

УДК 549:552.08



М.Ю. Поваренных



Е.Н. Матвиенко

**Поваренных М.Ю.*,
Матвиенко Е.Н.****

Новое макроскопическое свойство горных пород – фрустурация – как проявление квантования-кусковатости горнопородного уровня пространственно-временного континуума

*Поваренных Михаил Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института истории естествознания и техники им. Н.И. Вавилова РАН (ИИЕТ РАН, Москва)

E-mail: mpovarennykh@mail.ru

**Матвиенко Елена Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва)

Развитие идей В.И. Драгунова и Д.В. Рундквиста об элементарных ячейках горных пород и академика М.А. Садовского о дискретности геофизической среды («естественной кусковатости») привело к установлению нового макроскопического горнопородного явления – первичной кусковатости, или фрустурации (от латинского «фруstum» – кусок), сначала для простых по минеральному составу и генезису, а затем и для полиминеральных и сложных по генезису горных пород. Предпосылки этого содержатся в работах С.М. Бескина, А.Г. Жабина, И.С. Делицина, А.Н. Никитина, О.А. Суставова, Н.З. Евзиковой, В.В. Индутного и М.Ю. Поваренных, а ранее – в статье Д.С. Коржинского о локальном («мозаичном») равновесии в неравновесных геологических процессах и некоторых работах В.Ф. Левинсона-Лессинга.

Ключевые слова: элементарная ячейка горных пород, фруstum (кусок), агрегат минеральных зёрен, УФ-люминесценция, электронная микроскопия.

Данная статья написана во исполнение научного завещания доктора геолого-минералогических наук, профессора, члена Совета Российского минералогического общества Аркадия Григорьевича Жабина (1934–2007), светлой памяти которого ее с благодарностью посвящают авторы.

Мир не может быть без границ, без разбиений...

Пётр Густав Дирихле (1805–1859)

Введение

Идея о сложении горной породы не только минеральными зёрнами, но и закономерными агрегатами минеральных зёрен, минимальными по размерам, трансляцией которых при помощи симметричных (или гомологических) операций возможно воспроизвести её целиком («элементарными ячейками»), была высказана В.И. Васильевым, В.И. Драгуновым и Д.В. Рундквистом¹. К выводу о сущностном значении при классификации гранитов их «макрофизиографии» («структурной формулы») пришёл С.М. Бескин и др.². Ими была феноменологически установлена закономерная приуроченность определённого редкометалльного оруденения к гранитам трёх макрофизиографических типов. Закономерную агрегативность зёрен кварца в мономинеральных кварцевых породах (наличие устойчивых ансамблей из не менее чем 25 зёрен) начиная от осадочных нецементированных песков и песчаников до метаморфогенных кварцито-песчаников установил И.С. Делицин³.

Подобные же результаты наблюдений взаимной ориентировки кварцевых зёрен и образования закономерных агрегатов в мономинеральных кварцевых жилах опубликованы в статьях А.Н. Никитина⁴ и О.А. Суставова⁵. Попытки

¹ Васильев В.И., Драгунов В.И., Рундквист Д.В. «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образований различных уровней организации // ЗВМО. 1972. Часть С1. Вып. 3. С. 281–289.

² Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б. Редкометалльные гранитовые формации. Л.: Недра. 1979.

³ Делицин И.С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука. 1985.

⁴ Никитин А.Н. Образование пьезоэлектрических текстур в кварцсодержащих горных породах // Физика Земли. 1996. № 10. С. 15–21.

⁵ Суставов О.А. Структуры кристаллизации кварца в жильных полостях // Урал. мин. школа. 2005. Екатеринбург. Изд-во УГГУ, 2005. 93 с.

визуализировать пространственную регулярность, аналогичную кристаллической решётке в кристаллах минералов, в гранитах и ряде других горных пород с помощью дифракции субмиллиметрового радиоволнового излучения с длиной волны 2÷4 мм предпринимались Р.Л. Бродской¹.

В более общем плане академиком М.А. Садовским высказывалась идея о дискретности геофизической среды («естественной кусковатости»), для уровня горных пород, выражающаяся в наблюдении квантования размеров продуктов их разрушения взрывом, и была установлена так называемая иерархическая шкала кусковатости с «преимущественными» размерами кусков (3÷5, 20÷25 и 450÷500 мм)². Близкие выводы об иерархичности структурной организации геологических тел высказаны Н.З. Евзиковой и нами³. Академиком Д.С. Коржинским⁴ выдвинуто положение (не конкретизированное в минерально-структурном плане и без указаний на возможность его визуализации в горных породах) о локальном – «мозаичном» – равновесии в неравновесных природных геологических процессах. Нам с помощью минералого-петрографических методов изучения вещества удалось установить ранее не визуализированное макроскопическое горнопородное явление – первичную кусковатость (агрегативность, скрытую текстуру, или фрустумацию)⁵ сначала для простых по минеральному составу и генезису, а затем и для полиминеральных и сложных по генезису макроскопически однородных и нетрещиноватых образцов горных пород⁶.

Новое макроскопическое явление в горных породах

В связи с тем, что обнаруженное явление фрустумации горных пород располагается понятию как бы в пограничье между «структурой» и «текстурой» (и ранее называлось нами «элементарной ячейкой» горных пород, надструктурной характеристикой, первичной кусковатостью, агрегативностью), стоит обсудить сами эти понятия. Анализируя вопрос о содержании понятий «структура» и «текстура» в геологии, мы насчитали 29 различающихся между собой определений этих терминов.

Согласно Геологическому словарю, «структура агрегата характеризуется абсолютными и относительными размерами и формой индивидов, способом их сочетания, а также внешними особенностями отдельных минеральных зёрен и агрегатов»⁷, «текстура горных пород – совокупность признаков строения горных пород, обусловленных относительным расположением и распределением составных частей породы»⁸, а «текстура руд – особенности строения рудной массы, обусловленные ориентировкой и пространственным соотношением различных минеральных агрегатов, слагающих руду»⁹. Если логически следовать приведённым определениям, то широко используемое понятие «текстура массивная» представляет собой нелепость, поскольку подразумевает отсутствие текстуры. А если к этому прибавить, что Геологический словарь даёт автономные ряды «структур» и «текстур» для трёх множеств с неясными границами (1 – магматические и метаморфические породы, 2 – осадочные породы и 3 – руды), то становится понятной невозможность привести их в единую систему.

