей электронной микроскопией в гранитоидах были выявлены очаги выветривания и скопления биопленок внутри и под десквамационными плитками, которые соединены тонкими субвертикальными трещинами, восходящими к дневной поверхности и такими же тонкими субгоризонтальными. Сеть трещин также соединяет светлые обезжелезненные зоны с нижележащими зонами с повышенным содержанием железа и локусами ожелезнения на дневной поверхности. Трещинная сеть служит транспортной системой при переносе элементов во внутреннем объеме верхних 1-2 см гранитоида, что позволяет

сформироваться дифференциации по элювиально-иллювиальному принципу. В частности, по транспортной сети возможна восходящая миграции железа в растворенной форме к поверхности плитки, к окислительному геохимическому барьеру. Мобилизация/осаждение соединений Fe может происходить при редких событиях увлажнения и последующего длительного иссушения поверхности гранитоидов в Антарктиде. Этот процесс приводит к уникальному результату – в гранитоиде (массивно-кристаллической породе) образуются микропрофили, морфологически и функционально напоминающие строение подзола. Однако, они оказываются на два-три порядка меньше по сравнению с классическими подзолами.

Элювиально-иллювиально дифференцированные микропрофили в плотных породах различных ландшафтов. Распространенная гипотеза о том, что эндолитные системы приурочены исключительно к экстремальным условиям среды, по-видимому, нуждается в корректировке. Нами обнаружено, что в результате функционирования эндолитных и эпилитно-эндолитных систем с участием микроскопических грибов, актиномицетов, цианобактерий и (прото-) лишайников на кварцитовых и железистых песчаниках в различных природных обстановках также происходит элювиально-иллювиальная дифференциация верхней части пород (1-5 см), прежде всего по Fe и органическому веществу, формируются светлые элювиальные зоны и закладываются микропрофили почвоподобных тел, сходные с макропрофилями подзолов. Элювиально-иллювиально дифференцированные микропрофили в плотных породах обнаружены нами в таких не экстремальных и благоприятных для развития наскального или напочвенного растительного покрова условиях, как леса и прерии Миссури (на раннепалеозойских светлых песчаниках плато Озарк) или мелкокустарниковые ландшафты Южной Африки (на среднепалеозойских песчаниках и кварцитах Капских гор) (рис. 4).

Наиболее яркий пример – повсеместное образование под воздействием эпилитно-эндолитных лишайников светлого элювиального слоя (2-10 мм) на

песчаниках Столовой горы в Южной Африке. Именно этим процессом объясняется *светло-серый* цвет преобразованных поверхностей скальных обнажений на Столовой горе, которая изначально (выше уровня гранитного основания) практически полностью сложена *палевыми* и *красными* песчаниками.

Так же, как и в классических подзолах, которые широко распространены на Земле, и, несмотря на существенные различия, в целом объединены общим процессом, образование светлых элювиальных горизонтов в плотных породах происходит по схожему механизму в различных природных обстановках. Основную роль в формировании элювиальных зон в приповерхностном объеме скал играет миграция элементов по микротрещинной сети между различными компонентами эндолитных и эпилитно-эндолитных систем. Например, между микобионтом и фикобионтом эндолитного лишайника (механизм «биогенной помпы»). Также к дифференциации приводит перераспределение продуктов взаимодействия эксудатов организмов и минералов в результате увлажнения породы осадками и последующего испарения влаги из внутрискального порового пространства. Еще предстоит дать экологическое объяснение возможности функционирования эндолитных систем как в экстремальных местообитаниях, так и в гораздо более благоприятных условиях.

Рис. 4. Элювиально-иллювиальный морфотип эндолитных систем в различных ландшафтах.

Заключение. У эндолитных и гиполитных биокосных систем имеются признаки почвоподобия: 1) слой породы, подверженный воздействию внешних абиогенных факторов, 2) в нем функционируют живые организмы, синтезирующие и разлагающие органическое вещество, 3) в результате воздействия биогенных и абиогенных факторов происходит трансформация исходной породы *in situ*, накапливаются и выносятся продукты трансформации, формируется вертикальная неоднородность в виде пленочных микрогоризонтов, образуется микропрофиль.

Особенности таких почвоподобных систем заключаются в том, что (1) «реактор» биоминеральных взаимодействий находится не на поверхности, а внутри минерального каркаса под десквамационной плиткой или каменной мостовой; (2) основными продуктами почвообразования являются пылевато-песчаный мелкозем и органо-минеральные пленки переменного состава.

В совершенно разных по природным условиям ландшафтах обнаружен элювиально-иллювиальный моротип эндолитных систем. Микропрофили со светлыми элювиальными горизонтами являются аналогами развитых макропрофилей подзолов в рыхлых субстратах, однако на на два-три порядка меньшей мощности. Они почвоподобны подзолам структурно, процессно, но не пространственно, так как занимают необычные позиции в ландшафте (скальные обнажения).

Работы по исследованию эндолитных и гиполитных систем выполнены при поддержке РФФИ, проект №16-04-01776. Связь данных объектов с экстремальными условиями среды изучалась в рамках проекта РНФ №14-27-00133.

Список литературы

Мергелов Н.С., Абросимов К.Н., Корост Д.В., Долгих А.В. Почвы внутри камня: первые результаты микротомографических исследований эндолитных

педогенных образований в Антарктиде / Мат-лы Всеросс. конф. «Практическая микротомография». Почв. институт им. В.В. Докучаева // Москва. – 2013. – С. 70–78.

Мергелов Н.С., Горячкин С.В., Шоркунов И.Г., Зазовская Э.П., Черкинский А.Е. Эндолитное почвообразование и скальный “загар” на массивно-кристаллических породах в восточной Антарктике // Почвоведение. – 2012. – № 10. – С. 1027-1044.

Chan Y., Lacap D.C., Lau M.C., Ha K.Y., Warren-Rhodes K.A., Cockell C.S., Cowan D.A., McKay C.P. & Pointing S.B. Hypolithic microbial communities: between a rock and a hard place // Environmental microbiology. – 2012. – 14(9). – P. 2272-2282.

Mergelov N.S., Shorkunov I.G., Targulian V.O., Dolgikh A.V., Abrosimov K.N., Zazovskaya E.P. & Goryachkin S.V. Soil-like Patterns Inside the Rocks: Structure, Genesis, and Research Techniques. In Biogenic—Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems // Springer International Publishing. – 2016. – P. 205-222.

Pointing S.B., & Belnap J. Microbial colonization and controls in dryland systems // Nature Reviews Microbiology. – 2012. – 10(8). – P. 551-562.