

**ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ БЛАГОРОДНЫЕ ОПАЛЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РАДУЖНОГО  
(СЕВЕРНОЕ ПРИМОРЬЕ): ПРИРОДА ОПАЛЕСЦЕНЦИИ**

**С.В. Высоцкий<sup>1</sup>, Н.Г. Галкин<sup>2</sup>, А.В. Баркар<sup>1</sup>, Е.А. Чусовитин<sup>2</sup>, А.А. Карабцов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022, e-mail: svys@mail.ru

<sup>2</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, ул. Радио 5, г. Владивосток, 690041, e-mail: ngalk@iacp.dvo.ru

Поступила в редакцию 24 апреля 2009 г.

Приводятся результаты исследования гидротермальных благородных опалов. Установлено, что гидротермальные опалы отличаются по наноструктуре и режиму образования от экзогенных благородных опалов. Они сложены более мелкими глобулами, и в них отсутствует структурированность наночастиц по законам плотнейшей упаковки, которая так характерна для экзогенных благородных опалов. В процессе формирования они подвергались пневматолитовому отжигу – воздействию высокотемпературного пара при повышенном давлении. Влияние термальных эффектов привело к образованию двумерных фотонных зон в хаотической опаловой матрице. Эти фотонные зоны созданы сетками, ячейки которых образовались в результате термальных эффектов по принципу “ячеек Бенара”. Именно эти структурированные блоки и тонкие пленки приводят к спектральному разложению света и возникновению иризации.

**Ключевые слова:** благородный опал, наноструктура, фотонные кристаллы, Приморье, Дальний Восток.

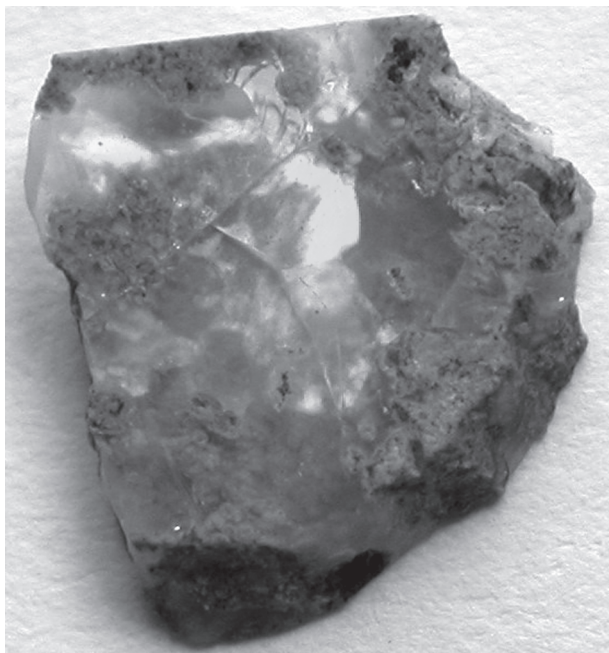
**ВВЕДЕНИЕ**

Среди обширного семейства аморфных и слабо раскристаллизованных минералов водного кремнезема благородный опал занимает особое место. Он высоко ценится за игру цвета в различных частях видимой области спектра, получившую название “опалесценция” (рис. 1). Исследования последних лет показали, что экзогенный благородный опал (например, австралийский) представляет собой классический трехмерный фотонный кристалл\*, запрещенная фотонная зона которого находится в видимом диапазоне электромагнитного излучения [1, 6, 9]. Наноразмерная трехмерная структура фотонного кристалла (получившая название фотонной решетки) позволяет

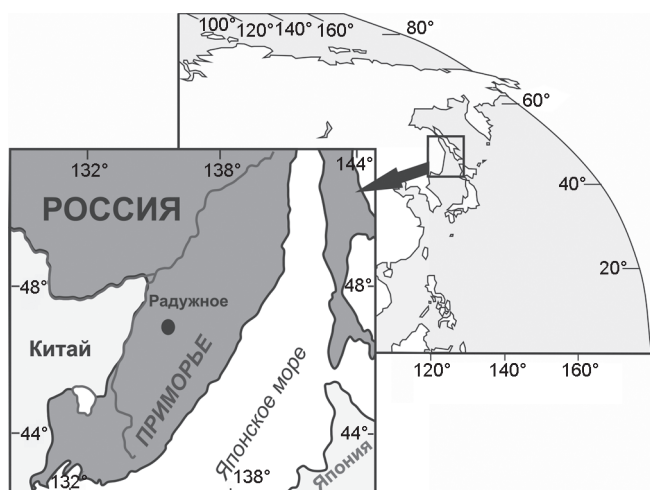
передавать когерентный свет в оптическом диапазоне длин волн с минимальными потерями. Фотонная решетка представляет собой пачку тонких двумерных дифракционных решеток. Считается, что для создания работающей “фотонной решетки” достаточно десяти таких слоев. Подобные структуры имеют огромное значение для оптической связи и вычислительной техники.

На примере экзогенных благородных опалов установлено, что опалесценция (фотонная зонная структура) возникает в результате дифракции электромагнитных волн на объемной пространственной решетке, образованной частицами кремнезема сферической или икосаэдрической формы. Эти частицы

\*С общей точки зрения фотонный кристалл является сверхрешеткой (crystal superlattice) – средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды – в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры, соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света. Поэтому такие решетки и получили особое название – фотонные кристаллы (Г. Жувикин. Лабиринты фотонных кристаллов, “Компьютерра”, №30, 2001).