Для изучения фрустумации (первичной кусковатости горных пород) нами проведён комплекс разномасштабных исследований (от нано- до дециметрового уровня) наиболее простых по генезису горных пород с использованием традиционных минералого-петрографических методов (поляризационная микроскопия, фотолюминесценция, рентгенофазовый и микрорентгено-спектральный анализы), а также лазерной ультразвуковой эхоскопии, УЗИ-томографии и нейтронографии. Первичная кусковатость нами первоначально выявлена в мономинеральных горных породах различного генезиса при воздействии коротковолнового ультрафиолетового излучения (длина волны $\lambda=254$ нм): хемогенно-осадочном крупнозернистом галите (Соликамское и Балтийское месторождения, Пермская и Калининградская области, Россия); метаморфогенном мелко-среднезернистом статуарном доломит-кальцитовом мраморе (Каррарское месторождение, Тоскана, Италия) и доломитовом мраморе Кибик-Кордонского месторождения (Красноярский край, Россия);

¹ Бродская Р.Л., Виноградов Е.А., Голованов В.И., Ирисова Н.А., Черепанов В.А. Обнаружение пространственной периодичности в структуре горных пород методами дифракции и радиовидения // Препр. 19. Ин-т Общ. физ. АН СССР. М. 1991. 7 с.

² Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247. Вып. 4. С. 829–831; Он же. О распределении размеров твердых отделистей // ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 1. С. 69–724; Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Препр. ИФЗ АН СССР. 1981. Вып. 1. С. 15–28.

³ Евзикова Н.З. Общие принципы структурной организации геологических тел // Тр. Конгр. «Фундаментальные проблемы естествознания». Т. II. 2000. СПб. С. 24–38; Поваренных М.Ю. О пространственной регулярности («элементарной ячейке») горных пород // Тр. конф. «Биохимические карбонаты антропогенных озёр и источников». Пермь. 1989. С. 138–151; Он же. О фрустумации (свойстве первичной кусковатости, фрагментации) горных пород и её влиянии на их дробимость и возможность крупнокускового обогащения // Тр. годич. собр. РМО. СПб. 2006. С. 168–176; Он же. Об установлении нового свойства горных пород – скрытой текстуры // Доклады РАН. 2008. Т. 419. № 2. С. 233–236; Поваренных М.Ю., Бескин С.М. Применение современных технических и аналитических средств выявления первичной кусковатости (фрустумации, или образования «элементарной ячейки») горных пород. Тр. I Всерос. сем. технолог. минер. Петрозаводск. 2006. С. 138–145; Поваренных М.Ю., Жабин А.Г. Фрустумация (первичная кусковатость) горных пород как проявление квантования-зернистости горнопородного уровня прострени // Уральский геол. журнал. 2007. № 5 (59). С. 51–60; Поваренных М.Ю., Рассулов В.А., Матвиенко Е.Н. О скрытой текстуре (фрустумации) наиболее простых по минеральному составу и генезису горных пород // Минер. журн. 2014. Т. 36. № 1. С. 88–10; Поваренных М.Ю., Загубный Д.Г., Корчуганова Н.И. Поиски благородного опала в Южной Австралии с использованием дистанционных методов // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 31–40; Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н. Развитие теории минералогии и петрографии. Теоретико-системное обоснование естественной классификации горных пород и построения Периодической Системы Минералов. Саарбрюккен. LAP LAMBERT. 2014. 117 с.

⁴ Коржинский Д.С. О равновесии при процессах минералообразования // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1965. № 2. С. 128–131.

⁵ В отличие от феноменологически наблюдавшегося А.М. Садовским с сотрудниками явления дробления горных пород взрывом на дискретные гранулометрические фракции (и названного им «естественной кусковатостью» – блочностью), нами в *неразрушенных горных породах* визуализируется первичная кусковатость – скрытая текстура, существующая до разрушения и, возможно, регулирующая его. Поэтому установленное явление предлагается называть фрустумацией – первичной кусковатостью (от латинского frustum – кусок).

⁶ Поваренных М.Ю. О фрустумации...; Он же. Об установлении нового свойства горных пород...; Поваренных М.Ю., Бескин С.М. Указ. соч.; Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н. Указ. соч.

⁷ Геологический словарь. В 2 т. М.: Недра. 1973. С. 269.

⁸ Там же. С. 300.

⁹ Там же.

метаморфогенном шокшинском (Карелия), уфалейском, кыштымском, тасеевском и егустинском кварцитах и миасском кварцито-песчанике (Урал, Россия); магматогенном среднезернистом кальцитовом безрудном карбонатите (Большегалинское месторождение, Саян, Россия); метасоматическом крупнозернистом датолитовом скарне Дальнегорского месторождения (Приморье, Россия); первично магматогенном автосоматически изменённом мелко- среднезернистом амозит-альбитовом редкометалльном граните, а также в крупнозернистом альбит-амозитовом редкометалльном граните (Этыкинское танталовое месторождение, Забайкалье, Россия); первично магматогенном гидротермально изменённом крупнозернистом силицитовом ядре пегматита (Калба, Казахстан); первично магматогенном автосоматически изменённом средне-мелкозернистом щелочном редкометалльном граните Зашихинского тантало-ниобиевого месторождения (Восточная Сибирь, Россия); лейкократовом двуполевошпатовом мансуровском граните (Башкирия); обыкновенных и драгоценных опалах (включая искусственные) разного генезиса (из месторождений Либанка, Словакия; Кубер-Педи, Андамука, Лайтнинг Ридж, Квинсленд, Южная и Центральная Австралия; Воло и Мезезо, Эфиопия; Эрандике, Гондурас; Радужное, Северное Приморье; Липовка, Урал; Халилово, Башкирия, Россия; Кара-Оба, Казахстан; Акари, Перу; Харт-Маунтин, Орегон, и Йеллоустонский национальный парк, США; Куэнтеро, Мексика).

При вращении образцов ни интенсивность люминесцентного свечения, ни границы первичных кусков – закономерных ансамблей минеральных зёрен с различной её интенсивностью – не изменялись. Механическая обработка (распиловка для приготовления шлифов алмазным инструментом и шлифовка абразивными порошками) также не влияла на положение границ первичных кусков с различной интенсивностью люминесцентного свечения. На дериватографе Q-1000 (Венгрия) в ИГЕМ РАН в диапазоне температур от 100 до 900°C исследованы дифференциально-термические характеристики первичных кусков, составляющих изученный ранее в УФ-лучах образец кибик-кордонского доломитового мрамора. Наблюдалось значимые отличия в потере веса вещества из люминесцировавших голубым цветом первичных кусков и люминесцировавших тёмно-фиолетовым: цветом: 43.3% и 45.1% соответственно. Порошковые образцы этих же первичных кусков, составляющих кибик-кордонский доломитовый мрамор, исследовались с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН-3М (НПО «Буревестник», СССР) в режиме на отражение (геометрия Брегга-Брентано). Съёмку проводили в кварцевых кюветках без усредняющего вращения, порошковые образцы закреплялись при помощи ацетона. Регистрация велась в пошаговом режиме на интервале углов $2\theta = 10-60^\circ$, шаг по $2\theta = 0,1^\circ$ при экспозиции в точке 2с. При совмещении дифрактограмм вещества светло-голубого и тёмно-фиолетового фрустумов отмечена идентичность по положению основных отражений доломита (преобладающая фаза) и отличия их относительной интенсивности (наиболее явственные на дальних углах по 2θ), что свидетельствует¹ о различном содержании изоморфных между собой Ca^{2+} и Mg^{2+} .

