

УДК 552.5

«ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ БЕНАРЫ» В ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ*Р.Х. Сунгатуллин, Р.И. Кадыров***Аннотация**

Рассмотрены примеры упорядоченных гексагональных образований – «геологических бенаров». Представлены результаты исследований доломитового гексагона из пермских осадочных отложений на правом берегу р. Волга методами оптической микроскопии, электронного парамагнитного резонанса и рентгеновской дифракции. Предложен вариант генезиса данного объекта.

Ключевые слова: ячейки Бенара, гексагон, самоорганизация, доломит, ЭПР.

Постановка вопроса

С общенаучных позиций структура геологического пространства представляется в виде пространственно-временной неоднородности и нестабильности ([1–3] и др.). Последние являются результатом дискретности (делимости), постоянного перераспределения вещества и энергии. Неоднородность Земли во многом определена ее развитием как самоорганизующейся диссипативной системы, для которой характерны нелинейность, необратимость и неравновесность [2, 4, 5]. Существующие неоднородности в пространстве можно рассматривать как пример организации упорядоченной структуры из хаоса, как дискретность возможных состояний, в которые может переходить система в процессе эволюции. С другой стороны, одно из основных научных понятий в геологии – симметрия – характеризуется разными эмпирическими проявлениями пространственных состояний естественных тел Земли, оставаясь во многом загадкой [6]. Естественное развитие симметрии тесно связано с идеями самоорганизации материи. Самоорганизация – процесс пространственного, временного или пространственно-временного упорядочения в открытой системе за счет согласованного взаимодействия множества элементов ее составляющих ([4, 7] и др.).

Общим законом эволюции материи, как утверждает термодинамика, является снижение уровня свободной энергии системы, что должно отражаться и в окружающем мире созданием наиболее энергетически выгодных структур. Классическим физическим подтверждением факта организации упорядоченной структуры из хаоса является формирование «ячеек Бенара» (рис. 1). Последние отвечают самопроизвольному образованию за счет конвекционного потока на поверхности нагреваемой снизу вязкой жидкости правильных шестиугольных (или цилиндрических) ячеек и выступают примером создания пространственно-временных структур при фазовом неравновесном переходе. В классическом понимании ячейки Бенара – возникновение порядка из хаоса [4] в виде конвективных ячеек в форме цилиндрических валов или правильных шестигранных

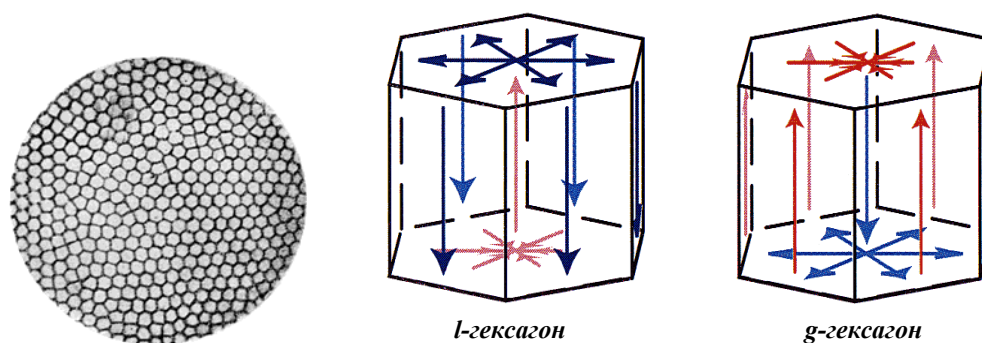


Рис. 1. Ячейки Бенара: слева – вид сверху; в центре и справа – направление движения жидкости в гексагонах [12]: красными стрелками обозначены потоки более горячей жидкости, синими – более холодной

структур в слое вязкой жидкости с вертикальным градиентом температуры [8]. В более широком смысле к ячейкам Бенара относят все физические абиогенные гексагональные структуры, возникновение которых связано с процессами самоорганизации.