**Рис. 1.** Гидротермальный благородный опал месторождения Радужное (Приморье).



**Рис. 2.** Местоположение месторождения Радужное (Северное Приморье).

однородны по размеру, упорядочены по закону границентрированной кубической или гексагональной упаковок и создают своеобразную, хорошо узнаваемую наноструктуру благородного опала [4, 19, 20].

Однако подобные структуры могут быть одномерными и двумерными. Как показали наши исследования, примером таких минералов могут являться гидротермальные благородные опалы, обладающие прекрасной опалесценцией на двумерных фотонных зонах в хаотической опаловой матрице [2, 3]. При-

чем фотонная зона, возможно, создается одной дифракционной решеткой, а не только комбинацией из десяти слоев. В этом отношении природные примеры фотонных кристаллов могут оказать существенное влияние на создание новых наноматериалов.

В 80-х годах прошлого столетия на севере Приморья в измененных позднемиоценовых андезитах северянской свиты было обнаружено месторождение благородного опала (рис. 2). Некоторые исследователи считали его аналогом экзогенных благородных опалов Австралии [10, 21]. Однако наши исследования показали, что это не так [2]. В данной статье приводятся результаты изучения гидротермальных опалов Приморья и, для сравнения, иризирующих опалов из кайнозойских андезитов Эфиопии.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

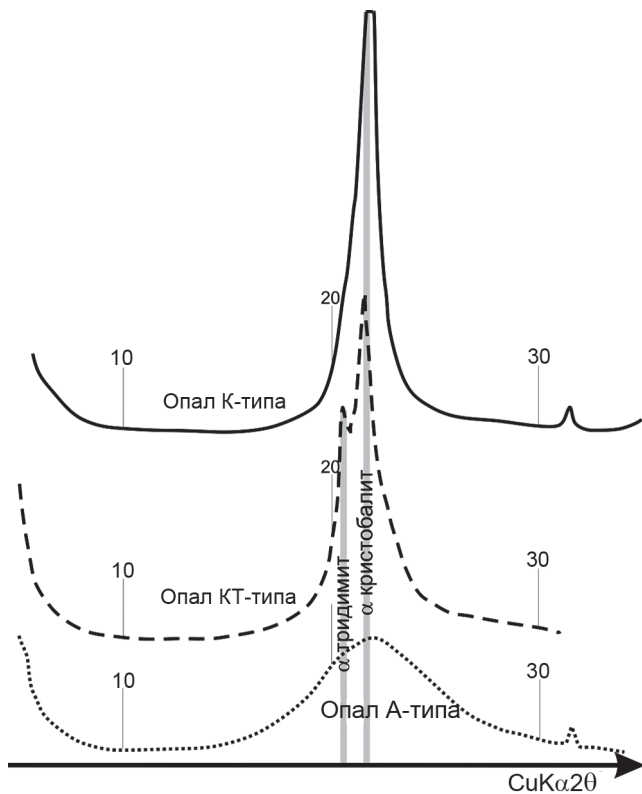
Были проведены исследования наноразмерной ( $10^{-6}$ – $10^{-9}$  м) структуры благородного опала на атомно-силовых сканирующих микроскопах (АСМ) Solver и NTEGRA Auga фирмы NT-MDT (г. Зеленоград). При изучении наноструктуры использовались кантилеверы марки NSG10 с радиусом закругления острия 10 нм и резонансной частотой 190–325 кГц. Калибровка прибора и отработка методики съемки проводились на дифракционной решетке с периодом 3 мкм и матрице синтетического опала, для сравнения использовались образцы природного австралийского благородного опала. Микроструктура исследовалась на электронных сканирующих (растровых) микроскопах (СЕМ) JEOL/EO JSM-6490 и EVO 50 XVP Zeiss на образцах, напыленных золотом.

Исследования структуры опалов на атомно-молекулярном уровне ( $10^{-10}$  м) были проведены на рентгеновских дифрактометрах ДРОН-3 и D8 DISCOVER ( $\text{CuK}_\alpha$  монохроматизированное излучение).

Изучались как свежие сколы, так и полированные поверхности, предварительно протравленные разбавленной плавиковой кислотой. В выборке присутствовали разные по своим внешним признакам благородные опалы: белые фарфоровидные, желтые, светло-коричневые просвечивающие, матовые и др. Опалесценция в образцах наблюдалась в красно-оранжевых или зелено-голубых тонах.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Структура опалов на атомно-молекулярном уровне.** Установлено, что большинство благородных опалов мира относится к группе А, по [15], или к I группе, по [20]. Обычно они состоят из однородных по размеру частиц диоксида кремнезема шарообразной формы с диаметром от 150 до 450 нм, упорядо-



**Рис. 3.** Рентгенограммы благородных опалов А-типа (Австралия), К-Т-типа (псевдоморфоза по дереву) и К-типа (месторождения Радужное).

