

# Шунгиты — самые древние скопления органики

Доктор геолого-минералогических наук  
**Л. Я. Кизильштейн,**  
Ростовский государственный университет

Возраст у нашей планеты солидный — современная наука считает, что ей четыре с половиной миллиарда лет. Однако в течение первых 3,8 млрд. лет поверхность суши оставалась пустынной: ни травинка, ни кустик, ни деревце не оживляли унылый ландшафт, не говоря уж о каких-нибудь букашках. Жизнь теплилась только в океане. Но что это была за жизнь! Видимые только в микроскоп бактерии и водоросли уныло дрейфовали в бескрайней водной стихии. Размножаясь путем простого деления на две части, они не нуждались друг в друге.

Постепенно, очень медленно (как сказал известный голландский геолог М. Руттен, «так медленно, что это почти невозможно себе представить»), жизнь становилась разнообразнее, обильнее. И вот около 570 млн. лет назад она наконец по-настоящему расцвела. Начался фанерозойский этап истории биосферы (от греч. «фанерос» — явный, очевидный, «зоэ» — жизнь), сменив предыдущий, криптозойский этап («криптос» — скрытый), который был в семь раз длиннее, чем фанерозойский.

«Скрытость» жизни на заре ее зарождения объясняется не только тем, что живых организмов в ту пору было очень мало. Просто живые существа обзавелись скелетами и раковинами не сразу. А раз в них не было ничего минерализованного, то следы первых форм жизни оказались уничтожены геологическими процессами, преобразующими горные породы.

Лишь очень немногое по чистой случайности сохранилось, но зато теперь палеонтологи, биохимики и геохимики изучают эти остатки с величайшей скрупулезностью и, применяя тончайшие физические и химические методы анализа, судят по ним о путях развития жизни на Земле. Микрофотографии на рис. 1–3 показывают, как выглядели некоторые виды микроскопических водорослей той поры — ведь именно водоросли были главными компонентами биосферы далекого прошлого.

То, что эти организмы не нуждались в партнерах, не означает, однако, что каждая особь до конца дней оставалась

1

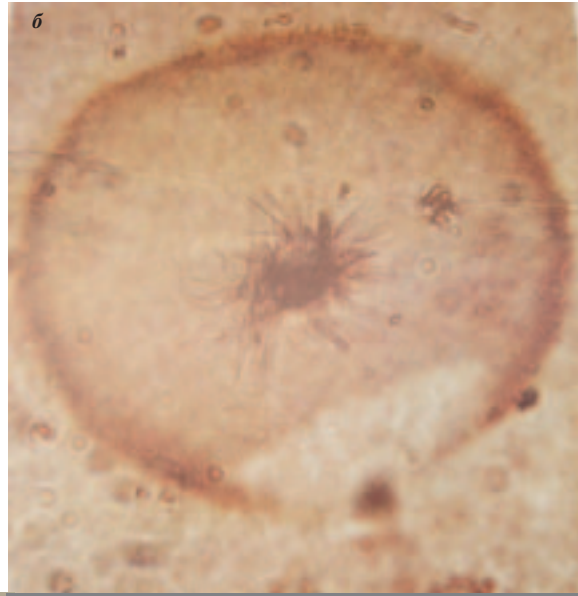
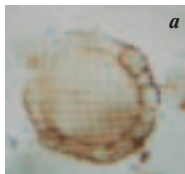
*Микроорганизмы из кремнистых сланцев:*

*а) формации (то есть комплексы горных пород, объединенных общим происхождением) Ганфлинга (Канада, возраст около 2 млрд. лет),*

*б) формации Фиг-Три (Южная Африка, возраст около 3,2 млрд. лет),*

*в) формации Биттер-Спрингс (Австралия, возраст около 1 млрд. лет).*

*Темные пятнышки внутри шаровидных образований — возможно, остатки ядер в клетках первых эукариот. Диаметр образований — около 5 мкм*



одинокой и плавала сама по себе. Некоторые из них объединялись в колонии, — возможно, так было легче держаться на плаву. И хотя подобные колонии оставались микроскопическими, с течением времени, если условия благоприятствовали, в каком-то определенном месте их органические остатки могли накопиться в больших количествах.