Примеры гексагональных объектов

Независимо от масштаба и природы ячеек правильные гексагональные структуры обнаруживают черты подобия и симметричности, что свидетельствует, вероятно, об общих закономерностях их развития [1]. Отсюда ячеисто-сотовая (мозаичная) структура рассматривается одним из авторов как одна из основных характеристик геологического пространства [9]. В свою очередь, подобная упорядоченность отвечает фундаментальному делению окружающего мира на два типа структур: иерархические и модульные [10]. Первый тип структур соответствует интенсивному (вертикальному) соподчинению объектов и вещества; второй тип характеризует экстенсивное (горизонтальное) взаиморасположение элементов разного масштаба. Поэтому ячеисто-сотовая структура геологического пространства системно учитывает пространственные и временные взаимосвязи между вертикальными блоками (ячейками) эндогенного генезиса и горизонтальными структурами-средами (сотами) экзогенного происхождения.

Среди элементов с ячеисто-сотовой структурой в геологическом пространстве можно выделить 2 типа конвективных гексагонов (см. рис. 1). В первом из них (*l*-гексагон) нагретый материал (вещество с аномальными «положительными» свойствами) поднимается в центре ячейки, а холодный материал (вещество с аномальными «отрицательными» свойствами) опускается по контуру ячейки. Во втором типе ячеек (*g*-гексагон) происходит обратный процесс: нагретый материал поднимается по контуру ячейки, а холодный материал опускается в центре. Примером *l*-гексагона является «Русская тепловая ячейка» в астеносфере под Восточно-Европейской платформой размером 1500×1500 км [11]. В центре данной ячейки расположен восходящий тепловой поток, а в углах ячейки – шесть нисходящих потоков. Подобная конвекция в ячейке характеризует наиболее эффективное распределение глубинной природной энергии в приповерхностной части литосферы.

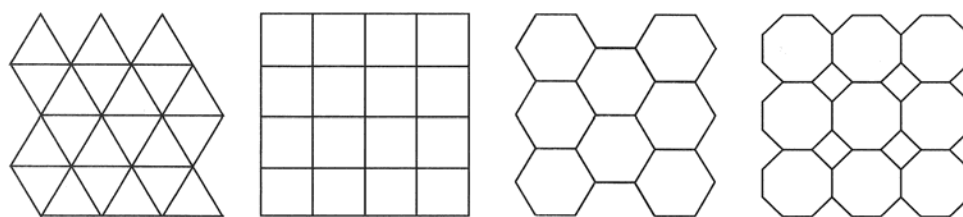


Рис. 2. Способы покрытия плоскости правильными ячейками одинаковой формы [12]

Системы, состоящие из гексагонов, относятся к наиболее экономичным и энергетически выгодным конфигурациям [12] по сравнению с другими формами ячеек (рис. 2). В гексагональной структуре отсутствуют какие-либо «зазоры» ячеек-объектов во всех трех измерениях, и поэтому ячеистая структура эффективно перераспределяет подведенную энергию. Подтверждением подобных выводов служат гексагональные структуры, характерные для широкого пространственно-временного масштаба живой и косной природы Земли (рис. 3), включая и так называемые «геологические бенары» [12] – гексагональные структуры в геобъектах. При этом механизм образования «геологических бенаров» хорошо изучен лишь для ячеистой структуры почвы, развитой на многолетнемерзлых породах (рис. 3, з). Их появление обусловлено быстрым оттаиванием почвы, сопровождающимся упорядоченной конвекцией воды в ее приповерхностных слоях [13, 14]. Образование полигональных (ячеистых) почв очень похоже на классическое образование конвективных ячеек Бенара.