ченных по законам гранцентрированной кубической или гексагональной упаковки. Пространство между глобулами заполнено аморфным кремнеземом. На рентгенограммах такие опалы дают широкий размытый максимум в районе главного экстремума  $\alpha$ -кристобалита ( $4.1 \text{ \AA}$ ), каковой и был нами получен для синтетического, а также для экзогенных австралийского (рис. 3) и казахстанского натуральных опалов. Однако других линий  $\alpha$ -кристобалита (или других минералов) на них нет.

Рентгеноструктурный анализ опалов месторождений Приморья показал, что в районе главного экстремума ( $4.1 \text{ \AA}$ ) присутствуют ярко выраженные пики, т.е. они сложены  $\alpha$ -кристобалитом. На рентгенограммах (рис. 3) присутствуют только его линии, тогда как линии других минералов не обнаружены. Степень кристалличности в разных опалах неодинакова – в одних наряду с  $\alpha$ -кристобалитом присутствует довольно большое количество аморфного кремнезема, в других его практически нет. Аналогичные рентгенограммы были получены и для опалов Эфиопии.

Таким образом, иризирующие опалы месторождений Приморья и Эфиопии относятся к другому

структурному типу – К-опалы, по классификации [15], или III группе по [20]. Они сложены октаэдрическими нанокристаллами  $\alpha$ -кристобалита. Считается, что именно такие опалы ассоциируются с лавовыми потоками [4]. И именно такого типа опалы были описаны в современных гидротермальных системах [16].

Среди приморских опалов присутствуют и представители третьей группы – КТ-опалы (рис. 3), однако среди них не отмечены иризирующие разновидности. Эти опалы замещают палеодревесину и на рентгенограммах имеют два четко выраженных пика, соответствующих двум минералам –  $\alpha$ -кристобалиту и  $\alpha$ -тридимиту.

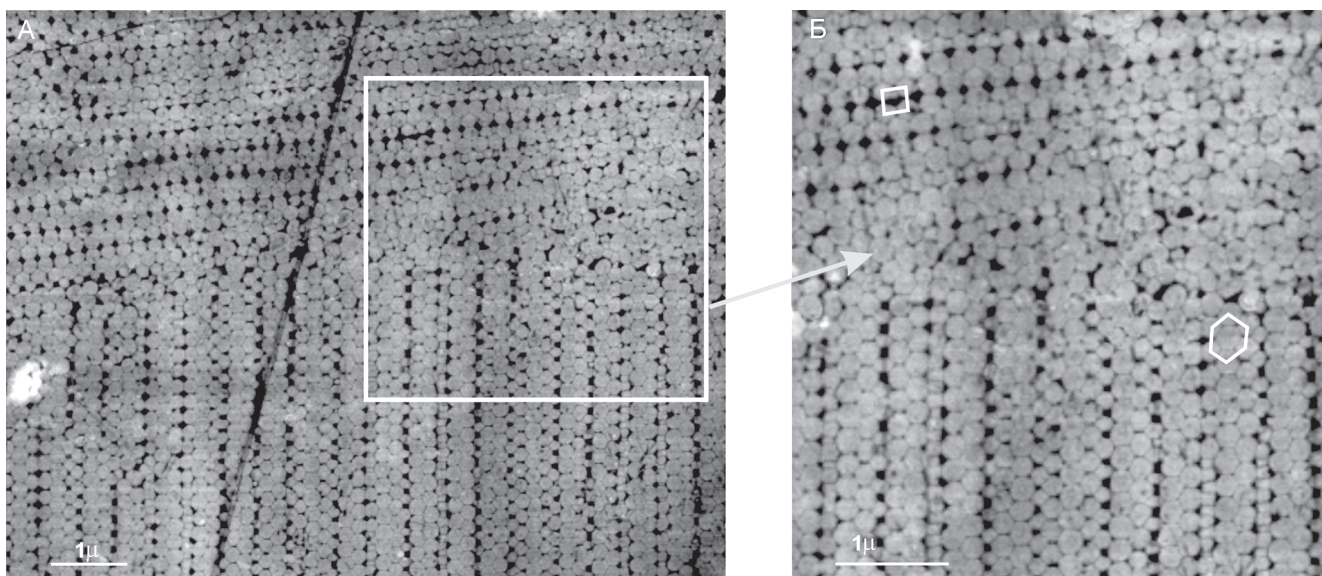
Следует отметить, что при детальном исследовании в приморских благородных опалах отмечаются включения полевых шпатов, глинистых и некоторых других минералов. Однако их концентрация настолько мала, что на рентгенограммах характерные рефлексы этих минералов отсутствуют.

**Структура опалов на наноуровне.** Экзогенные и гидротермальные опалы отчетливо различаются на наноуровне. Как уже неоднократно говорилось и ясно видно на приведенных рисунках (рис. 4 А, Б), экзогенные опалы состоят из произвольно ориентированных блоков, которые сложены глобулами размером  $\sim 200 \text{ нм}$ , плотно упакованными по гексагональному или кубическому законам.

Благородные же опалы гидротермального происхождения имеют совершенно другую наноструктуру. Размер глобул диоксида кремнезема здесь варьирует в пределах  $40\text{--}90 \text{ нм}$ . Иногда они образуют более крупные агломераты, размером до  $200\text{--}300 \text{ нм}$ , но в любом случае их пространственное положение не соответствует законам плотнейших упаковок (кубической или гексагональной).