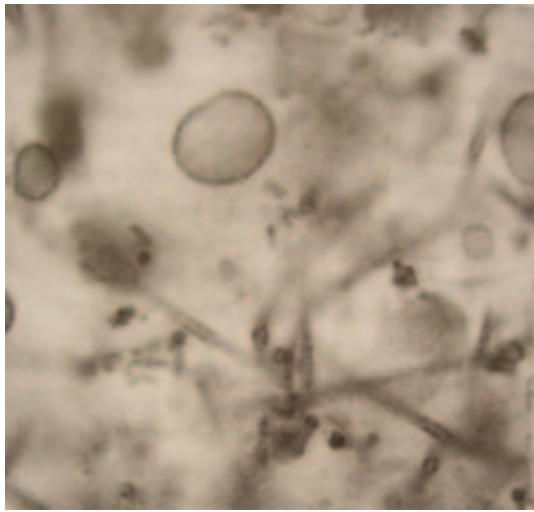
В наши дни, как, вероятно, и в далеком прошлом, подобные скопления образуются на дне озер, мелких морей и лагун. Их называют сапропелем (от греч. «sargos» — гнилой и «relous» — ил). История горючих полезных ископаемых началась именно с накопления илистой массы, которую последующие геологические процессы преобразовали в породы, называемые сапропелитами. Если же сапропель разбавляли значительные количества минерального материала, получались горючие сланцы.

Все производные сапропеля — ценное энергетическое и технологическое сырье. При этом самые древние месторождения горючих сланцев, как считают, возникли в кембрийском периоде палеозойской эры (570 ± 20 млн. лет назад). Куда, казалось бы, древнее? Однако выясняется, что есть и более древние породы, имеющие органическое происхождение. Это шунгиты. За прошедшие эпохи они даже перестали быть горючими полезными ископаемыми, хотя просто полезными все-таки остались.

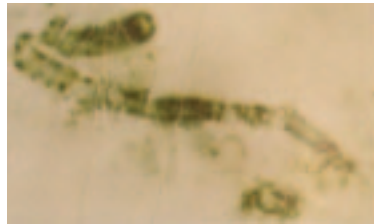
## Происхождение шунгитов

Следует сразу же обратить внимание читателя, что речь пойдет не о водорослях вообще, а только о синезеленых водорослях, образующих, согласно современной ботанической номенклатуре, тип *Cyanophyta*. Эти водоросли вместе с бактериями — самые низкоорганизованные живые существа, когда-либо населявшие планету. Судите сами (рис. 4а): содержимое их клеток не делится на протоплазму и ядро, хромосом как таковых нет, и носитель наследственной информации — кольцевая молекула ДНК — свободно располагается в клетке.

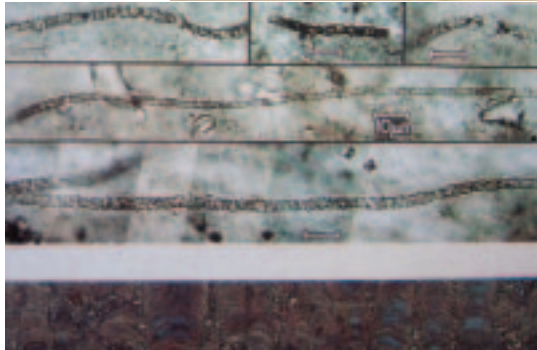
Такие микроорганизмы получили название прокариот (доядерных). От эукариот — ядерных организмов — они отличаются принципиально, и сравнение рис. 4а с рис. 4б эти различия нагляд-



2  
Скопление шаровидных  
и нитевидных микроорганизмов из  
кремнистых сланцев  
формации Ганфлинт.  
Диаметр шаровидных  
образований около 5 мкм



3  
Нитевидные микроорганизмы  
(возможно, синезеленые  
водоросли) из кремнистых сланцев  
формации Ганфлинт.  
Клетки имеют внутренние  
перегородки.  
Предполагается, что подобные  
организмы существовали  
в условиях бескислородной  
атмосферы



но демонстрирует. Эукариоты бывают одноклеточными и многоклеточными, но различия между ними биологи считают все-таки менее значимыми, чем наличие или отсутствие ядра в клетке.