Ранее одним из авторов показано [15, 16], что в осадочных комплексах выделяются гексагональные ячейки с совместным проявлением природного минералогического потенциала и техногенных процессов, где концентрируются флюидные потоки жидких и газообразных веществ. Подобные структуры из точки своего зарождения при развитии техногеосистемы за счет вертикально-горизонтального энерго- и массопереноса расширяются, постепенно захватывая новые области геологического пространства. Обмен веществом в подобной ячейке обусловлен физическим механизмом вертикального тепло- и массопереноса при миграции флюидов снизу вверх (преимущественно, природное направление) и сверху вниз (преимущественно, техногенное направление) и напоминает подобный процесс в *l*- и *g*-гексагонах (см. рис. 1). В отличие от природных гексагонов, в техногенно-преобразованном гексагоне энерго- и массоперенос происходит в обоих направлениях, что обуславливает дестратификацию и азональность осадочного разреза с образованием здесь техногенных скоплений полезных ископаемых [15].

Гексагональные структуры характерны и для других планет Солнечной системы. Так, недавно выявлен гигантский гексагон на северном полюсе Сатурна (рис. 4). Он представляет собой атмосферный феномен в виде геометрически правильного шестиугольника с поперечником в 25 тыс. км. Сегодня нет точного объяснения данного феномена, но предложена модель, согласно которой гексагон представляет собой некую метастабильную волну, или солитон, окружающую полюс [17].

Результаты исследований

В 2007 г. доцентом Казанского университета Э.А. Королевым на правом берегу р. Волга в районе с. Сюкеево (70 км южнее г. Казань) в верхнеказанских (пермских) отложениях обнаружен пласт доломита, сложенный гексагональными призмами (рис. 5). Видимая мощность пласта достигает 0.3–0.4 м, а его длина в пределах обнажения – около 7 м. На исследуемой территории отложения верхнеказанского подъяруса представлены в основном гипсами и доломитами с редкими прослоями мергелей и глин [18]. Полная мощность верхнеказанского подъяруса составляет 50 м.

С общегеологических позиций пласт доломита сформирован в эвапоритовом бассейне позднеказанского времени в результате хемогенного осаждения доломитов или постседиментационного преобразования известняков при воздействии на них морской воды или при диагенезе [19]. Разделение пласта на отдельные геологические тела (гексагональные призмы) связано с воздействием на породу сульфатных вод, о чем свидетельствуют следы выщелачивания и наличие гипса как между призмами, так и в доломите (см. рис. 5). Предполагается, что подобные структуры в осадочных бассейнах образуются достаточно часто, однако из-за интенсивного действия на породы вторичных (экзогенных) процессов в приповерхностных земных условиях правильные гексагоны не сохраняются (не проявляются). Исходя из вышеизложенного, данный объект можно рассматривать как «геологический бенар», изучение которого представляет большой теоретический и практический интерес. Кроме того, преобразование пород и формирование в пределах района разнообразного комплекса полезных ископаемых (битумы, сера, минеральные воды, кремнистые поделочные камни) определяется воздействием на отложения эвапоритового бассейна внедряющихся по вертикали глубинных флюидов и теплового потока [18, 20], что приводит к преобразованию осадочных пород. Столбообразная геологическая структура возле с. Сюкеево, объединяющая вертикальные и горизонтальные энерго- и массопотоки в осадочном разрезе, названа нами «Сюкеевской палеоэнергетической аномалией» [18], в пределах которой формируется широкий и специфический набор твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых.

Один из гексагонов обнажения Сюкеево нами отобран для детального оптико-микроскопического и электронно-парамагнитного изучения (см. рис. 5). Высота исследованной призмы составила 0.2 м, диагональ – 0.22 м, а длина ее горизонтальных ребер – 0.11 м, вес – 20 кг. Вертикальные грани призмы преимущественно несут следы интенсивного выщелачивания и кавернообразования с образованием вторичного гипса. За счет процессов физического выветривания каверны на внешних гранях призмы сглаживаются.

Несмотря на то что условия формирования гексагональной призмы доломита отличаются от других «геологических бенаров» (см. выше), мы применили к нему термин «геологический бенар», так как все основные условия образования диссипативных структур здесь соблюдаются [21]: а) система является термодинамически открытой; б) отклонение от равновесия превышает критическое значение; в) динамические уравнения системы нелинейные; г) эффект упорядочения обнаруживается только на макроскопическом уровне.