С помощью метода лазерной ультразвуковой эхоскопии (ультразвуковой импульсный метод отражённых волн) на установке, смонтированной в Международном лазерном центре МГУ имени М.В. Ломоносова, просканировано 26 отшлифованных дециметрового размера внешне нетрещиноватых и однородных образцов горных пород плоскопараллельной формы. В качестве источника лазерных импульсов использовался импульсный твёрдотельный Nd:YAG-лазер, работающий в режиме модуляции добротности с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, максимальной энергией импульса $E=200$ мкДж при длительности в 15 нс. При этом диаметр светового пучка лазера, фокусирующегося на исследуемом образце, составлял 5 мм. Световой импульс по оптоволоконному кабелю попадал в оптоакустический преобразователь, в котором формировались акустические волны с минимальной длительностью до 100 нс. По акустическому треку, полученному от образцов в режиме эхоскопии, и значению их толщины с учётом плоскопараллельности вычислялись скорость распространения в них продольных упругих волн и глубины залегания дефектов, картина расположения которых в обработанном с помощью компьютерной программы виде выводилась на дисплей (рис. 1).

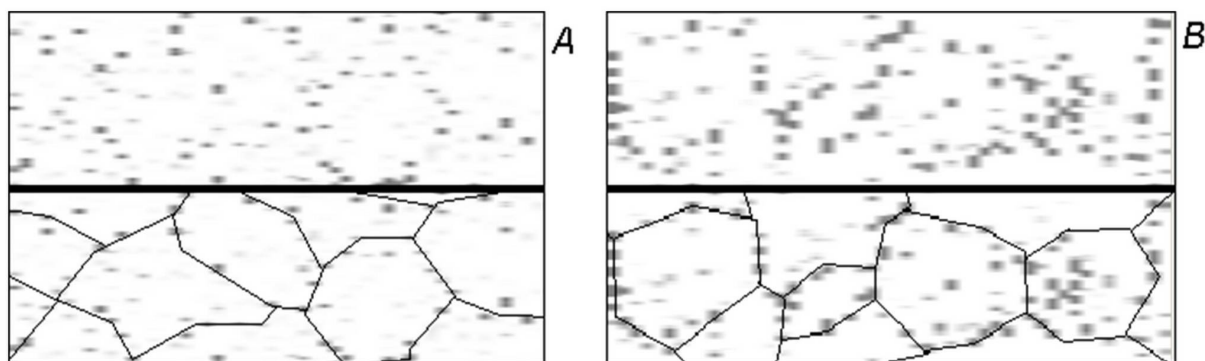


Рис. 1. Визуализированная методом лазерной ультразвуковой эхоскопии картина скрытой текстуры (фрустумации, или первичной кусковатости) мономинеральных горных пород (кибик-кордонского мелко-среднезернистого кальцит-доломитового мрамора, А; кыштымского мелко-среднезернистого гранулированного кварцита, В). Толщина образцов – 13 и 12 мм соответственно. Верхняя часть рисунка – исходная картина, нижняя – ретушированная.

Для всех исследованных образцов горных пород наблюдались разные картины неоднородного внутреннего строения, интерпретируемые как наличие закономерных агрегатов минеральных зёрен (первичных кусков), разграниченных между собой системами макроскопической трещиноватости.

Методом УЗИ-томографии на установке по УЗИ-томографии, смонтированной в лаборатории Ц-03 сейсмометрии и геоакустики геофизического отделения геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (аналитик Владов М.Л.), при частоте 100 кГц исследовано внутреннее строение макроскопически однородного светло-серого

¹ Поваренных М.Ю., Бескин С.М. Указ. соч.; Поваренных М.Ю., Рассулов В.А., Матвиенко Е.Н. Указ. соч.

мелко-среднезернистого двуполевошпатового мусковитового гранита Мансуровского месторождения (Башкирия). С помощью программы АКТАКОМ было обработано 625 акустических замеров и визуализировано его фрустумационное строение (фото 1 цветной вкладки, с. 335).

Примеры фрустумации в равнотермических горных породах

Характерные размеры и форма первичных кусков (фрустумов) в этих исследованных горных породах существенно различаются. Наименьшие по числу их слагающих минеральных зёрен наблюдаются в мономинеральных горных породах: датолитовом скарне из Дальнегорска, силицитовом кварцевом ядре пегматита Калбы, мозырском галите, кибик-кордонском и статуарном каррарском мраморе: около 20÷50 зёрен в сечении (площадь 1–2 кв см) и около 70÷150 зёрен в объёме. Фрустумы в кальцитовом карбонатите состоят из 50÷70 зёрен кальцита в срезе (площадь 2–3 кв см) и около 200÷300 зёрен в объёме, а самые крупные зафиксированы в полиминеральных горных породах – этыкинском амазонит-альбитовом граните и тырнаузском липарите и содержат более 1000 минеральных зёрен калиевого полевого шпата, кварца, альбита, слюды и аксессуарных минералов. То же относится и к визуализируемым без облучения жёстким ультрафиолетом фрустумам типа гексагональных ячеек в метасоматически изменённых амазонит-альбитовых редкометалльных гранитах Этыкинского и Ачиканского массивов (Забайкалье, Россия), а также образованиям спиралевидной формы в метагранитах Украины (Капустинский и Корнинский массивы) и щелочных овоидофирах (нефелиновых сиенитах) Ловозёрского массива (Россия). Морфология фрустумов и способ выполнения ими горнопородных тел, судя по исследованным образцам, весьма прихотливая, и для её описания, вероятно, придётся применять теорию фракталов. Объяснение описанного явления возможно, по нашему мнению, лишь при использовании синергетического подхода в науке о горных породах и представлении о них как о результате возникновения первичных ансамблей (парагенезисов) минеральных зёрен и их кооперативного поведения, в отличие от представления о горной породе как о простом наборе минеральных зёрен.

В искусственных благородных опалах размер фрустумов, визуализированных с помощью длинноволнового УФ-излучения и подтвержденных на РЭМ, варьировал в пределах 0,3÷1,3 мм, а их форма была прихотливой в плане (фото 2 цветной вкладки на с. 333 и рис. 2) и конусовидно-столбчатой в сечении.