Однако фотонная зонная структура в таких опалах существует, о чем ясно свидетельствует присутствие слоев с ячеистым строением (рис. 5). Такие слои созданы сетью, которая обладает строгой упорядоченностью ячеек, как в ближнем, так и дальнем порядке. Размер ячеек в благородных опалах варьирует в пределах  $\lambda/2$  спектра видимого света ( $200\text{--}350 \text{ нм}$ ). Если размер ячеек больше (нами были встречены слои с размером ячейки около  $500 \text{ нм}$ ), опалесценция в опале не наблюдается.

Как видно из рисунков (рис. 5 А–В), ячейки сети образованы мелкими ( $40\text{--}90 \text{ нм}$ ), хаотически расположенными глобулами. В узлах ячеек эти глобулы часто образуют агломеративные скопления, сравнимые по величине с размером самой ячейки, тогда как стенки могут быть вдвое тоньше. В некоторых случаях фиксируется гексагональная конфигурация



**Рис. 4.** Белый благородный опал экзогенного происхождения (Австралия).

А – граница блоков, Б – чередование слоев с гексагональной и кубической упаковкой. Фото на АСМ.

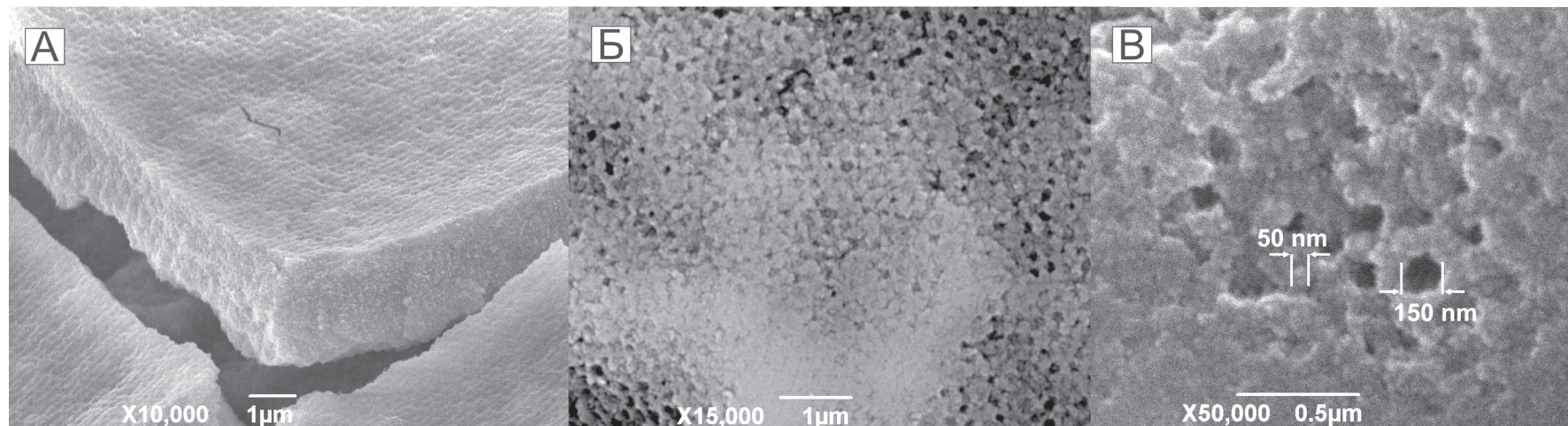
ячеек, однако высокая степень диагенеза гидротермальных опалов часто маскирует их первоначальную форму. В менее метаморфизованных опалах иногда удается обнаружить концентрически-зональное расположение глобул, фиксирующих, вероятно, каналы транспортировки гидротермального раствора (рис. 6В). В диагенезированных опалах такие каналы обычно заполнены глинистыми минералами.

На данном этапе нами обнаружены два типа фотонных блоков – единичные тонкие пленки и пакеты пленок. В тонких пленках, как видно из рисунка (рис. 5А), ячеистая структура не распространяется глубоко внутрь опала. Сеть здесь, вероятно, однослойная и имеет толщину, сравнимую с размером ячейки. Как нами было показано ранее [3], снизу и сверху такие единичные сетки перекрыты опаловыми слоями с хаотической упаковкой глобул. В результате образуется тонкая пленка двумерного фотонного кристалла, обеспечивающего эффект опалесценции.

Пакеты имеют объемный характер (толщина около 3 мкм), упорядоченная сетка здесь располагается перпендикулярно к плоскости поверхности (рис. 7Б). Поверхность пакета сложена хаотически расположенными глобулами (рис. 7А). Однако на боковом срезе пакета видна упорядоченная структура, в которой имеются фрагменты кубической и гексагональной упаковок. Под верхним сетчатым слоем (рис. 7Б) находятся еще, по меньшей мере, два упорядоченных слоя-сетки. Размер глобул в этом образце составляет примерно 90 нм, а ячеек (отверстий) – около 200 нм. Судя по данному при-