Единственное, что отделяет внутреннее содержимое прокариотической клетки от внешней среды, — это клеточная оболочка. У синезеленых водорослей она состоит в основном из белков и углеводов, но есть в ее составе и мельчайшие (доли микрона) минеральные кристаллики — кристаллиты. В том числе (обратим на это внимание) кристаллики кремния.

Синезеленые водоросли, как и другие растения, — фотоавтотрофные организмы. Это означает, что в качестве источника углерода, основного элемента живого, они используют углекислый газ, которого более чем достаточно в атмосфере. А источником энергии им служит солнечный свет.

Правда, фотоавтотрофный процесс у синезеленых водорослей попроще, чем у высших растений: чтобы появиться хлорофилл, характерный для представителей современной флоры, должны были пройти целые эпохи. В отличие от растений-эукариот, синезеленые усваивали  $\text{CO}_2$ , используя энергию ультрафиолетовой, а не видимой части спектра: ведь поток жесткого излучения у поверхности планеты, еще не защищенной озоновым слоем, был во много раз больше, чем сейчас.

Древним одноклеточным растениям поневоле приходилось быть универсалами: они даже научились усваивать атмосферный азот, необходимый для биосинтеза, чего высшие растения делать не умеют. В общем, микроскопические синезеленые водоросли обладали целым набором всевозможных достоинств, и совсем неудивительно, что формирование биосферы Земли началось именно с них.

Синезеленые водоросли на редкость неприхотливы. Они способны существовать в условиях высоких и низких температур, плохой освещенности, сильного ультрафиолетового излучения и радиации, губительных для других организмов. Некоторые виды растут и размножаются даже в ядерных реакторах: при огромном уровне радиации, в полной темноте, довольствуясь только светом, возникающим при сильном радиоактивном облучении воды (эффект Черенкова). После многочисленных ядерных испытаний на атолле Бикини они первыми вернулись к безжизненным островам.

Извлекая углерод из углекислого газа, первые растения освобождали кислород в атмосферу и таким образом меняли ее состав, приближая его к нынешнему. Это были конечно же только первые, весьма скромные шаги — ведь еще долгое время свободный кислород расходовался главным образом на окисление двухвалентного же-

леза, огромные массы которого были растворены в водах древнего Мирового океана. Тем не менее начало было положено.

Свой вклад синезеленые водоросли внесли не только в формирование нынешней атмосферы. Их остатки обнаружены в горных породах, возраст которых насчитывает 3,5 млрд. лет. Ими построены строматолиты — карбонатные сооружения, подобные кораллам. Но главное — именно синезеленые водоросли способствовали накоплению сапропеля, то есть протошунгита. Хотя в то время первые эукариотические организмы (разные виды зеленых водорослей и грибов) уже существовали, их было слишком мало, чтобы создать сколько-нибудь заметные залежи органики.

## Что это такое — шунгиты?

Своим загадочным названием эта горная порода обязана селу Шуньга в Карелии — именно здешние шунгиты впервые привлекли внимание ученых к этим породам. Честь их открытия принадлежит русскому геологу А.А.Иностранцеву (1879), он же дал название этой породе. Иногда (впрочем, очень редко) шунгит называют также чирвинским, в честь другого известного отечественного геолога — П.Н.Чирвинского (1880–1955).

