

УДК 549

Юшкин Н. П. Структура и проблемы биоминералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2003. 20 с.

Рассматриваются структура минерального и биологического миров, признаки сходства и различия физиоминералов. Изучены и смоделированы процессы биоминералообразования, проанализированы биоминеральные гомологии на атомном, молекулярном, организменном и популяционном структурных уровнях, выявлены механизмы и следствия биоминеральных взаимодействий, установлены основные закономерности коэволюции минеральных и биологических систем. На основе изучения природных углеводов предлагается кристаллизационная концепция зарождения биосферы Земли. Выделен ряд ключевых проблем, входящих в поле охвата биоминералогических исследований.

Редакционная коллегия

Н. П. Юшкин (председатель), А. М. Пыстин (зам. председателя), О. Б. Котова, А. И. Антошкина, А. М. Асхабов, И. Н. Бурцев, Л. В. Махлаев, Н. А. Малышев, Б. А. Остащенко, В. С. Цыганко, Я. Э. Юдович, Н. А. Боринцева

Программа фундаментальных исследований
Президиума УрО РАН:

ПРОБЛЕМА ЗАРОЖДЕНИЯ БИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ЕЕ ЭВОЛЮЦИЯ
(координаторы: академики Э. М. Галимов, М. Е. Виноградов)

Проект: Минеральный организобиоз, биоминералообразование и биоминеральные взаимодействия в истории литосферы и биосферы
(руководитель проекта академик Н. П. Юшкин)

© Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2003

238-28-72
Суров

Живые организмы, являясь мощным геологическим фактором на значительном (не менее 3,8 млрд. лет) отрезке истории развития Земли, играли и играют важную роль в образовании и преобразовании минерального вещества, в формировании литосферы. Для самых верхних частей литосферы биогенные процессы минералообразования являются определяющими.

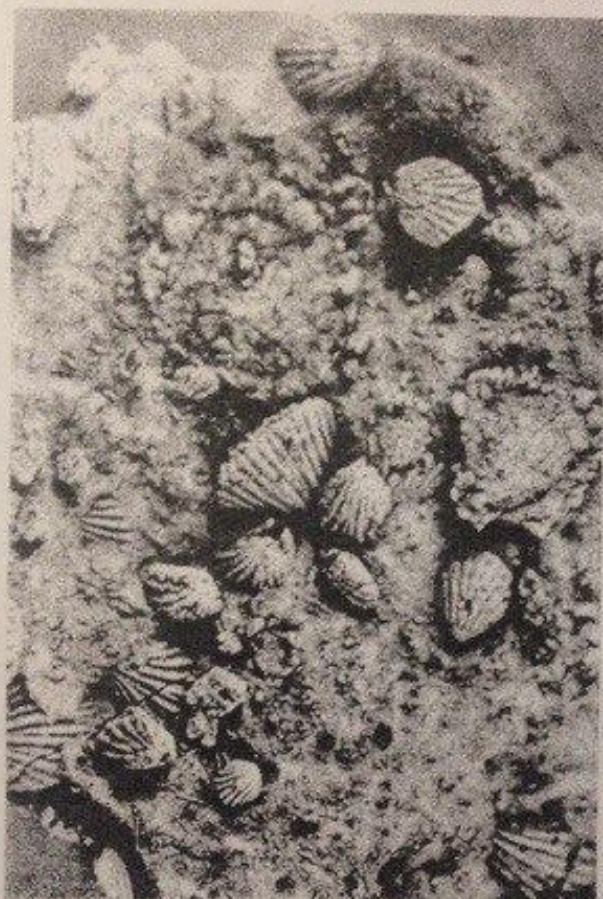


Рис. 1. Раннесилурийские брахиоподы *Nalivkinia costulata* Beznosova

Широко известны минеральные образования, в значительной степени (а нередко и полностью) обязанные своим генезисом жизнедеятельности организмов. К ним относятся карбонатные породы (ракушняки, водорослевые породы и др.) (рис. 1), различные радиоляриты, опоки, диатомиты, погребенные и современные почвы, осадки озер, болотные образования и т.п. При активном участии микроорганизмов формируются седиментогенные, гидрогенные и гипергенные месторождения ряда полезных ископаемых — полиметаллов, меди, марганца, железа, урана, серы, фосфора и др. Около $\frac{3}{4}$ мировых запасов минерального сырья имеют биогенную природу. Микробиологические факторы определяют развитие процессов минералообразования и рудообразования на водонефтяных контактах, в зонах смешения различных типов подземных и поверхностных вод в залежах каустобиолитов.

ОБЪЕКТЫ БИОМИНЕРАЛОГИИ

Процессы и продукты биогенного минералообразования давно рассматриваются как специфические объекты геологических наук, требующие особого методического подхода, специальных методов исследования. За ними укоренились собственные названия: биолиты — в литологии, биоминералы — в минералогии. Сформированы особые научные направления, исследующие эти объекты и процессы их формирования — биогеохимия, биоминералогия, учение о биолитах.

Развитие этих направлений в значительной степени связано с деятельностью В. И. Вернадского, в работах которого проблемы взаимосвязи живой и неживой природы, геологической роли живого вещества были главными, опреде-

ляющими. Он, по сути дела, наметил основные пути, которыми идет сейчас развитие всех биогеологических направлений. Большую роль в изучении биоминерального вещества литосферы сыграл ближайший ученик В. И. Вернадского Я. В. Самойлов.

Именно эти два выдающихся ученых положили начало энергичной деятельности отечественной школы биогеохимиков и минералогов, активными представителями которой были Н. И. Андрусов, М. Б. Вассоевич, А. П. Виноградов, А. Г. Вологдин, Б. Л. Исаченко, С. И. Кузнецов, Б. В. Перфильев, А. В. Сидоренко, А. Л. Яншин. Сейчас биогеологические идеи интенсивно развивают Г. А. Заварзин, М. В. Иванов, А. Ю. Лейн, А. Ю. Розанов, С. А. Сидоренко, А. Ярошевский, А. В. Лапо и др.

Объектами биоминералогии являются *биоминералы — минералы, сформированные живыми организмами, а также при участии организмов или органического вещества.*

Для глубокого и всестороннего познания механизмов и законов биогенеза, законов функционирования и эволюции живого вещества, взаимосвязей живого и минерального миров, очевидно, наиболее продуктивен именно этот «широкий» подход к объектам биоминералогии. Он определяет включение в поля охвата биоминералогии всех минералов, несущих в своей природе тот или иной отпечаток деятельности живого и даже бывшего когда-то живым органического вещества.

Научные представления о биогенных минералах и биоминерализации начали развиваться с 20-х годов 20-го века и оформились в самостоятельное научное направление только во второй его половине, а сам термин «биологическая минералогия» (биоминералогия) введен А. А. Кораго только в 1976 году. Биогеохимия исходит из тех же 20-х годов, но ее развитие началось заданным В. И. Вернадским мощным стартом и достигло полной определенности уже к середине 20-го века. Заметим, что биофизика зародилась в 17 веке, биохимия в 18 веке; оба этих направления структурно оформились еще на рубеже 19—20 вв. Биоминералогия явно запоздала в своем становлении и развитии, скорее всего, потому что развивалась она несколько изолировано от биологии в рамках общего биогеологического направления.