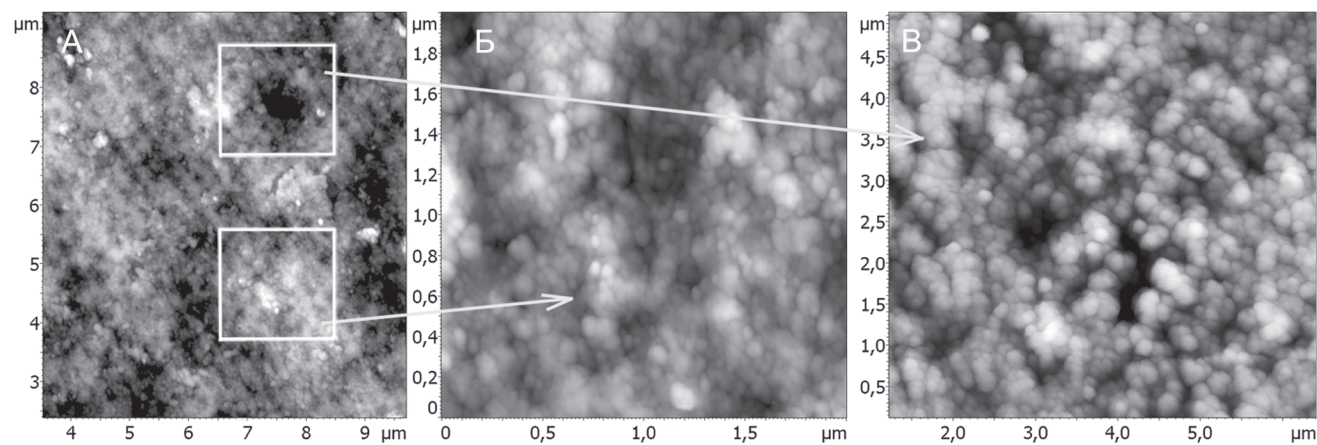
меру, периодичность оптической сверхрешетки в пакетах создается комбинацией глобул кристобалита и отверстий между ними и может иметь более сложную конфигурацию, чем обычные плотнейшие упаковки. Например, на рис. 8 показано, что глобулы и ячейки образуют двухуровневую гексагональную решетку. При этом размер внутреннего гексагона, созданного глобулами, в два раза меньше внешнего, образованного ячейками. Здесь же можно заметить, что сами глобулы представляют собой скопления мелких сфероидов, размер которых не превышает 50 нм.

**Диагенез.** Неметаморфизованные разновидности гидротермальных благородных опалов со сферической формой глобул среди приморских образцов встречаются нечасто. Обычно частицы опалов месторождения Радужное деформированы и имеют дискообразную, конусообразную или прямоугольную форму [3]. Как правило, сферические наноиндивиды тесно “спаяны” друг с другом. Они образуют группы из двух-трех и более “сросшихся” частиц, разорвать которые без нарушения целостности практически невозможно. Когда это происходит в результате химического травления, поверхность сфер никогда не бывает гладкой. На ней всегда имеются волосовидные, игольчатые или бугристые остатки недорастворившегося материала. Иногда фиксируется переход от зернистой текстуры к стекловидной. Все это, наряду с присутствием кристаллической фазы, свидетельствует о том, что опалы подвергались воздействию высоких температур.



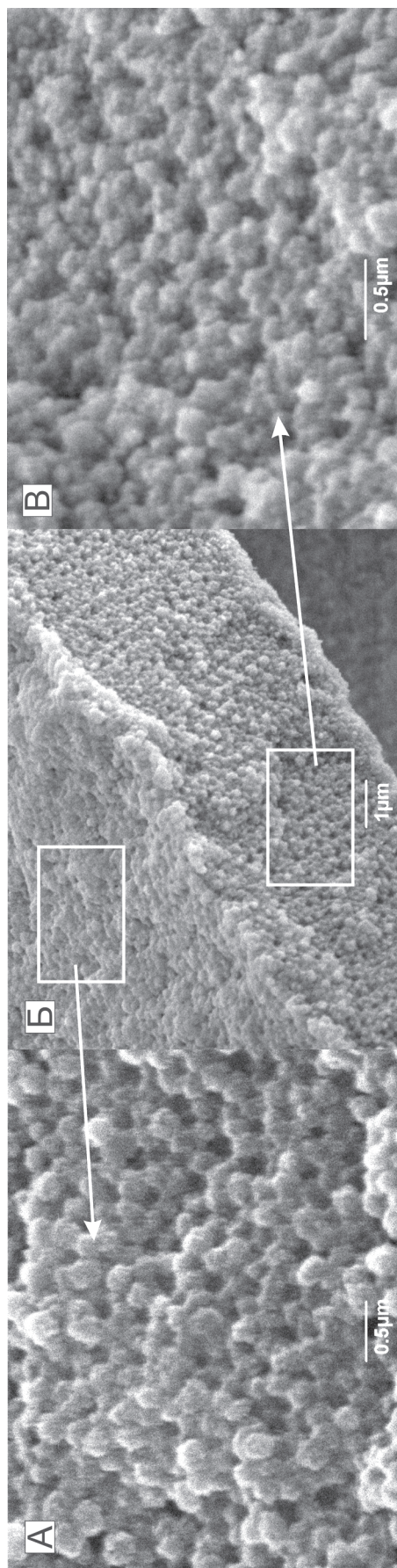
**Рис. 5.** Благородный гидротермальный опал, м-е Радужное (Приморье).

А – плоская двумерная ячеистая сетка, Б – фрагмент сетки, В – гексагональный мотив ячеистой сетки. Фото на СЕМ.