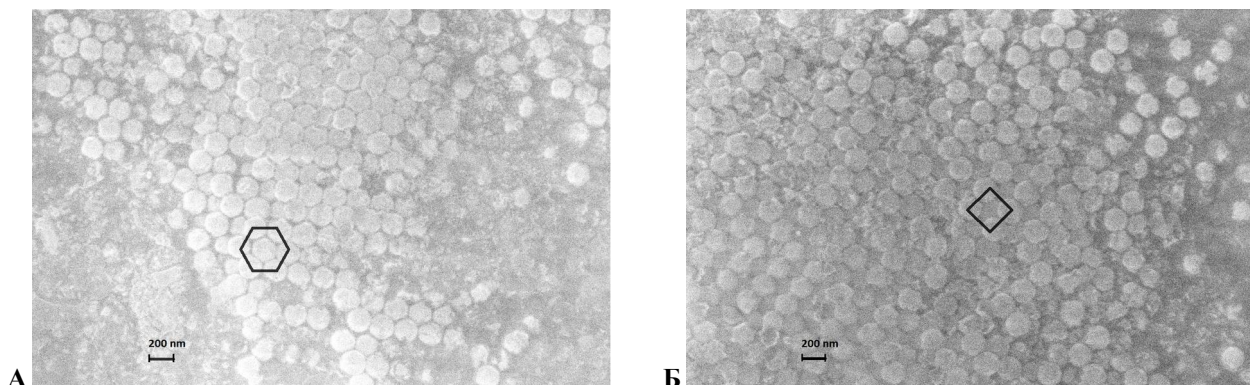


Рис. 2. Расположение глобул кремнезёма в разных фрустумах образца искусственного благородного опала (фото 2Б1 цветной вкладки на с. 335), иризирующих синим и зелёным цветом: А – слева от границы II рода (в «синем» фрустуме). Размер монодисперсных слабо грануломорфных глобул кремнезёма, упакованных в «гексагональный» вариант квазиплотнейшей упаковки, составляет в среднем 242,5 нм. Расстояние между соседними интерстициями – 221 нм (в оптическом диапазоне соответствует синему цвету, $\lambda = 440\text{--}485$ нм); Б – справа от границы II рода (в «зелёном» фрустуме). Расположение глобул кремнезёма с явно заметным «квадратным» мотивом искаженной кубической плотнейшей упаковки. Размер глобул составляет в среднем 230 нм. Расстояние между соседними интерстициями около 248 нм (соответствует зелёному цвету, $\lambda = 495\text{--}565$ нм).

Для образцов благородных опалов (БО) измерен средний диаметр фрустумов (кусков-кластеров, иризирующих по-разному), и можно вычислить плотность облегающей эти фрустумы системы первичной агрегативной нанотрещиноватости. Всего изучено 16 образцов природных (12) и синтетических (4) благородных опалов: По месторождению Лайтнинг Ридж (штат Новый Южный Уэльс, Австралия) – 2 образца. Характерные размеры (усреднённый диаметр) составляющих их фрустумов – 2,0 мм. По месторождению Кубер-Педи (штат Южная Австралия, Австралия) – 3 образца. Характерные размеры фрустумов – 2,7 мм. По месторождению Харт-Маунтин (штат Орегон, США) – 1 образец. Характерный размер составляющих его фрустумов – 2,5 мм. По месторождению в Словакии (Либанка, Червенице) – 1 образец. Характерный размер фрустумов – 2,0 мм. По месторождению Акари в Перу – 2 образца. Характерные размеры составляющих их фрустумов – 2,0 мм. По месторождению в Эфиопии (провинция Вола) – 3 образца. Характерные размеры их фрустумов – 1,5 мм. Искусственных опалов – 4 образца. Характерные размеры фрустумов: А – (pin-fire) – 0,05 мм; Б – (ИОМ-2) – 2,5 мм; В – (Дубна) – 0,1 мм и Г – (гильсонит) – 1,0 мм.

Расчет доли микропористости, приходящейся на субмикротрещинные границы фрустумов, апертура которых оценена (с использованием также данных сканирующей электронной микроскопии) в среднем как $A = 0,25$ мкм, произведен по формуле $V_f \cdot N_f$, где $V_f = 4\pi \cdot d^2 \cdot A$ – объем трещины вдоль границы одного условно сферического фрустума (диаметром d) и $N_f = 6/\pi d^3$ – их количество в единичном объеме образца. Ранее одним из результатов исследования ряда образцов относительно простых по генезису и мономинеральных мелкозернистых горных пород – кварцитов, мраморов и обсидианов – с помощью метода SANS (малоуглового рассеяния нейтронов) в ОИЯИ (Дубна, Россия) явилось установление размерного порядка этой системы первичной агрегативной нанотрещиноватости (аперту-

ра трещин составила $50 \div 100$ нм, в среднем – 60 нм), образующей ветвящуюся сеть по всему объёму изученных пород. Опалы же являются супертонкозернистыми мономинеральными горными породами, состоящими из агрегата мельчайших минеральных индивидов субмикронного размера ($150 \div 450$ нм) – глобул кремнезёма (рис. 3). Изучение **разномасштабной трещиноватости** проводилось в образцах разных горных пород на малоугловом нейтронном спектрометре ЮМО-реактора ИБР-2. В качестве дальнего детектора использовался новый позиционно-чувствительный детектор. Измерения проведены в стандартной геометрии. Образцы закреплялись в держателе, который помещался в бокс с контролируемой температурой. Обработка данных проведена с помощью пакета программ SAS. Рассеяние нейтронов проходило на пористо-трещиноватых структурах внутри вещества изученных образцов горных пород. Результаты свидетельствуют о наличии двух типов первичной субмикротрещиноватости: один - на размерном уровне приблизительно от 4 нм (мы интерпретируем его как индукционные поверхности, растущих совместно им близодновременно зёрен минералов) и второй – на размерном уровне до 60 нм для мраморов из двух различных месторождений.

Рис. 3. Схема внутреннего строения опалов и типов воды в них (интерпретация результатов исследования ИК- и рамановской спектроскопии и термоволюметрии)¹.