В развитие биоминералогии существенный вклад внесли А. А. Кораго, А. Л. Ковалевский, С. Л. Вотяков, С. Н. Голубев, Д. К. Архипенко, Т. Н. Григорьева, Н. А. Пальчик, В. И. Каткова, Б. Н. и Б. В. Лузгины, В. В. Масленников, А. К. Полиенко, С. С. Потапов, В. И. Ракин, К. М. Седаева, О. В. Франк-Каменецкая и многие другие.

Кроме Москвы и Санкт-Петербурга биоминералогические исследования ведутся в Екатеринбурге, Новосибирске, Сыктывкаре, Томске, Омске, Улан-Удэ и ряде других городов, а на Украине — в Киеве, Луцке, Львове, Одессе.

Широко развиваются биоминералогические исследования и за рубежом. Наиболее важные результаты получили А. Б. Брик, С. Вайнер, Р. Гибсон, В. А. Дякив, В. Зинкин, Ф. В. Зузук, С. В. Кадурич, Дж. Л. Киршвинг, Х. Лоуен-

стам, К. Лонсдейл, М. Павликовский, Я. Парсонс, С. Манн, К. Сайкс, Б. И. Сребродольский, К. Тазаки, А. В. Чепижко и др.

МЕХАНИЗМЫ БИОМИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ БИОМИНЕРАЛОВ

В литосфере Земли известно сейчас более 300 биоминералов. Их число стремительно возрастает в результате исследования новых геологических объектов и освоения новой исследовательской техники.

Анализ накопившейся к настоящему времени обширной информации по биоминералам позволяет классифицировать их по механизмам образования на шесть генетических типов с рядом подтипов в каждом.

Перечислим их с очень краткими пояснениями.

1. *Биоминералы-организмы*. В этот тип мы объединяем открытые в 1892 году Д. И. Ивановским вирусы и подобные им неклеточные системы размером в 200—300 нм с регулярной пространственной структурой белковой оболочки (капсида), в которую включен генетический материал ДНК или РНК (рис. 2). С позиций современной теории минералогии их можно рассматривать как живые минералы. Многие исследователи отводят подобным системам роль переходных между живым и минеральным миром, выделяя в особое царство *Vira*.

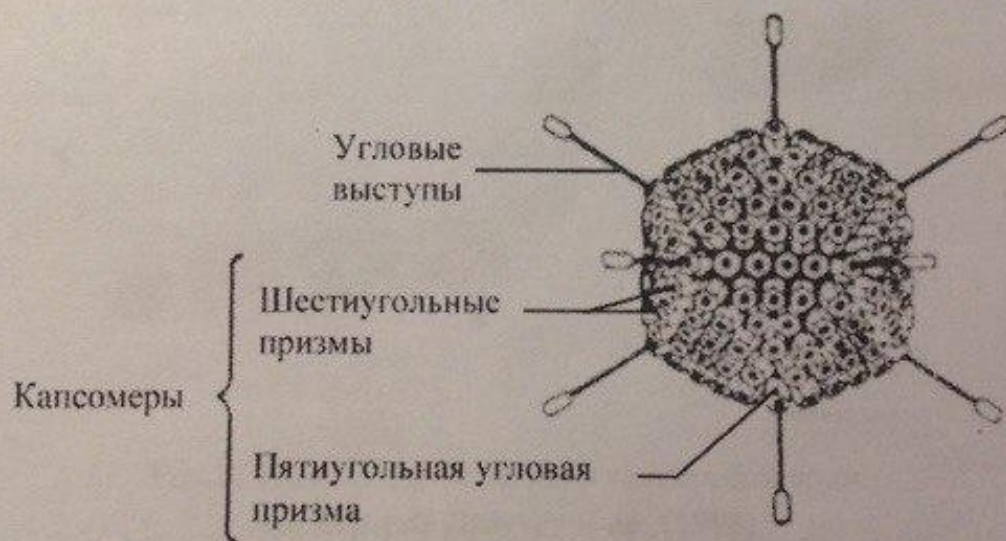


Рис. 2. Структура вируса

2. *Биоминералы, сформировавшиеся в живых организмах (физиоминералы или ортогенные минералы)*. Это наиболее «биологичный» тип биоминералов, в генезисе которых организмы играют определяющую роль. Они являются прямым минералогенетическим следствием жизнедеятельности организмов. В середине 20-го века было известно всего 10 биоминеральных видов, сейчас их число превышает сотню, но количество постоянно увеличивается. Это в основном фосфаты (главным образом апатит, хотя могут быть встречены в организмах

все известные фосфаты, число которых более семидесяти), карбонаты (кальцит, арагонит и др.), оксиды (опал, кварц), оксалаты (уэделлит, уэвеллит), сульфаты (барит, гипс, целестин, гексагидрит), силикаты и другие виды, включая сульфиды и самородные металлы (таблица). Подавляющее большинство физиоминералов имеет небактериальные аналоги, однако, существуют и эндемики: холестерин, ураты, фосфатоксалаты.

Главные элементы биоминералов Ca, Mg, Sr, Ba, C, S, P, Fe, O, S, H.

Все генетическое многообразие этих биоминералов можно подразделить на три подтипа.

А. Биоминералы, физиологически необходимые организму, т. е. составные, функциональные компоненты ряда органов человека и животных. Они входят в состав раковин, костей, зубов, а возможно, и многих других органов, имею-

Минеральные виды в биоминеральных образованиях

Группы физиоминералов	Кристаллы	Химическая формула
Карбонаты кальция	Кальцит, арагонит, ватерит	$CaCO_3$
Фосфаты кальция	Гидроксилапатит, карбонатгидроксилапатит, фторапатит, уитлокит, брушит, октакальций фосфат, двуводный пиррофосфат и др.	$Ca_5(PO_4)_3OH$, $Ca_5(PO_4CO_3)_3OH$, $Ca_5(PO_4)_3F$, $Ca_3(PO_4)_2$, $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$, $Ca_8H_2(PO_4)_6 \cdot 5H_2O$, $Ca_2P_2O_7 \cdot 2H_2O$
Фосфаты магния	Струвит, ньюберит	$NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$, $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$
Оксалаты кальция	Уэвеллит, уэделлит	$CaC_2O_4 \cdot H_2O$, $CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$
Оксиды кремния	Аморфный кремнезем (опал), кварц	SiO_2
Оксиды железа	Ферригидраты, гегит, гематит, магнетит	$FeOOH$, Fe_2O_3 , Fe_3O_4
Самородные металлы	Железо, серебро, золото	Fe, Ag, Au
Элементарная сера	Сера	S
Сульфаты Ba, Ca, Sr	Барит, ангидрит, гипс, целестин	$Ba(SO_4)$, $Ca(SO_4)$, $Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$, $Sr(SO_4) \cdot 2H_2O$
Эндемики органического состава	Холестерин, стеарат Ca, пальмитат Ca	$C_{27}O_{45}OH$, $(C_{17}H_{35}COO)_2Ca$, $(C_{15}H_{31}COO)_2Ca$
	Мочевая кислота и ее соли	$C_5H_4N_4O_3$, $C_5H_2O_2N_4(NH_4)_2$, $C_5H_2O_2N_4Na_2 \cdot H_2O$, $C_5H_2O_3N_4Ca \cdot 2H_2O$
	Ксантин, гипоксантин, цистин	$C_2H_4N_4O_2$, $C_5H_4N_4O$, $SCH_2CH(NH_2)COOH$

щих обычно композиционное органоминеральное строение. Наиболее важной особенностью биоминералов, физически необходимых организмам, является их участие в жизни организмов. А функциональная определенность, заданность механизмов функционирования, непрерывность их действия обеспечиваются строго определенным составом, структурой, текстурой органоминеральных систем, закономерным их зарождением, развитием и изменением в процессе жизнедеятельности организма, ростом за счет вещества, поступающего из внутренней биосистемы, а не из внешней минералогенетической среды.