**Рис. 6.** Благородный опал, Эритрея (Африка).

А – ячеистая сетка в гидротермальном опале, Б – отсутствие упорядоченности глобул, В – канал на поверхности гидротермального благородного опала. Фото на АСМ.



**Рис. 7.** Пакет пленок в благородном гидротермальном опале, м-е Радужное (Приморье).

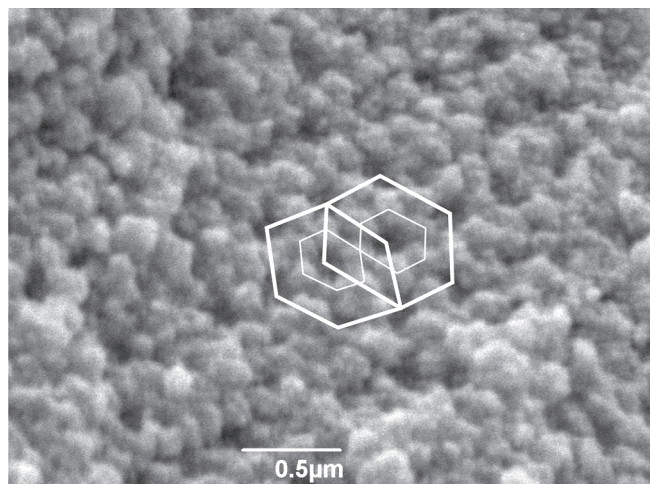
А – хаотически упакованные глобулы поверхности пакета, Б – упорядоченные сетчатые слои на боковом срезе образца, В – гексагональный мотив упаковки глобул бокового среза. Фото на СЕМ.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные данные однозначно свидетельствуют, что гидротермальные опалы отличаются по наноструктуре и режиму образования от экзогенных благородных опалов. Там, где присутствуют сферы, они тесно срослись и составляют единое целое с межзерновым кремнеземом. Присутствие дисковидных фрагментов, состоящих из более мелких уплотненных наноиндивидов [3], указывает на то, что в некоторых случаях сфероиды подверглись деформации в процессе преобразования опала. Иногда фиксируется переход от зернистой текстуры к стекловидной. Все это, наряду с присутствием кристаллической фазы, свидетельствует о том, что опалы подвергались воздействию высоких температур. Как показали экспериментальные исследования, подобный результат может быть достигнут при термообработке опала перегретым водяным паром [7, 8]. При этом сферы “спекаются” друг с другом, устанавливая прочные силоксановые связи. Повышенное давление пара вызывает полную раскристаллизацию аморфного кремнезема, нарушение структурирования сфер в блоках и потерю иризации. Даже частичная раскристаллизация аморфного кремнезема приводит к объемным изменениям, что является причиной объемных дефектов и растрескивания, так характерных для опалов месторождения Радужное.

Однако наиболее интересной чертой гидротермальных благородных опалов является наличие двумерных фотонных кристаллов внутри хаотической опаловой матрицы. Основой этих фотонных кристаллов является периодическая сетка, размер ячейки которой сопоставим с длиной волны света в видимом диапазоне. Гексагональная конфигурация ячейки, фиксируемая в некоторых образцах, а также упорядоченность ячеек по законам плотнейшей упаковки свидетельствуют о неслучайном ее образовании.

Подобные структуры образуются в результате термальной конвекции и известны в физике под названием “ячеек Бенара”. Если жидкость подогревается снизу, при достижении некоторой критической температуры начинается ее конвекция: более нагретые нижние слои жидкости расширяются, становятся легче более холодных верхних, всплывают наверх, там охлаждаются и снова опускаются и т.д. В жидкости возникают конвективные ячейки, аналогичные пчелиным сотам, – вертикально расположенные вплотную друг к другу цилиндры шестигранной формы (ячейки Бенара). Движение жидкости стабилизируется ее вязкостью, т.к. силы трения направлены против него. Жидкость поднимается внутри ячейки вдоль ее оси, растекается по верхнему основанию, опускается по боко-

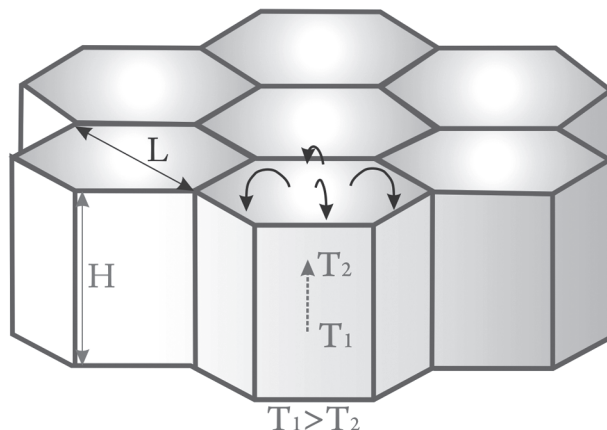


**Рис. 8.** Фрагмент двухуровневой фотонной решетки. Диаметр внутреннего гексагона – 300 нм, внешнего – 600 нм.

вым граням и собирается по нижнему основанию к его середине и направляется снова вверх (рис. 9). Возникает динамическая упорядоченная структура. Если при этом в результате перепада температур происходит коагуляция в жидкости, то образующиеся глобулы будут скапливаться по периметру ячеек, образуя упорядоченную решетку с одинаковыми ячейками.