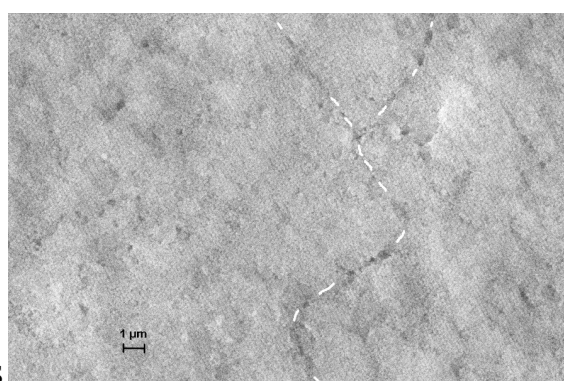
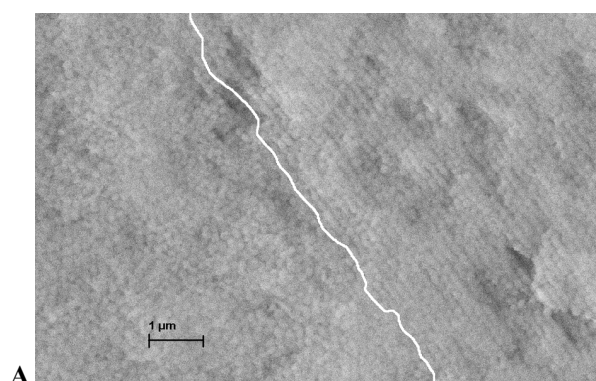
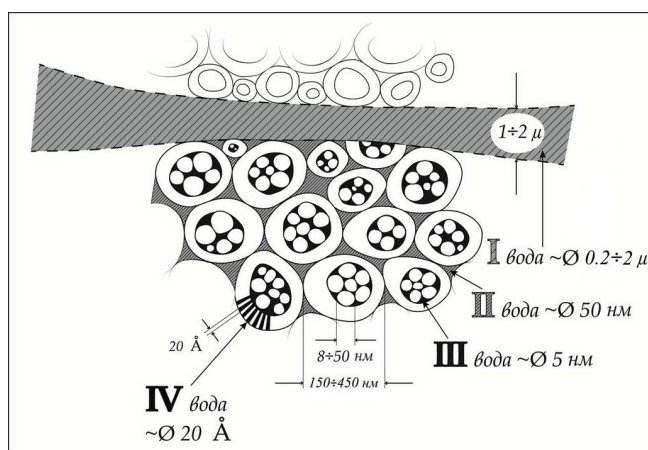


Рис. 4. Границы I (А) и II рода (Б) в опале – микротрещины с апертурой в доли микрон. А – граница I рода, благородного опала (справа) и обыкновенного. Б – границы II рода, между фрустумами, в прожилке благородного опала, проявленные травлением. Месторождение Кубер-Педи (Австралия). Образец КП-БО-3/13 (см. фото 2А цветной вкладки на с. 335). Изображение во вторичных электронах. Электронный микроскоп LEO SUPRA 50VP, режим низкого вакуума (40 Па азота), ускоряющее напряжение 20 кВ. Образец протравлен в 15%-ной HF в течение 60 сек. Фото А.В. Кнотько. Ретушировано.

Исследование внутреннего строения опалов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа SUPRA 50VP LEO (рис. 4–6). По результатам исследования внутреннего строения природных и искусственных благородных опалов с помощью сканирующего электронного микроскопа большого числа образцов разного генезиса различных месторождений мира можно сделать предварительный вывод: в отличие от некоторых образцов искусственного БО, выращенных в спокойных автоклавных условиях, где отмечаются усечённо-столбчатые формы фрустумов (так называемые 3D-фрустумы), в природных БО, выросших в неспокойных условиях, они отличаются слоистой толстотаблитчатой или пластинчатой текстурой (так называемые 2D-фрустумы)² (рис. 6).

¹ Поваренных М.Ю., Рассулов В.А., Матвиенко Е.Н. Указ. соч.; ²Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н. Указ. соч.: Высоцкий С.В., Курявый В.Г., Карабцов А.А. Наноструктура благородного опала месторождения Радужное (Северное Приморье, Россия) // ДАН. 2008. Т. 420. № 4. С. 516–519; Flörke O.W., Gaetsch H., Martn B., Roller K. Wirth R. "Nomenclature of Micro- and Non-Crystalline Silica Minerals, Based on Structure and Microstructure." *N. Jahr. fur Min.-Abh.* 163 (1991): 19–42; Fritsch E., Gaillou E. Ostroumov M., Rondeau B., Devouard B. Barreau A. "Relationship between Nanostructure and Optical Absorption in Fibrous Pink Opals from Mexico and Peru." *Eur. Jour. Miner.* 16 (2004): 743–752.

² Rondeau B., Fritsch E., Mazzerо F., Gauthier J.-P., Cenki-Tok B., Bekele E., Gaillou E. "Play-of-color Opal from Wegel Tena. Wollo Province. Ethiopia." *Gems & Gemology* 46.2 (2010): 90–105; Milos G. *Opal Mineralization of Western Carpathians: Mineralogy and Petrogenesis.* Bratislava: Comenius Univ. Bratislava. Fac. Nat. Sc. Geol. Inst., 2011. 178 p.; Jones J.D., Segnit E.R. "The Occurrence and Formation of Opal at Coober Pedy and Andamooka." *Australian Journal Sci.* 29.5 (1996): 129–133; Коржинский Д.С. О равновесии при процессах минералообразования // Известия АН СССР. Сер. геол. 1965. № 2. С. 128–131.