Физиоминералы редко образуют мономинеральные выделения, они кристаллизуются в основной массе в виде органоминеральных агрегатов. Содержание органического вещества в них колеблется от долей процента (скорлупа яиц), 3—4 % (жемчуг) до 95—99 %.

По локализации физиоминералы подразделяются на внутриклеточные и внеклеточные.

К внутриклеточным относятся кристаллики магнетита (рис. 3), присутствующие практически во всех организмах от магнетотактических бактерий до человека, кристаллики и агрегаты самородной серы в тиобактериях, аморфного окисного железа и гидрогетита в железобактериях и т.п.

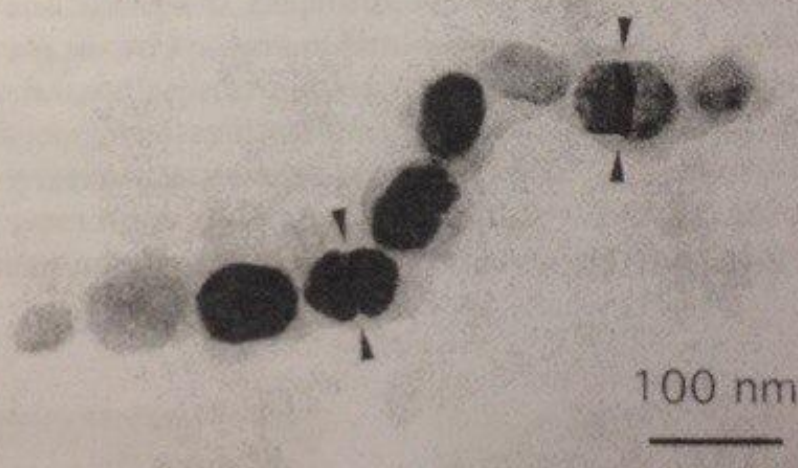


Рис. 3. Кристаллы магнетита в клетках бактерии.
По Бертран Девуару и др. (1998)

Внеклеточные биоминеральные образования формируют внутренний или наружный скелет организмов (катикулярный, экзоскелет).

Минерализованные скелеты радиолярий, кокколитофорид, диатомей, моллюсков слагают мощные пласты горных пород (рис. 4). Интересным скелетным агрегатом моллюсков является жемчуг (рис. 5). Скелеты позвоночных составляют значительную часть массы их тел. Скелет человека, например, весит около 12 кг, лошади — 200 кг. Он состоит на 25 % из коллагена, на 75 % из фосфата кальция.

Важными физиоминеральными образованиями являются зубы, сложенные

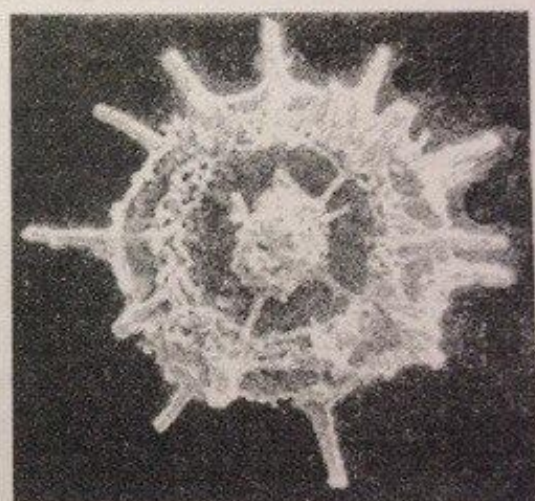
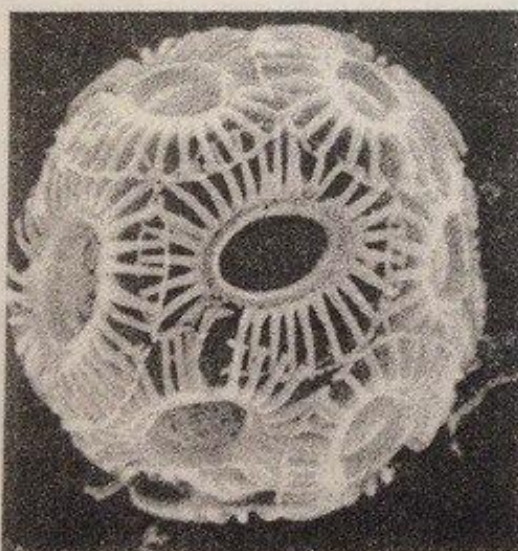
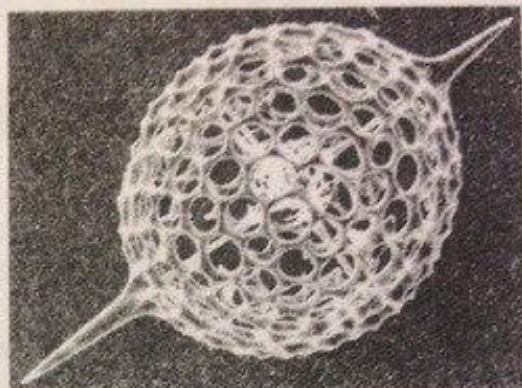
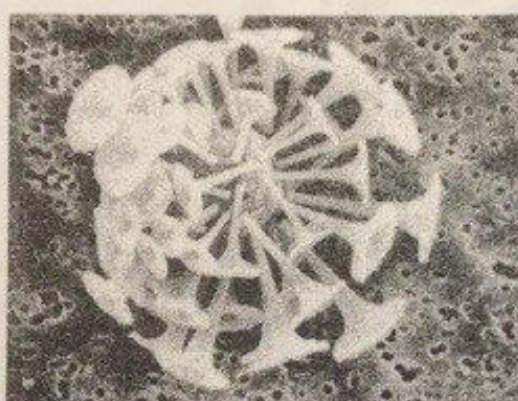
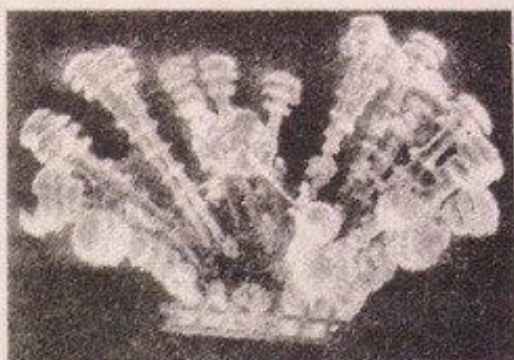
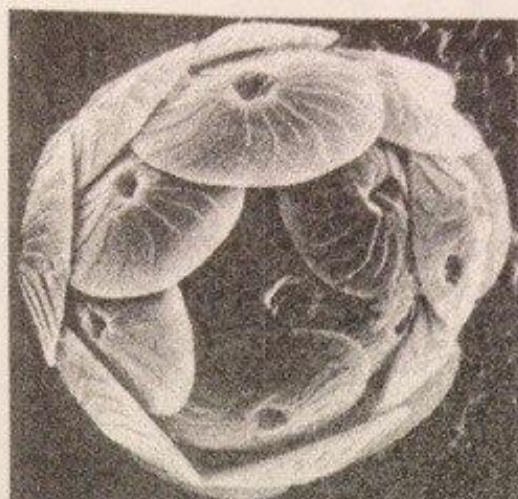