Метаморфической называется порода (осадочная или вулканическая), которая после своего образования претерпела более или менее сильные изменения под влиянием высоких температур и давлений в недрах земной коры. Шунгит — метаморфическая горная порода черного цвета, состоящая из органического вещества, смешанного с частицами глины и песка. Но если отделить органическое вещество шунгитов от неорганических примесей, то окажется, что содержание углерода в нем достигает чуть ли не рекордного уровня — 98%.

По этому показателю, который геологи используют для характеристики степени метаморфического преобразования органического вещества, шунгит приближается к природному графиту, состоящему из углерода почти на 100%,



и превосходит наиболее метаморфизованные антрациты Донбасса. В связи с этим шунгиты называют иногда метаантрацитами, но это не совсем правильно. Ведь антрациты — это все-таки горючие полезные ископаемые, а шунгиты, как и графит, в обычных условиях не горят. В последнем издании словаря Брокгауза (2002) шунгит определен как измененный (то есть метаморфизованный) антрацит, не достигший стадии графита.

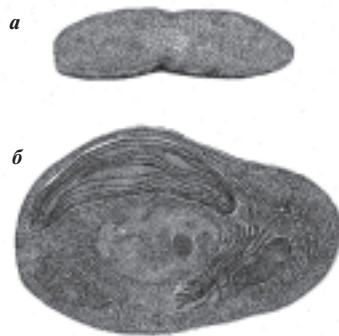
Конечно, отдельные вкрапления органического вещества можно найти в самых разных осадочных горных породах, в том числе и в очень древних. Но тем и замечательны шунгиты, что здесь остатки живых организмов оказались сконцентрированными и образовали крупные залежи в виде пластов. Внешне эти пласты напоминают угольные, но, как мы уже знаем, они обладают совсем другими свойствами и к тому же значительно старше. Их геологический возраст оценивают приблизительно в 1,7–1,5 млрд. лет, что соответствует протерозойской эре (от греч. «proteros» — более ранний и «зоэ» — жизнь) докембрийского времени.

В ту эпоху в мелководных прибрежных зонах океана или окраинных морей, хорошо освещаемых и прогреваемых солнцем, защищенных от морских течений и приливов возвышениями морского дна (песчаными отмелями, валами или рифами), подолгу сохранялись условия, благоприятные для синезеленых водорослей. Слой за слоем накапливались их остатки на морском дне. Временами сюда же сносило песок и глину с суши, и этот материал перемешивался с органическим веществом. Так возникали слои органо-минерального состава, которые чередовались с чисто органическими. Разное содержание минерального вещества в пластах шунгитов заметно даже на глаз: блестящие слои чистой органики нередко чередуются с матовыми, загрязненными минеральными примесями.

## Как они возникли

Абсолютно чистый морской сапропель, подобный тому, от которого ведут свое происхождение шунгиты, не образуется уже сотни миллионов лет. Ведь в ту эпоху, когда накапливалось вещество, ставшее впоследствии шунгитом, растений еще не было, а в последующие эпохи морской сапропель всегда оказывался загрязнен органическим материалом растительного происхождения, заносимым с суши.

Однако в те далекие времена, когда синезеленые водоросли почти безраздельно владели нашей планетой, бла-