В настоящее время описаны три механизма возбуждения термической конвекции при подогреве снизу. Первый механизм, релеевский, приводится в действие силой плавучести, которая порождена объемным расширением жидкости из-за нагрева [14]. Второй механизм приводится в действие разностью сил поверхностного натяжения, возникающей из-за зависимости сил поверхностного натяжения от температуры, – термокапиллярным эффектом [17, 18]. Третий механизм связан с возбуждением термоэлектрического эффекта [5] в жидкостях с достаточной диэлектрической проницаемостью, такой, что возникающий в жидкости объемный заряд не успевает компенсироваться.

Однако размеры ячеек Бенара, полученных в экспериментах, намного превышают размеры ячеек, установленных нами в гидротермальных благородных опалах. Известно [14], что при подогреве снизу, в открытой системе “пленка жидкости–подложка” с существующим перпендикулярно подложке градиентом температуры через некоторое время за счет конвекционного движения устанавливаются стационарные периодические структуры (ячейки Бенара). Их размеры варьируют от сотен микрон до единиц миллиметров, и они заполняют всю поверхность подложки. При этом градиент температуры является не-



**Рис. 9.** Модель конвекционной ячейки по принципу “ячейки Бенара”.

$T_1 > T_2$  – температурный градиент,  $L$  – линейный размер ячейки,  $H$  – высота ячейки.

большим (до сотни градусов), а толщина слоя жидкости не превышает одного миллиметра. В жидкостях с высокой плотностью, если толщина их слоя не превышает миллиметра [18] и они располагаются на подогреваемых подложках, может проявиться термокапиллярный эффект [17], который также приводит к формированию ячеек Бенара с размерами до единиц миллиметров. При подогреве сверху с градиентом температуры от 1000 до 10000 °С твердое вещество приходит в состояние расплава. Перпендикулярно к поверхности возникает термоэлектрический эффект [11–13], который обеспечивает конвекционное перемешивание сверху вниз. При этом возникают периодические структуры с размерами до долей миллиметра при глубине расплава в сотни микрон.

Вероятно, в случае формирования благородных гидротермальных опалов, образующихся в трещинах горных пород, необходимо учитывать большие давления перегретого пара, насыщенного нанометровыми гранулами оксида кремния при малом градиенте температур (не более 200 °С). Размеры гранул в благородных гидротермальных опалах изменяются от десятков нанометров до нескольких сотен нанометров, что существенно меньше наблюдаемых ранее ячеек Бенара, формируемых по одному из трех предложенных механизмов. Это может быть связано с узостью трещин в горных породах, высокими давлением и скоростью прохождения перегретого пара, а также с вертикальным градиентом температуры. Такое сочетание параметров должно приводить к высокой скорости формирования ячеек Бенара. Поскольку режимы функционирования гидротермальных источников, выносящих на поверхность Земли жидкости с

различной плотностью и составом, могут изменяться во времени в зависимости от количества перегретого пара в извержении, то это должно приводить к изменению условий формирования и размеров формируемых ячеек Бенара. Как было показано нами, в одном образце благородного гидротермального опала на разных уровнях формируются либо отдельные слои с периодической в плоскости структурой, чередуемые с аморфными слоями из диоксида кремния, либо наблюдается формирование наборов плоскостей с периодической упаковкой гранул в вертикальной и, с большой вероятностью, в горизонтальной плоскостях. В этом случае необходимо предположить, что работа гидротермального источника периодически изменялась во времени и наблюдались отдельные выбросы гидротермального пара, которые чередовались со слабым диффузионным переносом пара из источника с повышенной концентрацией гранул диоксида кремния. В первом случае формировался слой с периодическим чередованием структур, а увеличение плотности диоксида в паре и уменьшение его скорости и давления приводили к формированию неупорядоченного слоя диоксида кремния. Затем источник начинал работать периодически и с высокой частотой, выбрасывая порции перегретого пара с некоторой плотностью диоксида кремния. Процесс формирования упорядоченных структур повторялся в каждом последующем формируемом слое, что приводило к образованию стопки упорядоченных слоев. При этом размер ячеек зависел как от давления перегретого пара, так и от степени его насыщенности гранулами диоксида кремния.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, гидротермальные иризирующие опалы месторождения Радужное отличаются по наноструктуре и режиму образования от экзогенных благородных опалов. Они сложены более мелкими глобулами, и в них отсутствует та структурированность наночастиц по законам плотнейшей упаковки, которая так характерна для экзогенных благородных опалов. В процессе формирования они подвергались пневматолитовому отжигу – воздействию высокотемпературного пара при повышенном давлении.