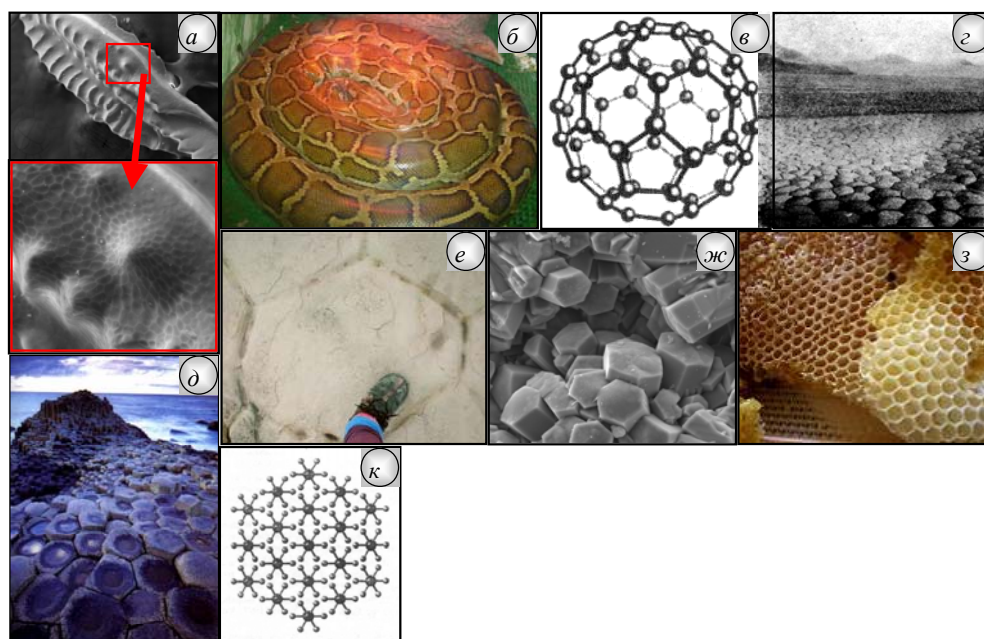


Рис. 3. Примеры ячеисто-сотовой структуры в природных и искусственных объектах Земли: *a* – ископаемая фауна (каменноугольный конодонт); *б* – питон; *в* – молекула фуллерена; *г* – ячеистая почва в тундре; *д* – отдельность в базальтах; *е* – ячейки в пермских карбонатах; *ж* – кристаллы апатита; *з* – пчелиные соты; *и* – структура кальцита

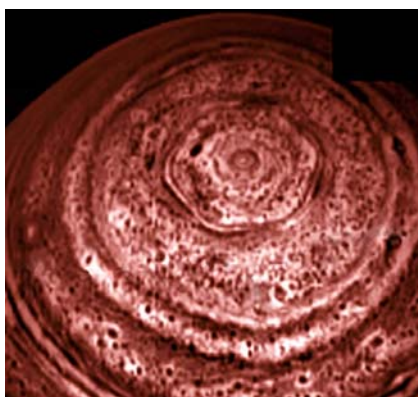


Рис. 4. Гексагональное образование на Сатурне [17]

До начала лабораторных исследований нами предполагалось, что призма может иметь концентрическую зональность. Однако поперечный распил призмы не обнаружил видимых признаков зональности. Места отбора образцов в поперечном сечении призмы расположены от периферии к центру (см. рис. 5). При оптико-микроскопическом изучении трех шлифов установлено, что все образцы состоят из однородных зерен микрозернистого доломита с небольшими включениями гипсовых линз (рис. 6).

