



А.Б. ПТИЦЫН



ПТИЦЫН Алексей Борисович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита). Сфера научных интересов: геохимия, минералогия, геоэкология, биогеохимия. Автор и соавтор около 115 научных работ

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА В ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

# НЕЗАМЕТНЫЕ ТРУЖЕНИКИ

*Цель семинара-экспедиции, прошедшего с 26 августа по 4 сентября 2008 г. в Забайкальском крае, — собрать вместе микробиологов и геохимиков для обмена информацией и обсуждения общих проблем. Мероприятие стало, по сути, продолжением междисциплинарного семинара по проблемам происхождения и эволюции жизни на Земле (2003 г.), который широко освещался в нашем журнале. Экспедиционная форма проведения призвана познакомить участников с уникальными объектами — солеными озерами Забайкалья.*

*В семинаре-экспедиции участвовали 17 ученых из Института микробиологии РАН (Москва), Института общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ), Лимнологического института СО РАН (Иркутск), Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (Пермь), Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита), а также из Университета Южной Богемии (Чехия). Вниманию читателей предлагается статья, в которой автор представил свое видение обсуждавшихся проблем с учетом высказанного в ходе семинара в докладах и дискуссиях*

Эти пузырьки — кислород, выделяемый цианобактериями, одними из первых фотосинтезирующих организмов на Земле. Обилие пузырьков свидетельствует о высокой скорости фотосинтеза. Оз. Доронинское (Забайкалье), 2008 г.



**Б**иосфера включает в себя все формы жизни и все компоненты среды обитания. При рассмотрении эволюции этой сложной самоорганизующейся системы важно для каждого этапа выявить процессы, непосредственно определяющие ее ближайшее будущее. В одних случаях это будут процессы преимущественно физико-химические, в других — биологические. Для исследования сложных биосферных (т. е. возникающих в результате взаимодействия живого и неживого вещества) систем наиболее эффективным является сочетание термодинамического подхода и системного анализа.

Открытые развивающиеся системы описываются аппаратом неравновесной термодинамики И. Р. Пригожина. Именно из термодинамики вытекают законы эволюции таких систем, как биосфера, в результате

**Эволюция биосферы определяется законами саморазвития термодинамически открытых систем и непрерывным взаимодействием ее органической и неорганической частей**

чего в природе случаются события, статистически маловероятные.

Сложные системы обладают свойством эмерджентности (от англ. emergence — возникновение нового), или системным эффектом. По сути, это означает, что свойства системы не сводятся к сумме свойств ее частей: лес — это не скопление деревьев, коллектив — не сумма отдельных индивидуумов.

Новое качество обязано своим появлением взаимодействию составляющих систему компонентов, причем проявляться оно начинает с микроуровней организации (для биологических систем — с уровня ДНК, для неорганических — с уровня атомов, хотя есть мнение, что некоторые свойства минералов закладываются еще на квантовом уровне). Однако эти новые качества невозможно предсказать, просто исследуя низшие, более простые уровни системной организации: для этого требуется использовать подход «сверху вниз». Отсюда представляется логичным при изучении закономерностей развития эволюционирующих систем сочетать подходы «сверху вниз» и «снизу вверх». Строить мо-

Озеро Доронинское расположено в 154 км к юго-западу от Читы. Гидрохимический режим озера уникален не только для Забайкалья, но и для Сибири в целом: его вода характеризуется высокой степенью минерализации (от 35 000 мг/дм<sup>3</sup> на поверхности до 50 000—60 000 мг/дм<sup>3</sup> — у дна). Особенно высока в озере концентрация карбоната и бикарбоната натрия, поэтому оно издавна использовалось для добычи соды. Сегодня, как охраняемое месторождение самосадной соды, не подлежит разработке и использованию

дель системы нужно сверху вниз, а изучать факторы и закономерности ее эволюции — снизу вверх.

## Микробные профессии

Роль живого вещества в геохимических процессах известна со времен академика В. И. Вернадского. Ее особенность заключается не только в очень высоких скоростях обмена веществом с окружающей средой,

На ранних этапах существования Земли происходило интенсивное перераспределение химических элементов. Сегодня наиболее распространенным элементом на нашей планете является кислород (32 мас. %), однако древняя атмосфера и океан были восстановительными.

Окисление атмосферы происходило как неорганическим, так и биологическим путем. Современные данные свидетельствуют о значительной роли микроорганизмов в формировании облика первичной биосферы, в частности в процессе накопления в атмосфере кислорода, чем это признавалось ранее многими биологами и геохимиками. Важно, что продуцирующие кислород фотосинтезирующие бактерии — цианобактерии, или синезеленые — могли жить не только в океане, но и в водоемах суши.