4

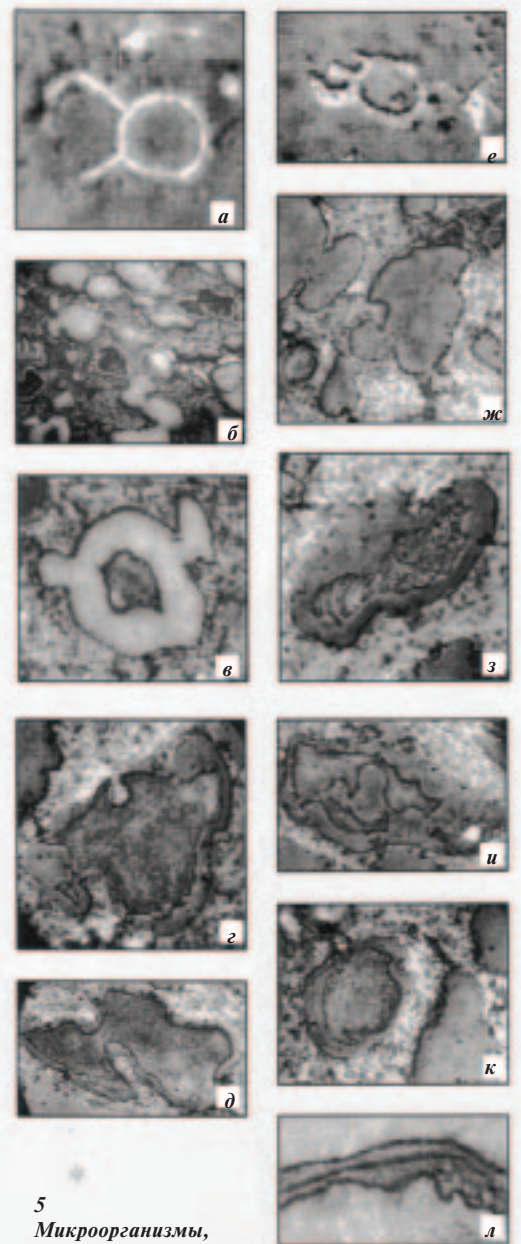
*Клетки прокариот (а) и эукариот (б) устроены по-разному. Такие различия не могут полностью стереть даже процессы метаморфизма при высоких температурах и давлениях*

гоприятные условия для его образования сохранялись в отдельных местах, по-видимому, исключительно долго. Об этом свидетельствует толщина (или, как говорят геологи, мощность) пластов шунгита, которая достигает в отдельных районах 4–5 метров, причем толщина массы сапропеля, из которого они образовались, была в десятки раз больше. А ведь образовали эту массу организмы, не видимые простым глазом!

Толщина первоначального слоя органики уменьшилась потому, что под давлением горных пород, накрывших впоследствии пласт сапропеля, из него была «отжата» вода. Потеряв не менее трех четвертей своей массы, глубокое, вязкое болото (к счастью, проваливаться в него пока было некому) стало превращаться в твердую породу. Процесс, однако, предстоял долгий: прежде чем стать шунгитом, органическое вещество должно было под воздействием высоких температур и давлений преобразоваться, в том числе уплотниться еще в 3–4 раза.

О том, какие именно условия способствовали образованию самой древней породы органического происхождения, геологи узнали, изучая слои, перекрывающие пласты шунгита. Оказалось, что в них много вулканических компонентов — это указывает на высокую температуру в тех участках земных недр, где шунгиты сформировались окончательно. Судя по степени преобразования минералов, температура там достигала 600–800°C.

При этой температуре из массы сапропелита начинает выделяться жидкая, смолоподобная масса. В процессе промышленной переработки сапропелитов и горючих сланцев, когда их нагревают без доступа воздуха (пиролиз), такая масса — главный целевой продукт. Называют ее смолой, а по химическому составу она похожа на нефть или битум. Если пиролиз происходит в при-



5

*Микроорганизмы, замещенные кремнием, были обнаружены автором в шунгитах. Близкие формы описаны в составе строматолитов — слоистых карбонатных пород, образованных синезелеными водорослями. Такие породы найдены в Финляндии и имеют примерно тот же возраст, что и шунгиты*

роде, то смола, образовавшаяся при нагреве, внедряется в окружающие породы под давлением, создаваемым неравномерной нагрузкой вышележащих отложений. В результате появляются жилы, слойки, линзы и образования более сложной конфигурации. Вещество, отделившееся от шунгитового пласта, носит выразительное название «миграционный шунгит».

Шунгиты в этом отношении не уникальны. Природный пиролиз происходил и в угольных пластах, подвергавшихся в недрах земли воздействию магматических пород.