В то же время, влияние термальных эффектов привело к образованию двумерных и трехмерных фотонных зон (фотонных кристаллов) в хаотической опаловой матрице. Именно эти структурированные блоки и тонкие пленки приводят к спектральному разложению света и возникновению иризации. Фотонные зоны созданы сетками, ячейки которых образовались в результате термальных эффектов по прин-

ципу “ячеек Бенара”. Механизм образования фотонных зон осложняется неравновесными условиями – большими давлениями перегретого пара, разной степенью насыщения нанометровыми гранулами оксида кремния, относительно малым градиентом температур и пульсационным характером процесса. В результате самоорганизации сформировались сложные двухуровневые структуры упорядочения, влияющие на спектральное разложение света и возникновение иризации.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО, проекты № 06-3-А-08-313, 09-3-А-08-416, 09-3-А-02-028.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышев А.В., Каплянский А.А., Кособукин В.А. и др. Спектроскопия запрещенной фотонной зоны в синтетических опалах // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 7. С. 1291–1299.
2. Высоцкий С.В., Карабцов А.А., Курявый В.Г. и др. Благородные опалы месторождения Радужное (северное Приморье, Россия): проблема строения и генезиса // Перспективные направления. Развитие нанотехнологий на Дальнем Востоке России. Владивосток, 2007. С. 126–137.
3. Высоцкий С.В., Курявый В.Г., Карабцов А.А. Наноструктура благородных опалов месторождения Радужное (северное Приморье, Россия) // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 4. С. 516–519.
4. Денискина Н.Д., Калинин Д.В., Казанцева Л.К. Благородные опалы. Новосибирск: Наука, 1987. 183 с.
5. Иоффе И.В., Калинин Н.В., Эйдельман Е.Д. Возможность дорелевской конвекции в жидких полупроводниках // Письма в Журнал Технической Физики. 1976. Т. 2. Вып. 9. С. 395–396.
6. Кавтрева О.А., Анкудинов А.В., Баженова А.Г. и др. Оптическая характеристика натуральных и синтетических опалов методом спектроскопии брэгговского отражения // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып. 4. С. 674–680.
7. Казанцева Л.К., Денискина Н.Д., Калинин Д.В. О цементации аморфного сферического кремнезема с регулярной пространственной решеткой // Исследования по экспериментальной минералогии. Новосибирск, 1978. С. 72–76.
8. Калинин Д.В., Денискина Н.Д., Казанцева Л.К. и др. Синтез благородных опалов // Синтез и выращивание оптических кристаллов и ювелирных камней. Новосибирск, 1981. С. 25–30.
9. Романов С.Г. Анизотропия распространения света в тонких пленках опалов // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып. 3. С. 512–522.
10. Тишкина В.Б., Одариченко Э.Г., Лапина М.И. Особенности внутреннего строения благородных опалов месторождения Радужное (Приморский край России) // Материалы годичного собрания Минералогического общества при РАН “Минералогия, искусство, культура”. СПб., 2003. С. 75–77.
11. Эйдельман Е.Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 11. С. 1279–1294.



12. Эйдельман Е.Д. Влияние толщины слоя жидкости на соотношение размеров ячейки конвекции // Журнал техн. физики. 1998. Т. 68, № 11. С. 7–11.
13. Эйдельман Е. Д. Конвективные ячейки: три приближения теории опытов Бенара // Соросовский образовательный журн. 2000. Т. 6, № 5. С. 94–100.
14. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford: University Press, 1960.
15. Jones B., Renaut R.W. Microstructural changes accompanying the opal-A to opal-CT transition: new evidence from the siliceous sinters of Geysir, Haukadalur, Iceland // Sedimentology. 2007. N 54. P. 921–948.
16. Jones J.B., Segnit E.R. The nature of opal I: Nomenclature and constituent phases // Journ. Soc. Austr. 1971. V. 6. P. 301–315.
17. Levich V.G., Krylov V.S. Surface-Tension-Driven Phenomena // Ann. Rev. Fluid Mech. 1969. V. 1. P. 293–343.
18. Pearson J.K.A. On convection cells induced by surface tension // J. Fluid Mech. 1958. V. 4, N 5. P. 489–500.
19. Sanders J.V. Color of precious opal // Nature. 1964. V. 204, N. 4964. P. 1151–1153.
20. Smith D., Thrower P.A. Opals – a study of beauty // Earth and Miner. Sci. 1978. V. 47, N. 6. P. 46–48.
21. Tishkina V.B., Lapina M.I. Mineralogical-geochemical features of the andesite-hosted agate-opal mineralization in the Raduznoe deposit (Primorsky Krai, Russia) // Tectonics, magmatism and metallogeny (Proc. Int IAGOD conf.). Vladivostok, 2004. P. 707–709.

*Рекомендована к печати А.И. Ханчуком*

***S.V. Vysotskiy, N.G. Galkin A.V. Barkar, E.A. Chusovitin, A.A. Karabtsov***

### **Hydrothermal precious opals of the Raduzhnoye deposit (North Primorye): the nature of opalescence**

The results of investigation of hydrothermal precious opals are cited. Hydrothermal precious opals are recognized to differ in their nanostructure and regime of their formation from exogenic precious opals. They are made up of smaller-size globules, and they show no structuring of nanoparticles by the laws of tight packing, which is so characteristic of exogenic precious opals. In the process of formation they were subjected to pneumatolytic annealing – a high temperature vapor impact accompanied with elevated pressure.

The thermal effects resulted in the formation of 2-D photon zones in the chaotic opal matrix. These photon zones were created by the grids, whose cells formed as a result of thermal effects, according to the principle of Benard cells. It was those structured blocks and thin films that result in spectral decomposition of light and iridescence.

**Keywords:** precious opal, nanostructure, photonic crystals, Primorye, Russia.