Рис. 4. Кокколиты и радиолярии

в основном гидроксилapatитом, небольшим количеством даллита, хлорапатита, фторапатита, углекита (рис. 6). Ушные камни (отоконии, отолиты), обеспечивающие деятельность вестибулярного аппарата, состоят из минералов с повышенной плотностью: барита, кальций-магниевых фосфатов, гипса, арагонита, кальцита, флюорита, фетерита, фатерита и др. Скорлупа яиц сложена в основном кальцитом. В апифизе мозга человека присутствует мозговой песок, представленный микроскопическими зернами апатита.

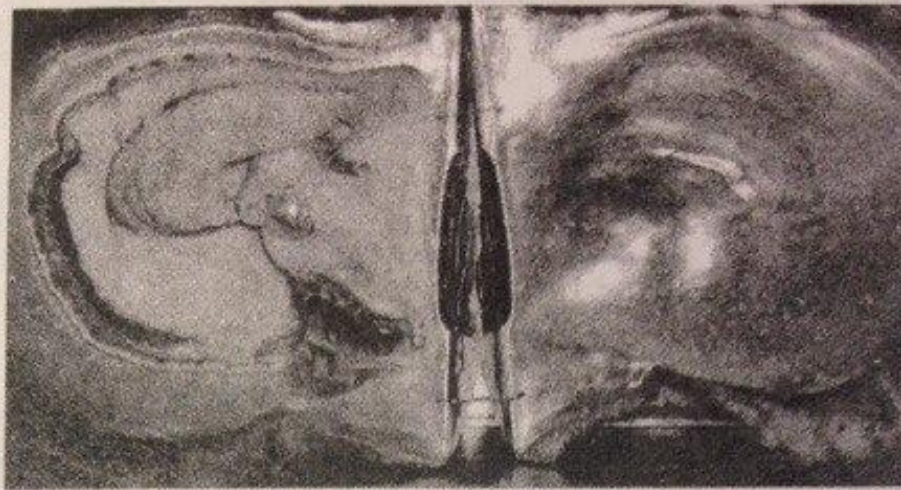


Рис. 5. Морская жемчужница

Очень важную группу минералов представляют фитолиты — биоминералы, формирующиеся в растениях и составляющие до 85 % сухой массы растения. Они образуют внутриклеточную, межклеточную и внеклеточную минерализацию. Известно более 50 фитоминералов. В основном это аморфный кремнезем и кварц, карбонаты, сульфаты, фосфаты, оксалаты кальция, но встречаются и экзотические минералы, например, золото, платиноиды, шеелит, флюорит, уранинит. Очень много в познании фитоминералов сделал А. Л. Ковалевский.

Биоминеральные агрегаты по механизмам формирования разделяются на биологически индуцированные и биологически контролируемые (по Х. Лоуенстаму) или индуцированные и матрицируемые (по Л. К. Яхонтовой). Контроль осуществляется через зарождение (нуклеацию) и через рост индивидов в агрегате, видовой состав и структура зависят от питания, текстура директируется матрицей.

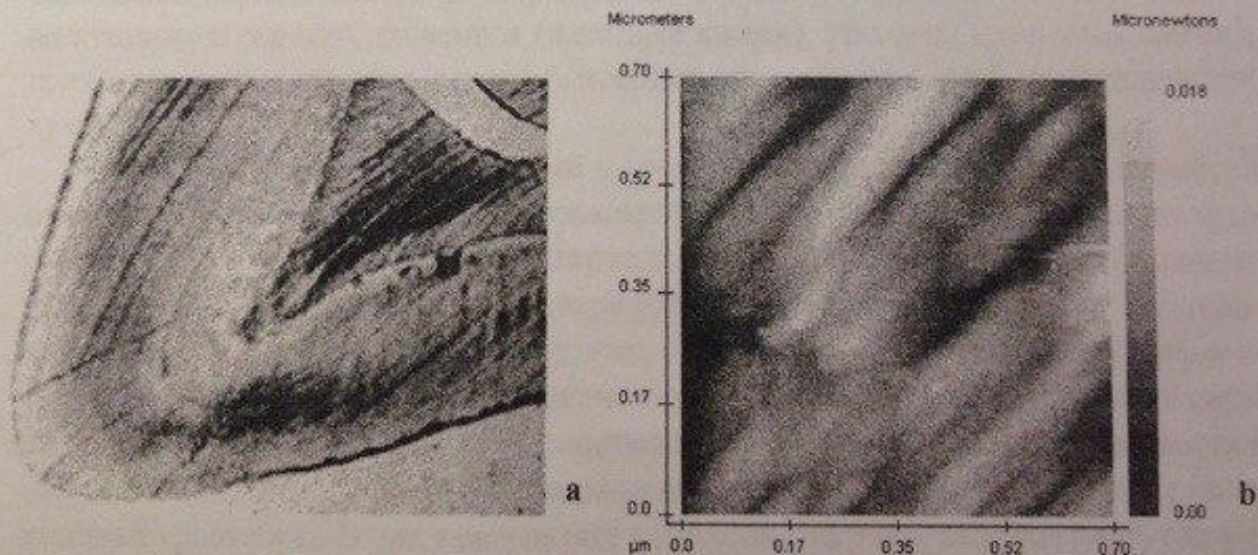


Рис. 6. Фрагмент зуба человека:
 а — сферолито-зональная структура эмали,
 б — АСМ-изображение. Палочковидные индивиды апатита эмали

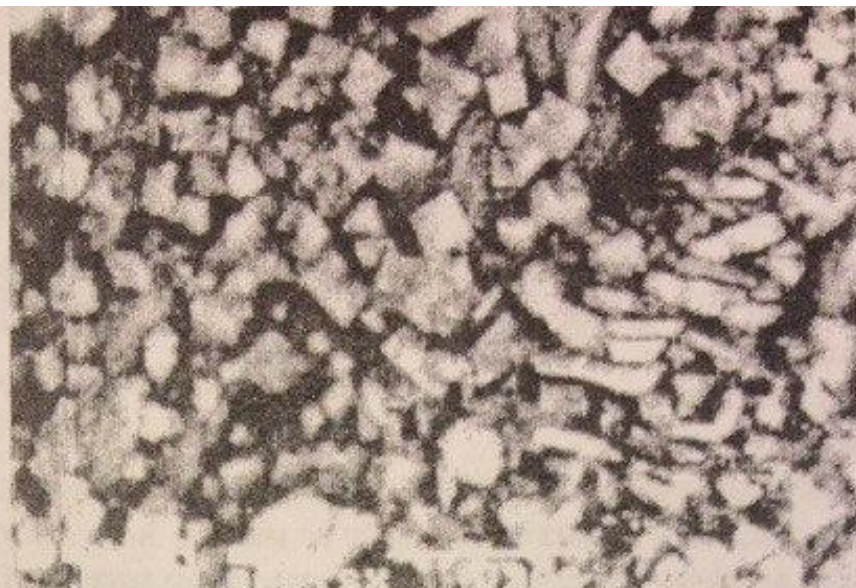


Рис. 7. РЭМ-изображение. Эпигенетические кристаллы уитлокита в эмали зубов человека

По генетическим особенностям и времени формирования физиоминералы в органо-минеральных агрегатах можно подразделить на *сингенетические*, формирующиеся в процессе развития организмов (например, апатит зубов), *эпигенетические* (рис. 7) (например, дентолиты или зубной камень — апатит, брушит, уитлокит и т. п.), *экзогенные* (частицы минералов, занесенные извне, фоссилизированная пыльца), *техногенные* (имплантанты и минеральные продукты их изменения — разрушения).