Логично предположить, что зарождающаяся биосфера характеризовалась экстремальными, по сравнению с современными, условиями жизни. Соответственно и микроорганизмы — обитатели этого юного мира должны были относиться к разряду экстремофилов.

В настоящее время условия, схожие с условиями на древней Земле, можно встретить лишь в крайне ограниченном числе местообитаний: подводных и наземных гидротермах (выходах подземных горячих и перегретых вод); гиперсоленых водоемах преимущественно морского происхождения; щелочных, как правило, высокоминерализованных озерах; зонах, загрязненных тяжелыми металлами и радиацией. К таким аналогам древних местообитаний относится и уникальное содовое озеро Доронинское в Восточном Забайкалье, ставшее объектом исследования участников семинара-экспедиции

но и в уникальном свойстве живых организмов, принципиально отличающем их от неорганической материи, — инстинкте самосохранения. Результаты впечатляют: хотя в каждый конкретный момент масса живого вещества на Земле относительно невелика, однако его совокупная масса, произведенная, например, за последние 500 млн лет, превышает массу земной коры!

Весомый вклад в геохимические процессы внесли микроорганизмы. С точки зрения человека, среди них можно выделить несколько «профессиональных» категорий:

- преобразователи геохимических систем (участники круговорота вещества и энергии, процессов окисления-восстановления, образования и разрушения минералов, разделения изотопов и т. п.);

- физико-химические индикаторы геохимических систем;

- очистители окружающей среды (деструкторы загрязнителей).

Первая категория исследована значительно лучше, чем две другие. Так, например, считается, что на заре

биосферы сформировался микробный окислительно-восстановительный цикл, что было вызвано необходимостью сочленения процессов окисления и восстановления. Установлено, что при участии бактерий образуются такие минералы, как карбонаты, фосфаты, сульфаты, сульфиды, оксиды, силикаты, причем по мере накопления знаний этот список постоянно увеличивается.

Бактериальное разложение (деструкция) минералов имеет не только геохимическое, но и практическое значение, так как используется при биоготехнологической добыче металлов. Разделение стабильных изотопов в различных процессах обусловлено наличием энергетических потенциалов (гравитационного, теплового, термодинамического). Надо полагать, что и микробы в поисках энергетической выгоды обогащаются тем или иным изотопом.

Круговорот энергии в природе возможен только при условии ее перехода из одной формы в другую: например, в одну сторону энергия переносится в виде тепла, а обратно – вместе с веществом в виде энергии химических связей. Микроорганизмы участвуют как в процессах концентрирования, так и в процессах рассеивания химических элементов, а также в круговороте энергии, потребляя одни ее виды и выделяя другие.

### Живые индикаторы

Некоторые штаммы микроорганизмов имеют достаточно узкие пределы толерантности (устойчивости) к определенным факторам среды. Поэтому они могут быть использованы в качестве индикаторов условий биогеохимических процессов: температуры, кислотности-щелочности (ацидофильные и алкалофильные микроорганизмы), окислительно-восстановительного потенциала (аэробы, строгие анаэробы), минерализации растворов (галофилы) и т. д.

В перспективе в качестве индикаторов можно также использовать такие пока еще плохо изученные микроорганизмы, как барофилы, существующие при повышенном атмосферном давлении; осмофилы, способные выносить повышенное осмотическое давление (в этом случае речь идет об устойчивости к высокой концентрации какого-то определенного иона – натрия, кальция, калия, селена и т. д.); металлофилы, устойчивые к высоким



О роли живого вещества в геохимических циклах свидетельствует, например, тот факт, что весь объем воды, существующей ныне на Земле, мог за прошедшие 500 млн лет до 50 раз пройти через живые организмы

Придонные высшие водные растения, обросшие цианобактериями. Оз. Доронинское

Участники совещания-экспедиции хорошо поработали на уникальном памятнике природы — содовом озере Доронинское





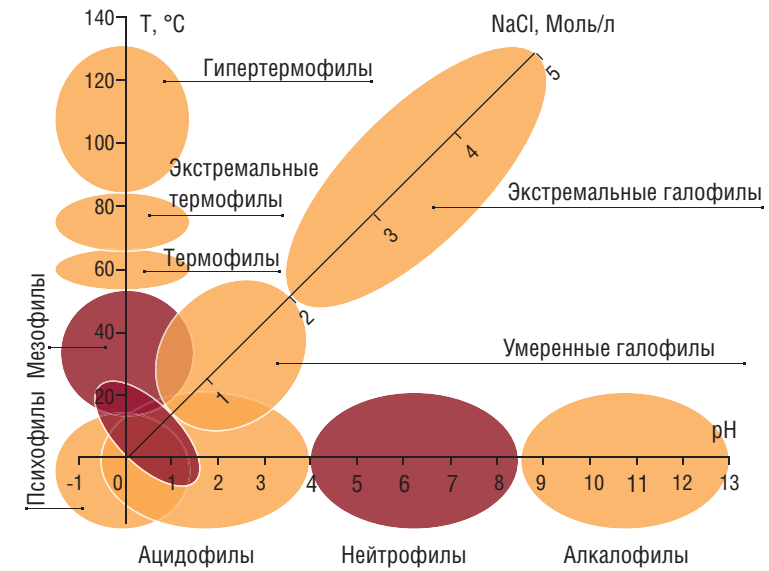
В национальном парке Алханай, а также по берегам и на дне оз. Доронинское в изобилии встречаются глиняные (грязевые) вулканчики