Для выявления зональности также проведены исследования методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Известно [22], что наиболее распространенными парамагнитными центрами в доломите являются примесные



Рис. 5. Пласт доломита (слева) и гексагональная призма (справа) с местами отбора образцов. Фото Э.А. Королева

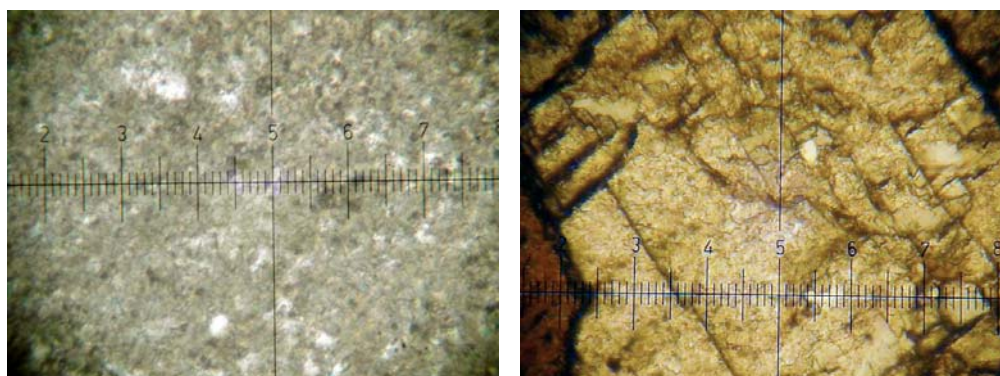


Рис. 6. Доломит (слева) с включениями гипса (справа). Увеличение 10

Табл. 1

Результаты исследования доломита гексагональной призмы методом ЭПР

Номер пробы (см. рис. 5)	Концентрация Mn^{2+} , 10^{18} спин/г	Параметр α
0	206	4.70
1	239	4.58
2	267	4.57
3	231	4.71
4	317	4.70

ионы Mn^{2+} , изоморфно замещающие Ca^{2+} и Mg^{2+} в доломите. Результаты исследования доломита гексагональной призмы с помощью метода ЭПР позволили получить первые данные по распределению ионов марганца (табл. 1).

По спектрам ЭПР Mn^{2+} установлена относительная заселенность марганцем Са- и Mg-позиций в структуре доломита, которая характеризуется параметром α [22]. Данный параметр достаточно эффективно применяется для расшифровки вопросов доломитообразования [23] и представляет собой отношение интенсивности линии Mn^{2+} в Mg-позиции к интенсивности линии Mn^{2+} в Са-позиции [24]: $\alpha = 15 \cdot I(Mn[Mg])/I(Mn[Ca])$. Анализ спектров ЭПР показал,