Биоминералы в организме выполняют следующие функции: конструкционные (скелетные); защитные (экзоскелет); орудийные, агрессивные; ориентационные, сенсорные; ассенизационные, отвальные, очистные.

Эти функции не относятся к жизнеопределяющим и, скорее, могут рассматриваться как дополнительные, подсобные, обеспечивающие экологическую устойчивость и защиту организмов.

Б. Патогенные биоминералы, т. е. не необходимые организму, а возникающие либо в результате нарушений в функционировании организма или его отдельных органов, либо в результате развития организма в аномальной среде с существенными отклонениями по некоторым показателям от соответствующей нормы реакции организма (особенно по химическим показателям). Они представляют своего рода невыведенные из организма «сверхлимитные отходы», химически заблокированные путем их организации в устойчивые кристаллические (биоминеральные) структуры (рис. 8). Этим достигается нейтрализация токсичности «отходов», но возникает физическое несоответствие чужеродных минеральных систем системам биогенным, главным образом, за счет дефицита пространства. Биоминералы замещают, вытесняют ткани, заполняют функциональное пространство почек, легких, желчного пузыря, протоки желез и т. п.,

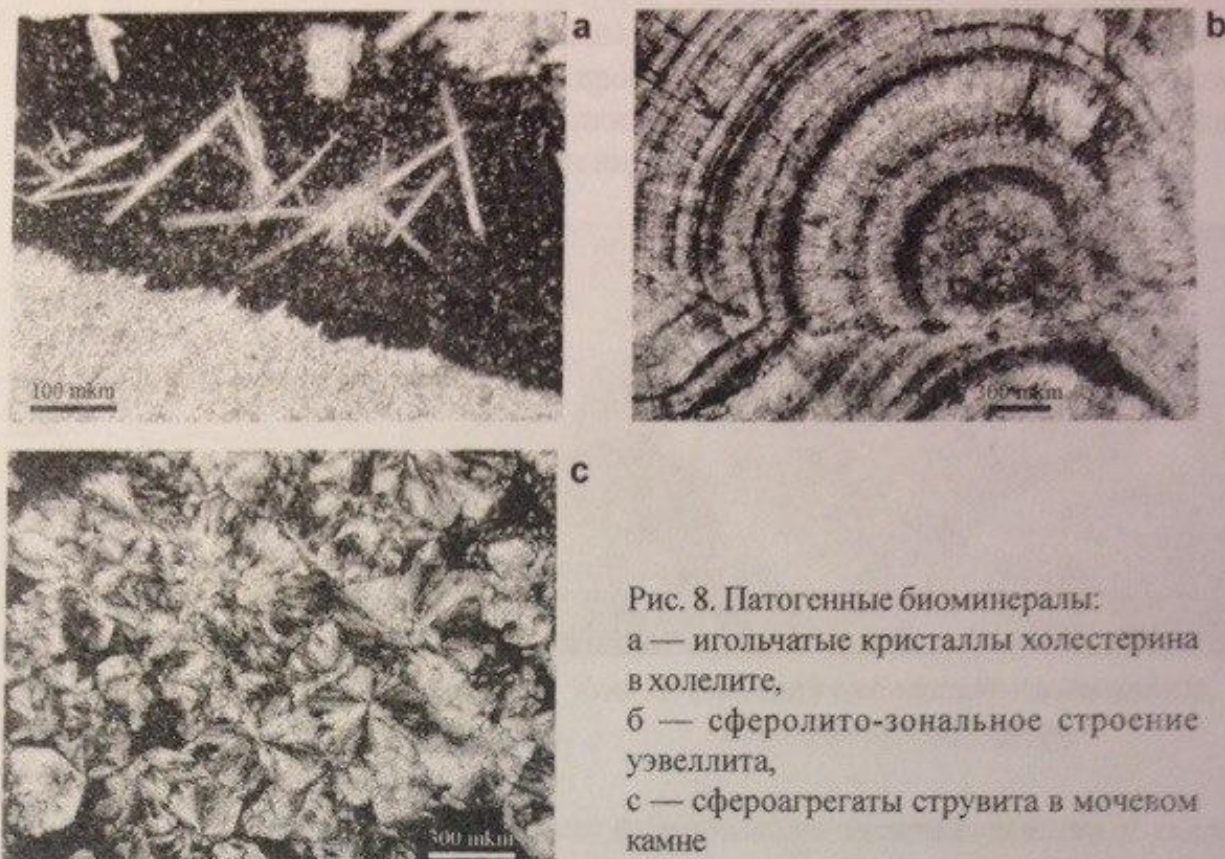


Рис. 8. Патогенные биоминералы:
 а — игольчатые кристаллы холестерина в холелите,
 б — сферолито-зональное строение узвеллита,
 с — сфероагрегаты струвита в мочевом камне

затрудняя работу органов и вызывая физическое их раздражение. С этих позиций они являются вредными, болезнетворными, хотя в целом формирование патогенных минералов — защитная функция организма.

Наиболее типичными патогенными минеральными образованиями являются саливолиты (камни слюнных желез), панкреолиты (камни поджелудочной железы), туморолиты (минеральные отложения в опухолях), пульмолиты (минералы в легких), ангиолиты (минерализация сосудов), кардиолиты (минеральные отложения в сердце), холелиты (желчные камни), уролиты (мочевые камни), интестимолиты (кишечные камни), носовые камни (ринолиты), минерализация хрящей и т. д.

В. Биоминералы, выделяемые в среду как продукты жизнедеятельности организма, широко участвуют в формировании литосферы. Наибольшую продуктивность имеют, пожалуй, бактериальные механизмы подобного биоминералообразования. В качестве примера приведем жизнедеятельность тионовокислых бактерий *Thiobacillus thioparus*, окисляющих сероводород до элементарной серы. Образующиеся микрокристаллические частички ромбической серы размером около 0,1—1 мкм не накапливаются в клетках (рис. 9), а выделяются в окружающую среду, формируя высококонцентрированные гетерогенные (коллоидные) растворы. В них в результате слипания микрокристаллов растут крупные кристаллы или кристаллические агрегаты самородной серы, которая, таким образом, является типичным биоминералом.