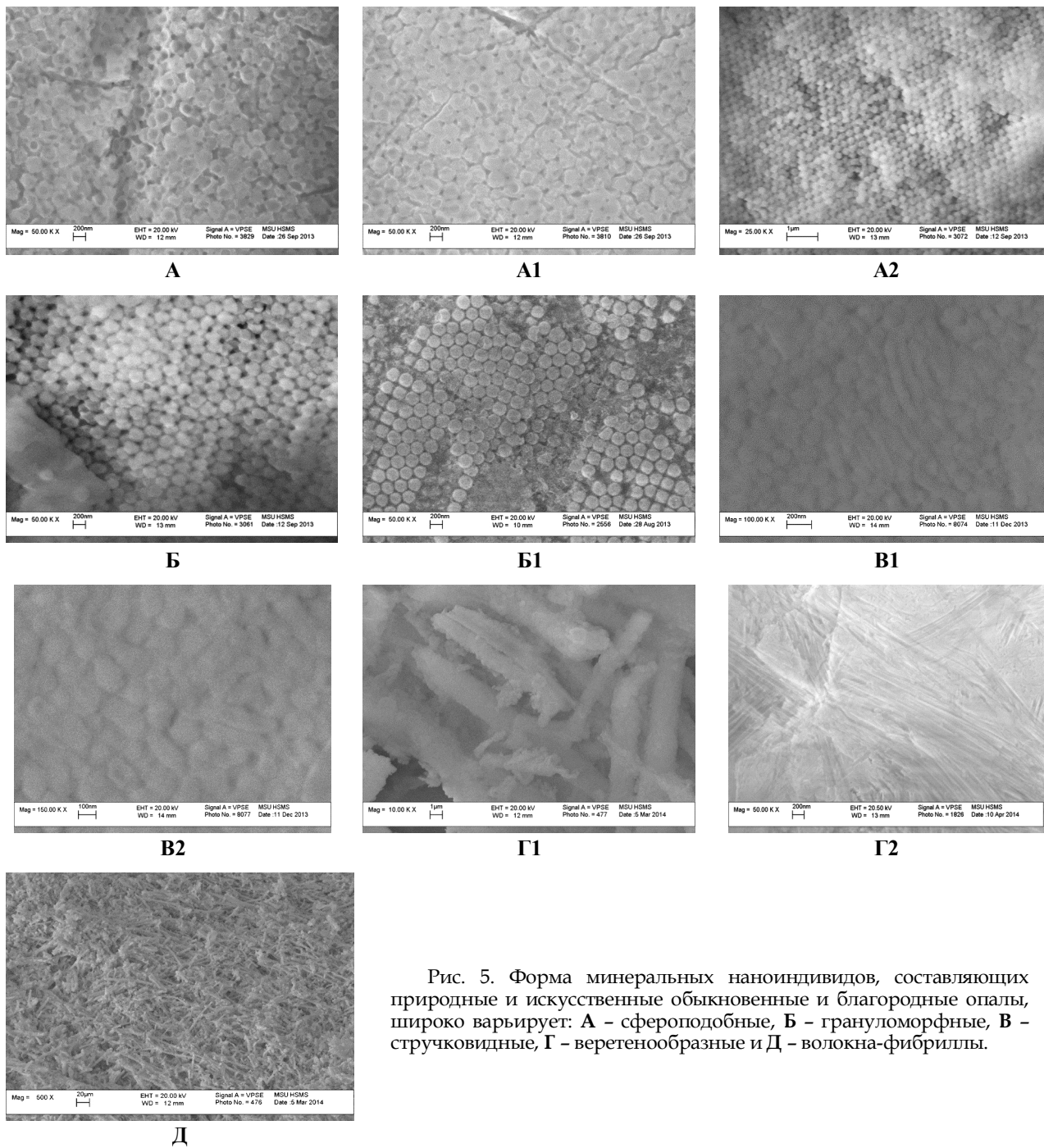


Рис. 5. Форма минеральных наноииндивидов, составляющих природные и искусственные обыкновенные и благородные опалы, широко варьирует: А – сфероподобные, Б – грануломорфные, В – стручковидные, Г – веретенообразные и Д – волокна-фибриллы.

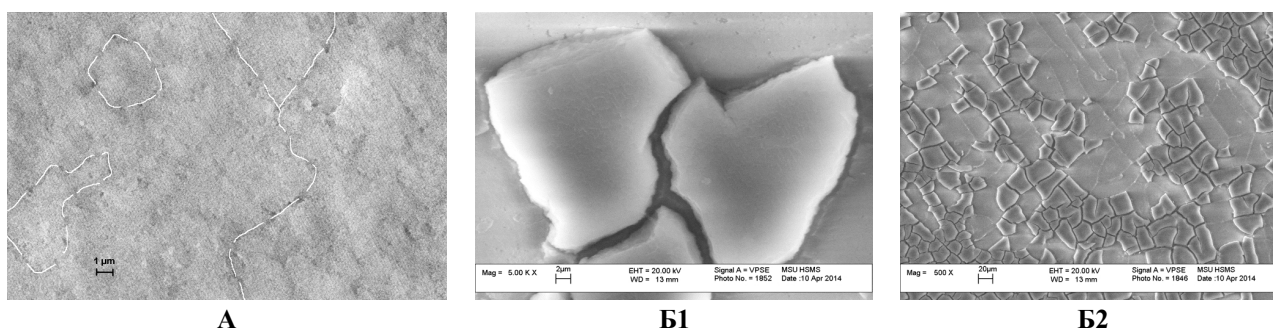


Рис. 6. Характер фрустуляции в искусственных и природных благородных и обыкновенных опалах: А – (3D), Б1 и Б2 – (2D).

Выводы о природе фрустуляции

Рассмотрение скрытой текстуры – первичной кусковатости горных пород как их синергетического свойства, по сути, может способствовать включению теории Д.С. Коржинского¹ в более общую теорию диссипативных структур Ильи Пригожина² и диссипативной саморепликации Джереми Инглэнда³. Скрытая текстура, возможно, является макроскопической визуализацией так называемого «мозаичного равновесия» в неравновесных горных породах, и она даёт представление не только о нижнем размерном пределе этих отдельных элементов «мозаики», но и о форме и характере границ этих своеобразных горнопородных фаз. Для объяснения явления фрустуляции в БО (визуализируемого мозаичным узором иризации) предлагается теория ДЛФО (Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека) для сильно заряженных частиц коллоидного размера⁴ и её расширение Ильёй Пригожиным⁵ и Джереми Инглэндом⁶. На рис. 7А видно, что размеры фрустумов в искусственном геле кремнезёма соответствуют расстоянию между 1-м и 2-м барьерами притяжения на рис. 7Б, но они меньше, чем фрустумы в БО (фото 2, цветная вкладка на с. 335). По имеющимся данным⁷, это может быть связано с уменьшением потенциального барьера отталкивания глобул кремнезёма из-за увеличения ионной силы минералообразующего раствора. Вариации в размерах и форме фрустумов зависят, по-видимому, от условий консервации и созревания геля кремнезёма (периоды без сильных землетрясений и локальных перепадов давления).