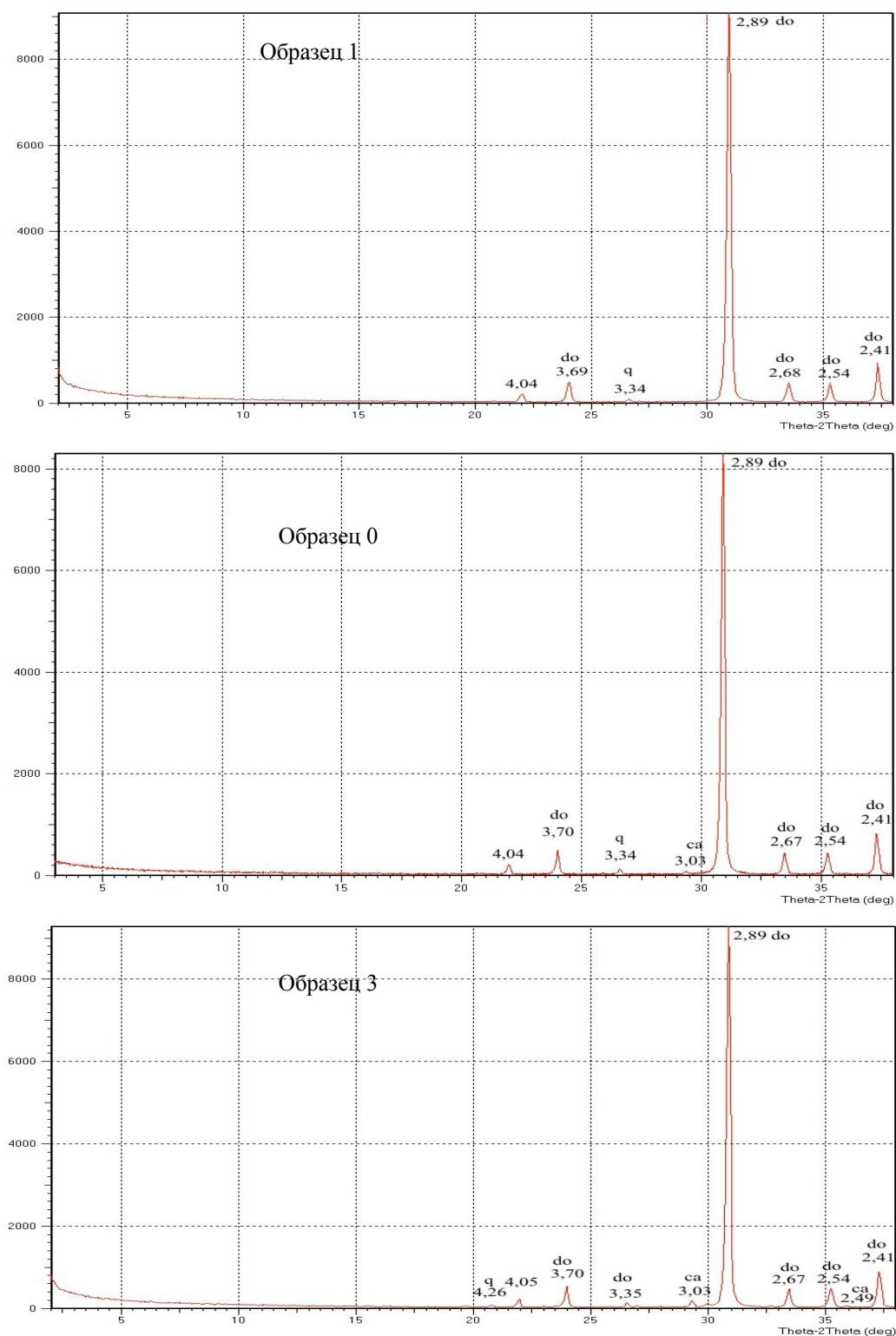


Рис. 7. Рентгенограммы образцов (места отбора образцов см. рис. 5)

что вариации значений концентрации Mn^{2+} и параметра α в пределах поперечного среза призмы незначительны. Наличие зональности не выявлено. Однородность полученных результатов показывает, что изучаемая порода была сформирована в однотипных условиях.

По результатам изучения гексагональной призмы методом рентгеновской дифракции установлено, что образцы центральной и краевой частей гексагона состоят из доломита, кальцита и кварца (рис. 7). По полуколичественному анализу преобладает доломит, имеется небольшое количество кальцита и включений кварца. Не выявлены существенные отличия в минералогическом облике образцов.

Выводы

Таким образом, проведенное изучение «геологических бенаров» позволяет сделать некоторые обобщения.

Симметричные объекты – «геологические бенары» – встречаются в открытых геосистемах разного иерархического уровня, включая и осадочные бассейны. В последних «геологические бенары» встречаются редко, что обусловлено интенсивностью процессов физического, химического и биологического выветривания осадочных пород в приповерхностных условиях.

Впервые с помощью методов оптической микроскопии и электронного парамагнитного резонанса исследована гексагональная призма доломита в эвапоритовом пермском бассейне. Полученные данные свидетельствуют о том, что доломит сформировался в однотипных условиях.

Возможно, что разбиение осадочного пласта на гексагоны связано с воздействием на доломит сульфатных вод, восходящих из нижележащих гипсоносных горизонтов.

Проведенное исследование на микроуровне не привело к однозначному решению вопроса о природе доломитового гексагона в осадочном пласте. Однако дальнейшее изучение «геологических бенаров» с помощью специальных современных методов может помочь расшифровке образования симметричных гексагональных структур природного и техногенного происхождения на Земле, а также в других объектах Вселенной.

Авторы благодарят профессора Казанского университета А.И. Бахтина, доцентов О.Н. Лопатина и Э.А. Королева за обсуждение результатов исследования.