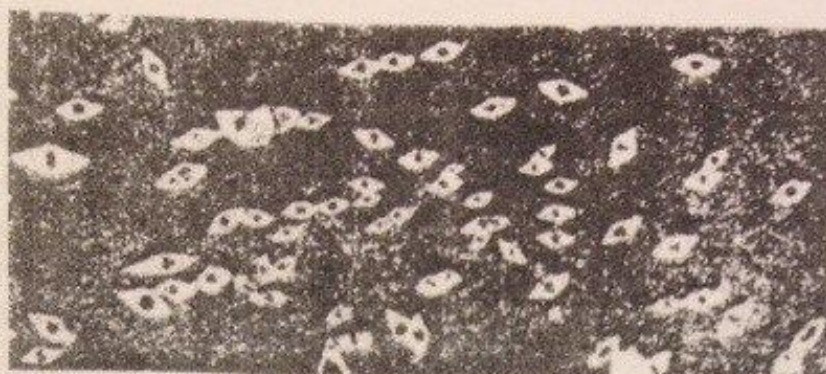


Рис. 9. Биогенные кристаллы серы

сформировавшиеся в результате взаимодействия между продуктами жизнедеятельности организмов, причем не обязательно синхронных, но и живущих в разное время. Примером могут служить гипс и другие сульфаты, образующиеся в результате взаимодействия серной кислоты — продукта бактериального (*Thiobacillus thioparus*, *Thiobacillus ferrooxidans*) окисления элементарной серы или сульфидов с биогенными карбонатами, например с органическим известняком. Такими же биоминералами можно считать различные вторичные фосфаты и сульфопосфаты, кристаллизующиеся в зоне гипергенеза в результате воздействия биогенной серной кислоты на биогенные фосфориты.

Б. Биоминералы, сформировавшиеся в результате взаимодействия между биогенными продуктами и неорганическими веществами, отличаются от предыдущего подтипа тем, что один или несколько из взаимодействующих минералообразующих компонентов имеют небиогенную природу. Например, это те же вторичные сульфаты из зоны гипергенеза, в которых сульфат-ионы биогенные, а анионы имеют первичную эндогенную природу, поступают в минералообразующую среду вследствие химического растворения первичных минералов.

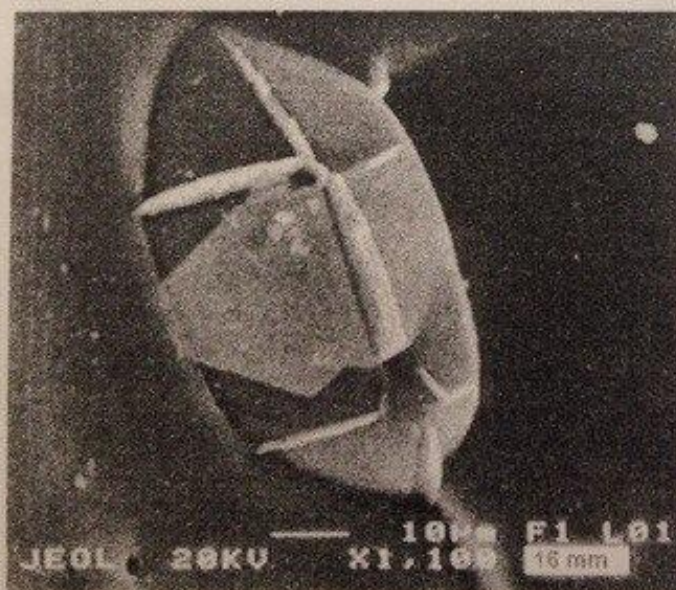


Рис. 10. Включения в шунгите

3. Биоминералы, сформировавшиеся вне организма. Это также очень разнородный генетический и очень масштабный по вкладу в формирование литосферы тип биоминералов, в котором можно выделить два подтипа.

А. Биоминералы,

Генетически интересной и экономически важной является минерализация в биогенных углеводородных породах (каустобиолитах) — торфе, горючих сланцах, каменном угле, шунгитах (рис. 10).

4. Биоминералы, внедренные в организмы. Они, как видно из названия, не относятся к даже косвенным продуктам функционирования живых систем, а связаны с ними единством или последовательностью занимаемого пространства.

А. Псевдоморфные биоминералы — минералы, замещающие

живые организмы, их отдельные органы, а также скопления организмов или выполняющие ранее занимаемое ими пространство. Псевдоморфные минералы или их агрегаты сохраняют, как слепки, форму замещенных ими организмов, иногда сохраняют и многие детали их внутреннего строения (рис. 11).

Существует мнение, что многие фосфаты образуются в результате фосфатного метасоматоза строматолитов, то же относится и к карбонатным марганцевым рудам.

Б. Биоминералы, кристаллизующиеся в свободных полостях организмов, в отличие от минералов предыдущего подтипа, не очень широко распространены, экзотичны. Известны, например, друзочки микрокристаллов кварца в древесной ткани.



Рис. 11. Бактерии с оболочкой гликокаликса, сложенного тодорокитом

5. Биоминералы, образовавшиеся в результате кристаллизации и химических превращений биоорганики. Они имеют углеводородный состав и образуют в минералогической системе класс так называемых органических минералов. Эти минералы имеют кристаллическую структуру в отличие от конденсированных (твердых) некристаллических образований — биоминералоидов.

Примером таких образований является гуано — минерализованные экскременты морских птиц в тропиках или летучих мышей в пещерах. Различают азотное гуано (брушит, органика) и фосфатное гуано (брушит, монетит и др.).

6. Биоминералы, образовавшиеся в результате кристаллизации биоминералоидов. Процессы трансформации некристаллическое твердое (биогенное) вещество → кристаллическое минеральное вещество довольно обычны в природе и приводят к формированию обширного класса биоминералоидов. Например, биогенные рентгеноаморфные фосфаты разного состава при изменении условий или в результате «старения» кристаллизуются в апатит, крандалит, вавелит и другие минералы. Аморфный биогенный кремнезем кристаллизуется в виде кварца.

В углеводородной среде кристаллизуются эвенкит, карпатит, фихтелит и другие органические минералы.

СПЕЦИФИКА МИРА БИОМИНЕРАЛОВ

Очевидно, что биогенные факторы минералообразования должны накладываться на минеральный мир литосферы свой отпечаток, в том числе и кристаллографический.

Мир биоминералов довольно специфичен по составу, и это в первую очередь связано с химическим составом самого живого вещества. Последнее, как известно, за вычетом воды на 99 % состоит из соединений углерода, водорода, кислорода, серы, фосфора, азота. Именно эти элементы являются ведущими и в составе наиболее распространенных биоминералов. Существенны особенности и видового состава биоминералов. По числу биоминеральных видов ведущую роль играют фосфаты. Они вместе с окислами, сульфидами, карбонатами и простыми веществами включают более 90 % всех известных ныне биоминералов. Можно проиллюстрировать это в виде рядов уменьшения числа минеральных видов в соответствующих кристаллохимических классах:

литоминералы:

силикаты → сульфиды → фосфаты → оксиды → сульфаты,

биоминералы:

фосфаты → оксиды → сульфиды → карбонаты.