Выделения метана по периферии грязевого вулканчика. Оз. Доронинское

концентрациям тяжелых металлов, и радиофилы, способные выживать при повышенном уровне УФ-излучения.

В настоящее время известны микробные сообщества, функционирующие при температурах от  $-20$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ . А судя по последним данным, верхний предел существования микроорганизмов — около  $+140^{\circ}\text{C}$ . По геологическим меркам такие гидротермы являются относительно низкотемпературными, но ведь в быту мы называем термоустойчивой посуду, способную выдержать нагревание до такой температуры!

**Глиняные вулканчики широко распространены в мире: они встречаются на Кавказе, в Крыму, Италии, Иране, Японии, Исландии, Венесуэле. Их размеры колеблются от десятков сантиметров до десятков метров. Грязевой вулканизм — явление специфическое и пока недостаточно изученное. Характерной его особенностью является приуроченность к осадочным породам, как правило, сравнительно молодого возраста. Многие из описанных в литературе проявлений грязевого вулканизма генетически связаны с нефтяными залежами. По мнению участников семинара, корневая система вулканчиков оз. Доронинское расположена в зоне островной мерзлоты и содержит включения газогидратов (твердых соединений, образующихся из метана и воды при определенных давлении и температуре). Косвенное подтверждение последнего утверждения — наблюдаемое на озере выделение метана. Несомненно, что фактор грязевого вулканизма вносит свой вклад в формирование как физико-химической обстановки содового озера, так и структуры сообщества его обитателей**



Области существования экстремофильных микроорганизмов. (Розовым цветом отмечены условия обитания организмов на оз. Доронинское). По: (В.В. Кевбрину)

**Бактериальное выщелачивание горных пород и руд в природных системах является одной из причин мобилизации и миграции химических элементов, масштабы которой еще предстоит оценить**

Что касается области отрицательных температур, то она таит в себе еще много неисследованного как с микробиологической, так и с геохимической точек зрения.

Криогидрогеохимические процессы принципиально отличаются от геохимических взаимодействий «вода—порода», протекающих при положительных температурах, однако роль микроорганизмов в этих процессах пока не установлена. Более того, нижний температурный предел, при котором возможно существование микроорганизмов, тоже пока не определен.

## Самодостаточные маты

Одна из удивительных форм взаимодействия микроорганизмов с неорганической материей — так называемые цианобактериальные маты, формирующиеся на минеральном субстрате. Пик интереса к этим специфическим образованиям пришелся на 70-е годы прошлого века, когда было показано, что ископаемые строматолиты — каменные образования необычной слоистой структуры — ведут свое происхождение от древних докембрийских цианобактериальных матов.

Маты, по сути, представляют собой практически замкнутое микробное сообщество, состоящее из организмов разной специализации: фотосинтезирующих, аэробов и анаэробов. В благоприятных условиях, как, например, в озере Солар Лейк на Синайском полуострове, маты могут достигать в толщину одного сантиметра и более.

На этом сравнительно небольшом расстоянии окислительный потенциал может меняться от  $-200$  до  $+200$  мВ, а pH — от 7,0 до 9,6, что приводит к чередованию разных геохимических барьеров (например, окислительного и сероводородного) и, соответственно, к формированию специфической зональности. Эти зоны образуются в результате деятельности специализированных групп микроорганизмов, находящихся в постоянном взаимодействии. Основой верхнего слоя — зоны роста мата являются цианобактерии, древнейшие фотосинтезирующие организмы нашей планеты.

Важный элемент дисперсных геохимических систем — водные пленки, адсорбированные на минеральных поверхностях, толщина которых не превышает 20–22 нм. Учитывая, что размеры микроорганизмов существенно больше, подобные образования должны быть микробиологически стерильны. Однако взаимодействие водных пленок и биопленок необходимо изучать, поскольку благодаря своим специфическим свойствам они могут играть важную роль в биогеохимических системах.

Подводя итоги, участники совещания отметили, что подобные междисциплинарные собрания, совмещенные с комплексным изучением конкретных природных объектов, являются продуктивной формой сотрудничества. Ученые надеются, что они будут проводиться регулярно.

В публикации использованы фото автора