Summary

R.Kh. Sungatullin, R.I. Kadyrov. "Geological Benars" in Sedimentary Basins.

This article deals with the examples of ordered hexagonal structures – “geological benars.” Dolomite hexagon from the Permian sediments on the right bank of the Volga River has been investigated using the methods of optical microscopy, electron spin resonance, and X-ray diffraction. The results of the investigation are presented. A version of the genesis of this geological object is proposed.

Key words: Benard cells, hexagon, self-organization, dolomite, ESR.

Литература

1. *Красный Л.И.* Система делимости – от Вселенной до микромира // Докл. РАН. – 2002. – Т. 383, № 6. – С. 796–800.
2. *Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 230 с.
3. *Пуцаровский Ю.М.* Линейность и нелинейность в геологии // Геотектоника. – 1999. – № 3. – С. 42–49.
4. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
5. *Пригожин И., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 240 с.
6. *Вернадский В.И.* Философские мысли натуралиста. – М.: Наука, 1988. – 520 с.
7. *Хакен Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 411 с.
8. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 393 с.
9. *Сунгатуллин Р.Х.* Интегральная геология. – Казань: Образц. тип., 2006. – 142 с.
10. *Сороко Э.М.* О природе иерархий-аттракторов // Динамика и развитие иерархических (многоуровневых) систем. – Казань: Волга Пресс, 2003. – С. 20–22.
11. *Христофорова Н.Н., Бергеманн М.А.* Совместный анализ теплового и гравитационного полей: геологическая интерпретация локальных и региональных вариаций // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2009. – С. 72–74.
12. *Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю.* Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований. – М.: ГЕОС, 2001. – 312 с.
13. *Hallet B.* Spatial self-organization in geomorphology: from periodic bedforms and patterned ground to scale-invariant topography // Earth-Sci. Rev. – 1990. – V. 29. – P. 57–75.
14. *Krantz W.B.* Self-organization manifest as patterned ground in recurrently frozen soils // Earth Sci. Rev. – 1990. – V. 29. – P. 117–130.
15. *Сунгатуллин Р.Х.* Формирование техногенных месторождений в Республике Татарстан // Изв. вузов. Горн. журн. – 2010. – № 1. – С. 118–124.
16. *Сунгатуллин Р.Х., Сунгатуллина Г.М.* Минерагенические системы и интегральные модели // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 11. – С. 25–29.
17. *Barbosa A., Read P., Wordsworth R., Saltera T., Yamazaki Y.H.* A laboratory model of Saturn's North Polar Hexagon // Icarus. – 2010. – V. 206, No 2. – P. 755–763.
18. *Сунгатуллин Р.Х., Кадыров Р.И., Тюрин А.Н., Игнатьев С.В.* Строение и условия разработки Сюкеевского месторождения гипса // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2011. – Т. 153, кн. 3. – С. 247–261.
19. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. Т. III. Закономерности состава и размещения аридных отложений. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 550 с.
20. *Королев Э.А., Хузин И.А., Леонова Л.В., Галеев А.А.* Минералогические особенности аутигенных кальцитов Сюкеевского месторождения битумов как результат взаимодействия биогенных и абиогенных факторов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2008. – Т. 150, кн. 3. – С. 162–168.
21. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир, 1979. – 279 с.

22. *Муравьев Ф.А.* Литолого-минералогическая характеристика пермских маркирующих карбонатных горизонтов РТ: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Казань, 2007. – 196 с.
23. *Мухутдинова Н.Г.* Литология и битуминозность отложений казанского яруса Мелекесской впадины ТССР: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Казань, 1991. – 194 с.
24. *Тимесков В.А., Крутиков В.Ф., Богданов Н.Г.* Геохимия марганца в карбонатных породах магнезитовых месторождений СССР // Сов. геология. – 1983. – № 12. – С. 93–101.

Поступила в редакцию
14.11.11

Сунгатуллин Рафаэль Харисович – доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Rafael.Sungatullin@ksu.ru

Кадыров Раиль Илгизарович – аспирант кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: Rail7777@gmail.com