Эти же классы включают и основную массу биоминерального вещества, но относительная роль их несколько иная: карбонаты → оксиды → фосфаты → сульфаты (перечисляются в порядке убывания весовой доли биоминерального вещества, приходящейся на каждый класс). В литосфере в целом соотношение весового вклада минеральных классов уменьшается в такой последовательности: силикаты → оксиды → гидроксиды → карбонаты. Следовательно, на кристаллохимическом уровне фосфатно-карбонатно-оксидный облик мира биоминералов отличается от силикатно-оксидного облика минерального мира литосферы.

Подобно кристаллохимической, вполне определенно проявляется и кристаллосимметричная специфика биоминералов, т. е. специфика законов пространственной организации составляющих элементов в кристаллическую структуру.

В мире биоминералов по сравнению с литосферой меньше доля минералов средних сингоний и несколько увеличена доля низких. По сравнению же с метеоритами и другими космическими объектами, которые можно с определенной долей условности рассматривать как представителей одной из ранних стадий эволюции минерального вещества, роль низших сингоний усиливается весьма существенно.

Наибольшее число биоминералов (83,34 %) приходится на виды симметрии $m\bar{3}m$, $2/m$, $\bar{1}$, $m\bar{3}m$, $\bar{3}m$, $6/m$ (перечислены в порядке понижения их роли), которые, впрочем, являются ведущими и среди минералов земной коры. Однако среди них виды $m\bar{3}m$ и типоморфно «биологичны»: они выделяются существенно большей предпочтительностью для биоминералов, чем для минералов других систем.

В первом приближении все кристаллосимметричные показатели биоминералов довольно близки к соответствующим показателям для совокупности литосферных минералов. Следовательно, несмотря на разницу в составе, мир биоминералов и минеральный мир литосферы строятся по одним и тем же структурным законам.

Однако если выделить из всей совокупности биоминералов только физио-

минералы, то по всем характерным показателям они оказываются резко специфичными. Так, по распределению кристаллохимических типов, физиоминералы весьма существенно отличаются от литосферы и оказываются неожиданно более или менее близки к структурной организации минерального вещества хондритов.

Во всех эволюционных минералогенетических моделях хондритовое вещество рассматривается как первичное, стартовое, с которого началось развитие минерального мира, нарастание его разнообразия. А физиоминералы, наоборот, представляются как продукты наиболее поздних этапов минералогической эволюции. Следовательно, противоположные концы эволюционного ряда оказываются как бы конвергентно сомкнутыми. Нам представляется, что такой первозданный «метеоритоподобный» структурный облик мира физиоминералов может быть объяснен особенностями механизмов минералообразования в живых организмах, где реакции требуют больших энергетических затрат. Например, кристаллизация сульфидов цинка или восстановление сульфат-иона легко осуществляются микроорганизмами при нормальной температуре и давлении, тогда как в абиогенных условиях они могут протекать лишь при температуре в несколько сотен градусов. Возможно, что высокоэнергетичность — это и есть то общее, что определяет сходство совокупностей космогенных и физиогенных минералов.

Сходство кристаллографической структуры ассоциаций литосферных минералов и биоминералов при их резком отличии от явно абиогенных минералов лунной литосферы или хондритов, подтверждает мысль В. И. Вернадского о том, что биогенный фактор участвует в создании минерального облика литосферы Земли с самых ранних этапов ее формирования.

ПРОБЛЕМЫ БИОМИНЕРАЛОГИИ

Биоинералогия хотя и нельзя назвать новым направлением, но, тем не менее, она лишь недавно вышла из зачаточного состояния и именно сейчас находится на стадии наиболее энергичного развития, стадии формирования ее теоретического и методического аппарата. Можно выделить ряд проблем, которые с нашей точки зрения — ключевые и должны войти в поле охвата биоинералогических исследований:

- биоинералообразование как один из факторов формирования и эволюции литосферы;
- роль процессов биоинералообразования в миграции, концентрации вещества и в формировании месторождений полезных ископаемых;
- поисковое значение биоминералов;
- познание механизмов минералообразования в биоорганизмах и при участии организмов, онтогенеза органоинеральных агрегатов, моделирование процессов биоинералообразования (рис. 12);

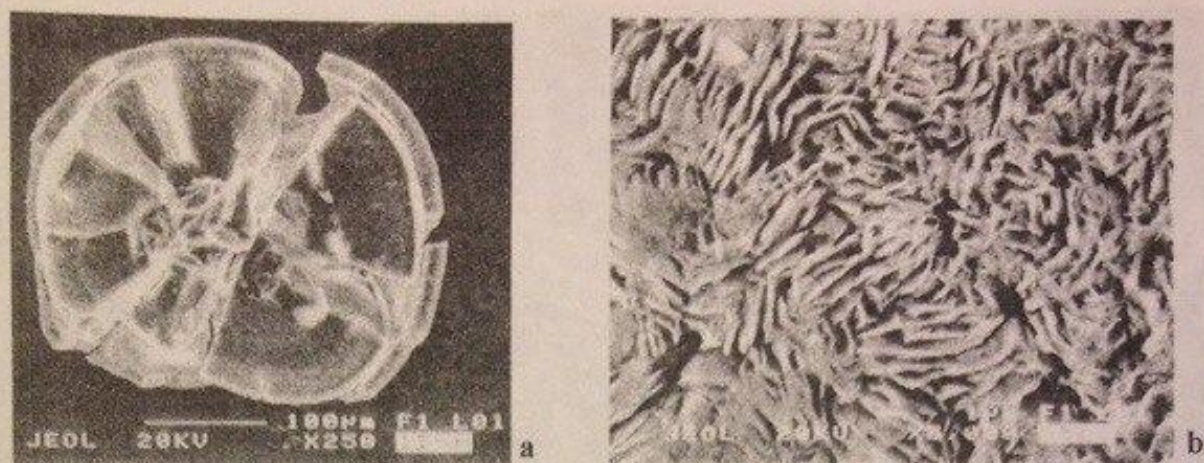


Рис. 12. Биогенный фосфатный агрегат:
 а — структура фосфатного агрегата;
 б — морфология поверхности биогенного кальциофосфата

- биоминеральные технологии извлечения полезных компонентов из руд;
- биосинтез минералов и материалов на минеральной основе, биоминералургия, биоимитация керамик, композитов и других материалов, выращивание биокристаллов;
- биоминералы как экологические индикаторы, информационные каналы из геологического прошлого и биомаркеры;
- биостартовая и биозащитная роль минералов, биоминералы и моделирование жизни.

Биоминералогические исследования могут дать фундаментальную информацию для познания механизмов происхождения жизни на Земле — проблемы, волнующей человечество на протяжении многих веков и столь же далекой от решения, как и в начале.

В основе многих современных концепций происхождения жизни лежит идея биостартовой роли минералов, наиболее отчетливо сформулированная трудами Д. Бернала и А. Дж. Кернс-Смита. Минералы рассматриваются не только как катализаторы неорганического синтеза биополимеров и в роли своеобразных «воспитателей» белков, но и в качестве информационных матриц, структурно-функциональных предшественников гена и даже в качестве протогена.

Исследования природных углеводов неорганического происхождения приводят к убеждению, что предбиологические информационные структуры и предшественники гена надо искать не только среди ионных минералов, резко отличающихся от биологических структур как по составу, так и по конституции, а среди конденсированных углеводородных молекулярных систем (твердых битумов) и органических молекулярных кристаллов, абиогенный синтез которых осуществляется как в условиях Земли, так и Космоса. Среди них встречаются довольно разнообразные структурированные и текстурированные образования.