## Состав и строение шунгитов

Пиролитический (миграционный) шунгит геологи называют «шунгит-1». По внешнему виду и химическому составу он заметно отличается от вещества, которое остается внутри исходного пласта и называется «шунгит-2». Шунгит-1 — блестящий и однородный, у него раковистый (то есть похожий на поверхность раковины) излом. В нем сравнительно мало минеральных примесей и относительно велико содержание водорода в органическом веществе. В отличие от него шунгит-2 — слоистый и более зольный, в его органическом веществе заметно больше серы, но меньше водорода и азота.

Шунгиты обстоятельно изучали с применением микроскопии, а наиболее преуспели в этом Л.Е.Штеренберг, А.Г.Вологдин (Москва) и И.Б.Волкова (Санкт-Петербург). Они обнаружили в шунгитах минерализованные оболочки каких-то микроорганизмов (видимо, водорослей), которые были названы сфероморфидами.

Кроме того, И.Б.Волкова сделала потрясающему сенсационное открытие: в составе шунгитов она нашла элементы, похожие на клеточные структуры древесины высших растений. Между тем подобные растения появились только в начале палеозойской эры (ордовики–силуре), то есть спустя сотни миллионов лет после формирования шунгитов.

Так возникло противоречие, которое, казалось бы, можно разрешить только двумя способами: принципиально изменить наши взгляды на историю эволюции растительного царства или столь же радикально поменять датировку для докембрийских пород, приписав шунгитам значительно более молодой (палеозойский) возраст. Разобраться в этом противоречии пока не удалось, однако есть обстоятельство, на которое стоит обратить самое пристальное внимание. Структуры, похожие на остатки растительных тканей, были обнаружены в составе миграционного шунгита-1. Сохранность реликтов биогенного происхождения в этом максимально модифицированном веществе наименее вероятна, поэтому, скорее всего, в данном случае мы имеем дело с каким-то причудливым артефактом.

Автору тоже приходилось вместе с А.Л.Шпицглюзом изучать микроструктуру шунгитов. Для этого был разработан метод ионного травления, позволяющий выявлять те неоднородности вещества, которые невозможно разглядеть в микроскоп при обычных методах подготовки препаратов. Подробно «Химия и жизнь» рассказывала об этом методе и его возможностях рань-

ше (см. 2002, № 2). Мы увидели в шунгит-2 оболочки каких-то загадочных микроорганизмов, которые при формировании породы оказались замещенными кварцем (рис. 5).

Хотя по внешним признакам эти объекты невозможно соотнести с какими-либо известными микроорганизмами, их биологическое происхождение сомнений не вызывает: в неорганическом веществе подобные кольцевидные структуры никогда не образуются. Кроме того, формы микроорганизмов неодинаковы и весьма прихотливы. Оболочка некоторых клеток замещена пиритом (рис. 5а, е), и в некоторых из этих случаев удается разглядеть, что она слоистая (рис. 5л).

Интересен снимок 5б. Срез проходит через скопление микроорганизмов, причем внутренние полости некоторых из них заполнены минеральным веществом, отличающимся по оттенку от окружающей породы. Возможно, это объясняется тем, что здесь минеральное вещество смешано с остатками органического, входившего некогда в состав протоплазмы клетки. Нечто подобное можно видеть и на фото 5в, г, з, и, к. В других случаях внутренняя полость клеток заполнена кварцем (рис. 5а, д, е, ж).

Какими же были те древние микроорганизмы, которые образовали шунгиты? Если все они походили на синезеленые водоросли, дожившие до наших дней, то это означает, что они умели усваивать кремний (вспомним, что кристаллики этого вещества есть в клеточной стенке синезеленых водорослей). И здесь уместно напомнить, что существуют вполне обоснованные научные гипотезы, согласно которым первые организмы, обитавшие на Земле, имели ферментные системы, позволявшие им синтезировать кремнийорганические соединения и включать их в метаболизм. Тем не менее эволюционные и физиологические причины этого явления все еще не ясны, как не понятны и механизмы биохимического усвоения кремния (см. «Химию и жизнь», 2002, № 7).