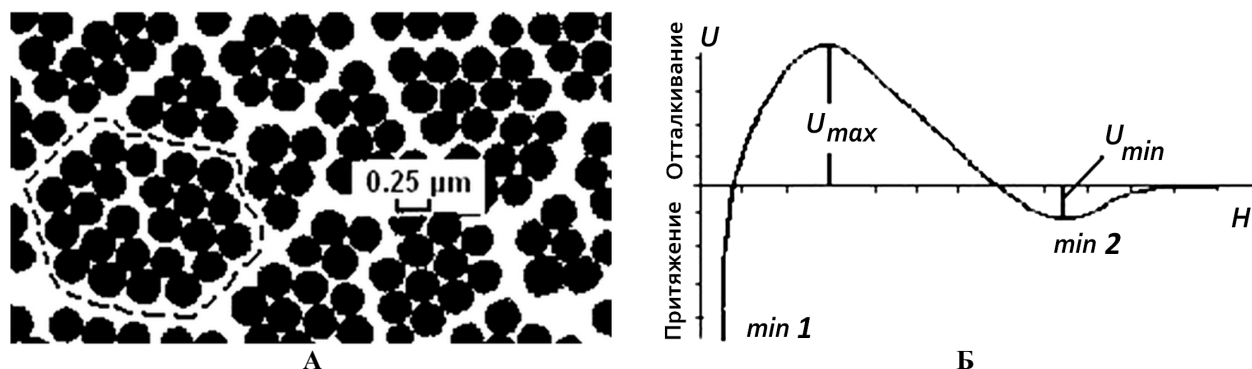


Рис. 7. Образование первичных фрустумов в синтетическом геле кремнезёма из сильно заряженных сферических глобул коллоидного размера (А)⁸ и потенциальная кривая энергии (U) их взаимодействия (Б)⁹. Пунктиром выделен один из первичных фрустумов (А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б. Редкометалльные гранитовые формации. Л.: Недра. 1979. 280 с.
2. Бродская Р.Л., Виноградов Е.А., Голованов В.И., Ирисова Н.А., Черепанов В.А. Обнаружение пространственной периодичности в структуре горных пород методами дифракции и радиовидения. Препринт 19. М.: Ин-т Общ. физики АН СССР, 1991. 7 с.
3. Бродская Р.Л., Марин Ю.Б. Использование стереометрических методов в онтогенетическом анализе горных пород // ЗВМО. 1979. Ч. 108. Вып. 2. С. 141–153.
4. Васильев В.И., Драгунов В.И., Рундквист Д.В. «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образований различных уровней организации // ЗВМО. 1972. Ч. С1. Вып. 3. С. 281–289.
5. Высоцкий С.В., Курявый В.Г., Карабцов А.А. Наноструктура благородного опала месторождения Радужное (Северное Приморье, Россия) // ДАН. 2008. Т. 420. № 4. С. 516–519.
6. Геологический словарь. В 2 т. М.: Недра. 1973. 943 с.
7. Делицин И.С. Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука. 1985. 191 с. 8.
8. Делицин И.С. Элементарная ячейка горных пород и механизм их самоорганизации // Идея развития в геологии: Вещественный и структурный аспекты. Новосибирск. 1990. С. 273–280.
9. Денискина Н.Д., Калинин Д.В., Казанцева Л.К. Благородные опалы (природные и синтетические). Новосибирск: Наука. 1987. 173 с.
10. Евзикова Н.З. Общие принципы структурной организации геологических тел // Тр. Конгр. «Фундаментальные проблемы естествознания». Т. II. СПб., 2000. С. 24–38.

¹ Коржинский Д.С. Указ. соч.

² Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*. New York: J.Wiley&Sons. 1977. 347 p.

³ Dissipatio ergo sum [Электронный ресурс] // Русская планета. 2014. 26 января. Режим доступа: <http://rusplt.ru/world/dissipatio-ergo-sum-7642.html>.

⁴ Derjagin B.V., Landau L.D. "Theory of Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols." *Acta Physicochim. USSR* 14 (1941): 633–662; Verwey F.I.W., Overbeek J.Th. *Theory of Stability of Lyophobic Colloids*. Amsterdam: Elsevier, 1948. 287 p.

⁵ Nicolis G., Prigogine I. Ibid.

⁶ Dissipatio ergo sum...

⁷ Самойлович Л.А., Балакирев В.Г., Самойлович С.М. Некоторые особенности микроструктуры синтетического и природного благородного А-опала // Разведка и охрана недр. 1995. № 3. С. 23–27; Сердобинцева В.В., Калинин Д.В., Восель С.В. Формы коллоидного кремнезёма, участвующие в образовании благородного опала, и механизм окремнения его гелевых кристаллов // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 8. С. 1116–1120; Денискина Н.Д., Калинин Д.В., Казанцева Л.К. Благородные опалы (природные и синтетические). Новосибирск: Наука. 1987. 173 с.

⁸ Самойлович Л.А., Балакирев В.Г., Самойлович С.М. Указ. соч.

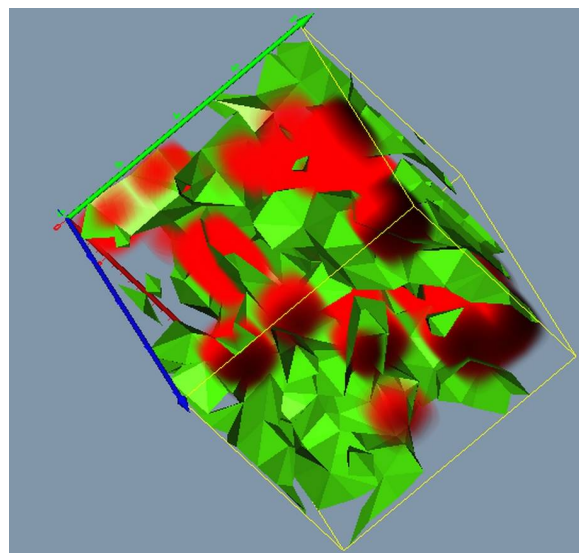
⁹ Сердобинцева В.В., Калинин Д.В., Восель С.В. Указ. соч.; Денискина Н.Д., Калинин Д.В., Казанцева Л.К. Указ. соч.; Калинин Н.С., Сердобинцева В.В. Генезис и поисковые критерии месторождений благородного опала // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 4. С. 340–347.