Углеводородные молекулярные кристаллы — наиболее подходящие предбиологические системы как для создания информационного генетического ап-

парата, так и для развития в простейшие живые организмы (рис. 13). На их базе можно смоделировать автономную ячейку, в которой происходит сборка РНК (или ДНК) и синтез белка. Это первичная частичка жизни, протоорганизм, протогенот — генетический предок всех форм жизни. Местом зарождения жизни могли быть гидротермальные системы, зародыши пегматитов, вулканы, возможно, даже магма, но выпестована жизнь в теплых лужах и в океане.

К созданию жизни привели не случайные события, а вполне определенные законы развития природных процессов, жизнь формировалась как нечто целое, интегрированное, а не в виде разрозненных частей, случайно соединяющихся.

Как известно, в естествознании существуют два главных концептуальных течения в разработке проблемы абиогенеза, т. е. неорганического происхождения жизни: генобиоз, постулирующий первичность молекулярной системы со свойствами первичного генетического кода, и голобиоз, или целлбиоз, базирующийся на первичности структур типа клеточных, наделенных способностью к элементарному обмену веществ при участии ферментного механизма. На основе исследования биоморфных углеводородных структур мы считаем наиболее реалистичным организобиоз, т. е. структурно-функциональное развитие упорядоченных молекулярных углеводородных систем-протоорганизмов в биологические организмы.

Кристаллизационная концепция происхождения жизни заставляет усомниться в абсолютности монофилии, только одноактного жизнезарождения. На основе углеводородных кристаллов и предложенной кристаллизационной модели могут быть найдены пути синтеза не только отдельных компонентов биологических систем, но и простейших организмов, осуществлено экспериментальное моделирование жизни. Концепция углеводородной кристаллизации жизни может стать одним из перспективных междисциплинарных направлений, разработка которого принесет интересные результаты и новые открытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие биоминералогических исследований перспективно не только с позиций совершенствования геологической теории и общей концепции естествознания, но может привести и к серьезным практическим следствиям. Использование биоминералогической информации, несомненно, будет способствовать совершенствованию и углублению прогнозно-поисковых методик, знаний о ряде видов минерального сырья. На основе биоминералогической информации развиваются новые технологические направления: биогеотехнология, биоминералургия, биосинтез минералов, возможно создание биосинтеза кристаллов. Биоминералогия будет полезной в решении ряда сложных проблем взаимоотношения человека и окружающей среды, экологических проблем.

У биоминералогии, следовательно, большое и интересное будущее, но обеспечить его можно только глубокими систематическими, профессиональными

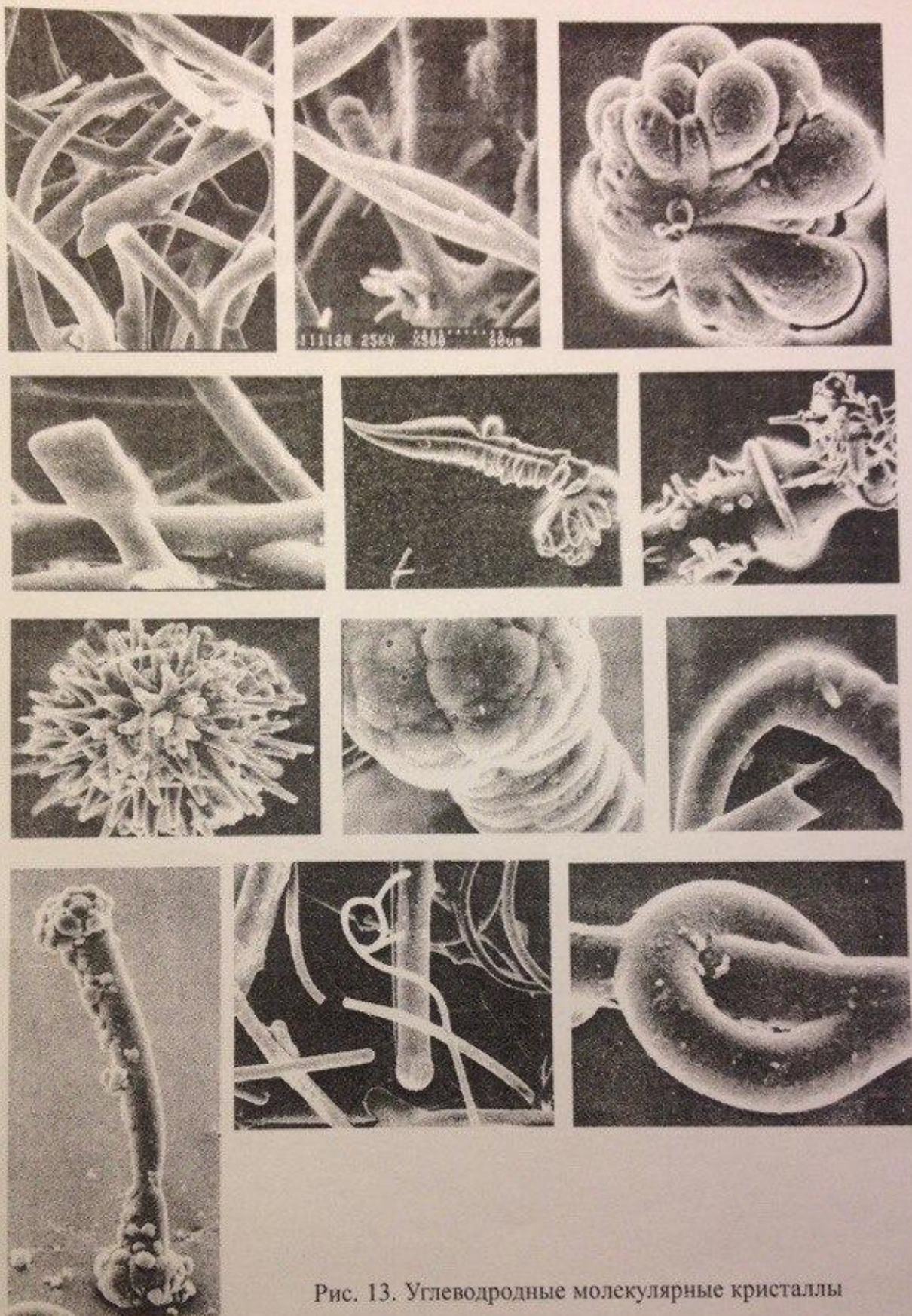


Рис. 13. Углеводородные молекулярные кристаллы

исследованиями, переходом на междисциплинарный уровень. Необходима подготовка специалистов нового типа — биоминералогов, способных вести исследования на стыке биологии и минералогии, хорошо владеющих общей теорией естествознания, биологической и минералогической методологией. Прогресс биоминералогии будет достигаться только через создание в разных городах и институтах системы центров биоминералогических исследований и подготовки кадров биоминералогов, интеграцию геологов, минералогов, биологов, медиков в общих исследовательских программах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 02—05—65019) и НШ—2250.2003.5.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Объекты биоминералогии	3
Механизмы биоминералообразования и генетические типы биоминералов	5
Специфика мира биоминералов	13
Проблемы биоминералогии	15
Заключение	17