Так или иначе, если исходить из представлений о лидирующей роли кремния на начальных этапах эволюции, можно лучше понять еще один феномен состава шунгитов. Дело в том, что органическое вещество шунгитов — это, по сути, природный композит: в аморфной органической матрице равномерно распределены кристаллические силикатные частицы. Силикатные частицы очень малы (менее одного микрона), однако их суммарное содержание составляет около 30%, а остальное, то есть около 70%, — углерод. Такой состав вполне объясним, если допустить, что шунгиты «унаследовали» силикат от



### ЖИВЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

кремнийорганических соединений, которые входили в состав органического вещества синезеленых водорослей. Реликты древних микроорганизмов встречаются в шунгитах чрезвычайно редко. Основная масса их органического вещества считается скрытокристаллической (аморфной), но ведь и она ведет свою родословную от подобных клеток.

### Шунгиты как полезные ископаемые

Ясно, что, коль скоро шунгиты считаются полезными ископаемыми, от них должна быть какая-то польза. Может быть, все-таки целесообразно использовать их в качестве топлива? Ведь это весьма впечатляющие скопления углерода! Однако любое топливо характеризуется теплотой сгорания (то есть количеством тепла, выделяемого на единицу массы: например, МДж/кг, где 1 МДж = 4,2 ккал). И если теплота сгорания антрацитов, углей, наиболее близких к шунгитам по составу, около 32 МДж/кг, то шунгитов — всего около 1 МДж/кг.

Почему так происходит? Попытаемся найти ответ, проведя расчеты. Главные химические элементы, которые определяют теплоту сгорания любого природного топлива, — это водород и углерод. У водорода теплота сгорания максимальна и составляет 125,5 МДж/кг. Водорода в составе антрацита совсем немного — около 2%, хотя в шунгитах его еще меньше, не более 0,5%. Таким образом, и в том и в другом случае основным источником тепла становится углерод: в антрацитах его примерно 93%, а в шунгитах порядка 96%. Теплота сгорания органического углерода почти в четыре раза ниже, чем у водорода, и составляет только 34,1 МДж/кг. Подводя итог, мы неизбежно приходим к выводу, что, когда процентное содержание углерода в двух видах полезных ископаемых близко и достаточно велико, различия в содержании водорода не могут объяснить принципиальных различий теплоты сгорания антрацитов и шунгитов.

Объяснение следует искать в особенностях кристаллической структуры, тем



более что аналогичные явления хорошо известны. Так, ковалентно связанные друг с другом правильные шестиугольники молекул графита устойчивы к сильному нагреву благодаря высокой энергии связи между атомами углерода. Энергия, необходимая для разрыва этих связей, называется энергией активации, и чем она выше, тем труднее разрушить молекулы вещества. Среди природных соединений углерода наибольшая энергия активации именно у графита, поэтому, чтобы заставить его гореть, требуется очень высокая температура.

В природе графит образуется под воздействием тепловых процессов в недрах Земли из углей, углистых сланцев, сапропелитов и горючих сланцев, а также из органики, рассеянной в горных породах. Молекулы графита входят в состав шунгитов, однако кроме них здесь имеется и углерод в составе ароматических соединений, а также некоторых функциональных групп, характерных для других органических молекул. Такой углерод активируется легче, а потому энергия активации шунгита в целом ниже, чем у графита.

Тем не менее она существенно превосходит энергию активации наиболее метаморфизованных углей — антрацитов, а потому шунгиты не горят не только в бытовых печах, но даже и в котлах тепловых электростанций. В одном старом учебнике по геологии горючих ископаемых есть даже упоминание о том, что в конце XIX века предприимчивые купцы-энтузиасты планировали организовать общество по разработке карельских шунгитов для топливных нужд северо-западных областей России, но после несложных опытов проект пришлось закрыть.