11. Жабин А.Г. Диагностика синхронности продуктов минералообразования // Минералогический журнал. 1979. Т. 1. №1. С. 42–56.
12. Жабин А.Г. Синнезис и дифференциация течения в магматических расплавах // ЗВМО. 1971. Ч. 100. № 5. С. 578–589.
13. Жабин А.Г., Юшкин Н.П. Синтез и квантование пространства-времени в процессах природного минералообразования // ДАН. 1991. Т. 318. № 1. С. 164–168.
14. Калинин Н.С., Сердобинцева В.В. Генезис и поисковые критерии месторождений благородного опала // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 4. С. 340–347.
15. Коржинский Д.С. О равновесии при процессах минералообразования // Известия АН СССР. Сер. геол. 1965. № 2. С. 128–131.
16. Никитин А.Н. Образование пьезоэлектрических текстур в кварцсодержащих горных породах // Физика Земли. 1996. № 10. С. 15–21.
17. Поваренных М.Ю. К созданию естественной классификации горных пород на основе теоретико-системной концепции «элементарных ячеек» // VIII Научный семинар «Система Планета Земля». М.: РОО «Гармония строения Земли и планет», 2000. С. 73–83.
18. Поваренных М.Ю. О пространственной регулярности («элементарной ячейке») горных пород // Труды конф. «Биохимические карбонаты антропогенных озер и источников». Пермь, 1989. С. 138–151.
19. Поваренных М.Ю. О фрустуляции (свойстве первичной кусковатости, фрагментации) горных пород и её влиянии на их дробимость и возможность крупнокускового обогащения // Тр. годичного собрания РМО. СПб. 2006. С. 168–176.
20. Поваренных М.Ю. Об установлении нового свойства горных пород – скрытой текстуры // Доклады РАН. 2008. Т. 419. № 2. С. 233–236.
21. Поваренных М.Ю., Бескин С.М. Применение современных технических и аналитических средств выявления первичной кусковатости (фрустуляции или образования «элементарной ячейки») горных пород. Тр. I Всероссийского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск. 2006. С. 138–145.
22. Поваренных М.Ю., Жабин А.Г. Фрустуляция (первичная кусковатость) горных пород как проявление квантования-зернистости горнопородного уровня прострени // Уральский геол. журнал. 2007. № 5 (59). С. 51–60.
23. Поваренных М.Ю., Загубный Д.Г., Корчуганова Н.И. Поиски благородного опала в Южной Австралии с использованием дистанционных методов // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 31–40.
24. Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н. Развитие теории минералогии и петрографии. Теоретико-системное обоснование естественной классификации горных пород и построения Периодической Системы Минералов. Саарбрюккен. Изд-во LAP Lambert. 2014. 117 с.
25. Поваренных М.Ю., Рассулов В.А., Матвиенко Е.Н. О скрытой текстуре (фрустуляции) наиболее простых по минеральному составу и генезису горных пород // Минерал. журн. 2014. Т. 36. № 1. С. 88–100.
26. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247. Вып. 4. С. 829–831.
27. Садовский М.А. О распределении размеров твердых отдельных // ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 1. С. 69–72.
28. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород. Препринт ИФЗ АН СССР. М., 1981. Вып. 1. С. 15–28.
29. Самойлович Л.А., Балакирев В.Г., Самойлович С.М. Некоторые особенности микроструктуры синтетического и природного благородного А-опала // Разведка и охрана недр. 1995. № 3. С. 23–27.
30. Сердобинцева В.В., Калинин Д.В., Восель С.В. Формы коллоидного кремнезёма, участвующие в образовании благородного опала, и механизм окремнения его гелевых кристаллов // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 8. С. 1116–1120.
31. Суставов О.А. Структуры кристаллизации кварца в жильных полостях // Уральская минералогическая школа 2005. Екатеринбург. Изд-во УГГУ. 2005. 93 с.
32. Darragh P.J., Gaskin A. I., Terrel B.C., Sanders J.V. "Origin of Precious Opal." *Nature* 204.5018 (1966): 13–16.
33. Derjagin B.V., Landau L.D. "Theory of Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols." *Acta Physicochim. USSR* 14(1941): 633–662.
34. Dissipatio ergo sum [Электронный ресурс] // Русская планета. 2014. 26 января. Режим доступа: <http://rusplt.ru/world/dissipatio-ergo-sum-7642.html>.
35. Flörke O.W., Gaetsch H., Martn B., Roller K. Wirth R. "Nomenclature of Micro- and Non-Crystalline Silica Minerals, Based on Structure and Microstructure." *N. Jahrb. fur Min.-Abh.* 163 (1991): 19–42.
36. Fritsch E., Gaillou E. Ostroumov M., Rondeau B., Devouard B. Barreau A. "Relationship between Nanostructure and Optical Absorption in Fibrous Pink Opals from Mexico and Peru." *Eur. Jour. Miner.* 16 (2004): 743–752.
37. Jones J.D., Segnit E.R. "The Occurrence and Formation of Opal at Coober Pedy and Andamooka." *Australian Journal Sci.* 29.5 (1996): 129–133
38. Milos G. *Opal Mineralization of Western Carpathians: Mineralogy and Petrogenesis*. Bratislava: Comenius Univ. Bratislava. Fac. Nat. Sc. Geol. Inst., 2011. 178 p..
39. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*. New York: J. Willey & Sons. 1977. 347 p.
40. Povarennykh M.Yu., Rassulov V.S., Lobzova R.V. "Frustumation (Fragmentation, Lumpiness, 'Rock Unit Cells' Formation) – the First Discovery of the Rock Universal Property." *Proc. XI Int. Cong. Mathem. Geol. "Quantitative Geology from Multiple Sources"* 2. Liege, 2006. CD-ROM D/2006/0480/31.
41. Rey P.F. "Opalisation of the Great Artesian Basin (Central Australia): an Australian Story with a Martian Twist." *Australian Journal of Earth Science* 60 (2013): 291–314.
42. Rondeau B., Fritsch E., Mazzerro F., Gauthier J.-P., Cenki-Tok B., Bekele E., Gaillou E. "Play-of-color Opal from Wegel Tena, Wollo Province, Ethiopia." *Gems & Gemology* 46.2 (2010): 90–105.
43. Sanders J.V. "Colour of Precious Opal." *Nature* 204 (1964): 1151–1153.
44. Verwey F.I.W., Overbeek J.Th. *Theory of Stability of Lyophobic Colloids*. Amsterdam: Elsevier, 1948. 287 p.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Поваренных, М.Ю., Матвиенко Е. Н. Новое макроскопическое свойство горных пород – фрустуляция – как проявление квантования-кусковатости горнопородного уровня пространственно-временного континуума / М.Ю. Поваренных, Е.Н. Матвиенко // Пространство и Время. — 2015. — № 1—2(19–20). — С. 327—335. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271prov_stl_2-19_20.2015.96.

Фото 1. Визуализация фрустумационного внутреннего строения светло-серого мелко-среднезернистого гранита из Мансуровского месторождения (Башкирия) с помощью томографического просвечивания с применением дефектоскопа УД-У2Н ПМ отечественного производства, предназначенного для измерения скорости распространения продольных волн с постоянной скоростью – 4000 м/с. Центральная частота датчиков – 100КГц. Обработка 625 замеров. Точки возбуждения и приёма располагались на противоположных сторонах образца размерами 10 x 10 x 9 см по равномерной сетке с квадратными ячейками со стороной 2 см. Отметим, что размер выявленных фрустумов (порядка 2.5÷3 см, показаны разным цветом согласно их акустической крепости) соизмерим с длиной излучаемой волны – 4 см. Кафедра сейсмометрии и геоакустики геофизического отделения геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Аналитик М. Владов.



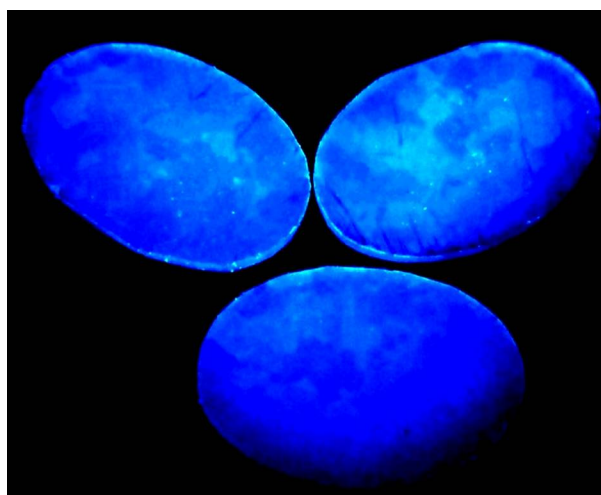
A



B1



B2



B3

Фото 2. **A:** Две генерации опала (обыкновенный, голубовато-серого цвета – ранняя и прожилок благородного, с иризацией в зеленовато-голубой гамме – поздняя) (см. также рис. 4). Образец КП-БО-3/13. Длина – 2,4 см. Кубер-Педи, Ю. Австралия. Сбор МЮП, август 2012 г. Фотография А.А. Евсеева (Минералогический музей РАН). **B1-B3:** Фрустумация в искусственном благородном опале (Япония). **B1** – иризация в синезелёных тонах при естественном освещении; **B2** – ретушированные границы фрустумов в УФ-излучении (белые контуры); **B3** – фрустумы, выявленные в опалах при УФ-излучении. Длина образцов – 3 мм. Фотография В.В. Морошкина (ФГУП «ВИМС»).