Зато порошокобразный шунгит хорошо смешивается с водой, фторопластами, каучуками, смолами, цементом, так что его можно использовать для создания высоконаполненных композиционных материалов. Одно из наиболее реальных направлений использования шунгитов на сегодняшний день — это получение пористых наполнителей бетонов (керамзитов). Керамзитом заменяют песок и щебень, чтобы получить так называемый легкий бетон.

Минеральное сырье для производства керамзита должно вспучиваться при быстром нагревании (обычно 1050–1200 °C), давая пористые округлые гранулы. Однако для того, чтобы керамзит получался достаточно прочным, используют не сами шунгиты, а породы, вмещающие шунгитовый пласт: для промышленного производства не подходит сырье, в котором содержание органического углерода превышает 5%. Зато шунгиты с содержанием органического углерода более 20% применяют для производства красок.

Если же в шунгитах много (75–90%) оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), их можно использовать для производства пробирного камня, который представляет собой брусок черного углисто-кремнистого сланца. Если провести на нем черту сплавом какого-либо благородного металла (обычно речь идет о золоте), то по ее цвету можно с высокой точностью определить пробу — содержание благородного металла в сплаве. Кстати, А.А.Иностранцев, впервые обративший внимание на шунгиты, характеризовал их именно как горную породу, пригодную для производства пробирного камня.

Шунгиты используют и в качестве отделочного материала. Ими облицован Мавзолей В.И.Ленина на Красной площади, украшено здание театра в столице Карелии — Петрозаводске.

С шунгитами связывают определенные надежды химиков. Имеются научно-технологические разработки, где шунгиты предложено использовать при производстве карбида кремния ( $\text{SiC}$ ) и ферросилиция ( $\text{Fe}_n\text{Si}_m$ ) — ценного сырья для металлургии. Вот где пригодилось равномерное распределение микрокристаллического кремния в органической матрице: эта особенность шунгита создает идеальные условия для протекания твердофазных реакций между атомами железа и кремния.

Не остаются без внимания и другие качества шунгита. Например, в смеси с доломитом ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) он может применяться для мелиорации почв и подкормки растений. Ведь, помимо всего прочего, шунгиты содержат ионы редкоземельных металлов, а также микро-

элементы (P, V, Co, Ni, Zn и другие), добавление которых в почву способствует повышению урожайности.

Благодаря высоким адсорбционным свойствам шунгит используют в насыпных фильтрах для очистки не только технической, но и питьевой воды от минеральных и органических загрязняющих веществ, нефтепродуктов, хлора и тяжелых металлов. Есть свидетельства, что царь Петр I повелевал солдатам держать в своих ранцах «аспидный камень» (так в то время называли шунгит) и опускать его в котелок для обеззараживания воды.

Крем-бальзам «Шунгит» на основе одноименного вещества используется как вспомогательное средство при лечении остеохондроза, радикулита, артритов и артрозов. А некоторые восторженные энтузиасты считают даже, что шунгит может обладать многими целебными и даже противораковыми свойствами, поскольку в нем содержатся фуллерены — уникальная молекулярная конструкция, в которой 60 атомов углерода ( $\text{C}_{60}$ ) образуют пространственную структуру в форме шара.

Что касается фуллеренов, это чистая правда. Именно в карельских шунгитах такие молекулы и были впервые обнаружены в природе. Однако убедительных литературных данных о медицинском применении фуллеренов автору найти не удалось. Так что не будет ничего удивительного, если научные исследования не подтвердят наличия у шунгита каких-то исключительных целебных свойств.

И все же шунгит был и остается полезным ископаемым. А степень его полезности определяется потребностью общества в тех или иных видах минерального сырья. Несомненно, эта горная порода, уникальная по происхождению и составу, заслуживает дальнейшего изучения и вполне может преподнести исследователям приятные сюрпризы.

