

УДК 551.243.33+530.1

МОРФОСТРУКТУРА ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ И ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ

© 2022 г. М. Г. Леонов

*Геологический институт РАН, Москва, Россия,**E-mail: mgleonov@yandex.ru*

Введение. С 90-х годов XX века принципы фрактальной геометрии начали проникать в геологию, и этот аспект исследований привлекает все больше внимания. Одновременно, развитие получил бассейновый анализ, однако представления о фрактальной геометрии при описании структуры осадочных бассейнов использованы не были. Данная статья является попыткой связать наблюдаемые закономерности строения осадочных бассейнов с принципами фрактальной геометрии. *Объекты исследования.* Изучен ряд отрицательных структур земной коры: протерозойские Онежская и Оршанская мульды, палеозойский Мичиганский бассейн, мезозойские и кайнозойские впадины Тянь-Шаня, Предкавказского прогиба, Зондского шельфа, Эль-Рифа. *Методы исследования.* В работе использован сравнительный структурно-тектонический анализ геологических объектов. Для объяснения выявленных закономерностей строения ОБ привлечены понятия фрактальной геометрии в ее описательном аспекте. *Результаты исследования.* Установлено фундаментальное свойство ОБ – дифференциация первичных осадочных ванн на систему вторичных антиклинальных (поднятия) и синклинальных (прогибы) линейных морфоструктур. Установлена пространственная упорядоченность интрабассейновых поднятий и впадин, выраженная в расположении осевых плоскостей структур с шагом от 15–25 до 30–50 км, а также иерархическая размерность (от мега- до микромасштаба) структур в породах фундамента бассейнов. *Обсуждение материала.* Разнопорядковые бассейновые структуры, обладают сходным строением, упорядоченностью пространственного расположения и геометрического рисунка, и, следовательно, являются в определенной степени иерархически построенными самоподобными объектами, что указывает на их фрактальный характер. Это положение подтверждается возникновением структур типа вязких пальцев (*viscous fingers*), имеющих фрактальную природу. *Выводы:* Приведенные данные делают правомерным применение принципов фрактальной геометрии к описанию природных осадочных бассейнов.

Ключевые слова: осадочный бассейн, вязкие пальцы, геометрия, морфоструктура, тектоника, фракталы.

Для цитирования: Леонов М.Г. Морфоструктура внутриконтинентальных осадочных бассейнов и фрактальная геометрия // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 3–16. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_3.

«Фрактальный подход является... и эффективным и естественным. Следует не только принять его..., но и поразиться тому, как мы могли... без него обходиться».

Бенуа Б. Мандельброт

Введение

Предпосылкой для постановки вопроса послужили несколько положений. В 1982 г. Б. Мандельброт [Mandelbrot, 1982; Мандельброт, 2002] ввел в обиход понятия «фракталы» и «фрактальная геометрия»,

что позволило по-новому взглянуть на сущность природных объектов. В эти же годы М.А. Садовский [Садовский, 1979] разработал парадигму «кусковатости» геологической среды, обосновав принципы ее структурной делимости, что расширило возможности структурной тектоники. В 1990 г. П. и Дж. Алленами [Allen, Allen, 1990] были изложены основы «бассейнового анализа», который стал одним из приоритетных направлений в геологии [Осадочные..., 2004]. Подходы фрактальной геометрии нашли применение при описании геологических объектов [Вадковский и др., 2003; Горяинов, Иванюк, 2001; Неведимова и др., 2003; Sergeev, 2016; Turcotte, 1997], однако для осадочных бассейнов использованы не были. Объем статьи не позволяет рассмотреть вопрос в полном объеме – это, скорее, по образному выражению Б. Мандельброта «собрание прецедентов». В статье изложены предварительные соображения относительно применимости фрактальной геометрии к описанию седиментационных бассейнов.

Фракталы и фрактальная геометрия

Описание дано на основе данных, изложенных в [Бекман, 2010; Гараева, 2018; Жуков, Лямин, 2007; Иванюк, 1997; Иудин, Копосов, 2012; Латыпова, 2020; Мандельброт, 2002; Насонов и др., 2018; Терехов, 2011; Федер, 2014; Bande, 1995; Engelberts, Klinkenberg, 1951; Mandelbrot, 1982; Måløy et al., 1985; Voss, 1985]. Описание фракталов и их свойств требует сложного математического аппарата, основы которого изложены в перечисленных публикациях. Я сознаю необходимость использования математического аппарата, в частности, для определения фрактальной размерности рассматриваемых объектов. Однако такая работа затруднена в силу ряда обстоятельств, которые изложены в разделе «Обсуждение материала и выводы». В этой статье, базируясь на мнении основателя учения о фракталах математика Б. Мандельброта, который считал, что интуитивно-образное восприятие отражает суть явления не менее точно, чем формула и цифра, проблема фракталов будет рассмотрена в ее описательном аспекте.

Понятие «фрактал» (от лат. fractus – фрагмент) было введено франко-американским математиком Бенуа Б. Мандельбротом [Mandelbrot, 1982], который изначально определял фрактал, как «множество, размерность Хаусдорфа-Безиковича которого больше его топологической размерности». Это определение, в свою очередь, требовало дополнительных определений (множество, размерность, топология). В последующем Мандельброт предложил применять термин «фрактал» для обозначения структур, «состоящих из частей, которые в каком-то смысле подобны целому» (цитата по [Федер, 2014], стр. 19). Известный норвежский математик Е. Федер в своей фундаментальной работе, посвященной фракталам [Федер, 2014], подчеркивая, что «строгого и полного определения фракталов пока не существует», предлагает пользоваться именно этим простым и ясным определением. Автор следует

примеру этих двух исследователей.

Фрактальная геометрия рассматривает объекты, состоящие из частей, представляющих собой уменьшенное подобие «исходной» структуры. Это справедливо для математических моделей и так называемых «регулярных» фракталов. Реальные объекты являются стохастическими (случайными) фракталами – в каждом отдельном фрагменте такого фрактала вся фигура повторяется лишь в общих чертах. Тем не менее, фрактальные объекты в любом масштабе обнаруживают сходные фундаментальные элементы, что определяет дробную (фрактальную) размерность структуры. Физический смысл фрактальной размерности состоит в том, что она связывает между собой целое и дробное изучаемого объекта, а также отражает степень его сложности. Свойство частей быть подобными всей структуре в целом называется

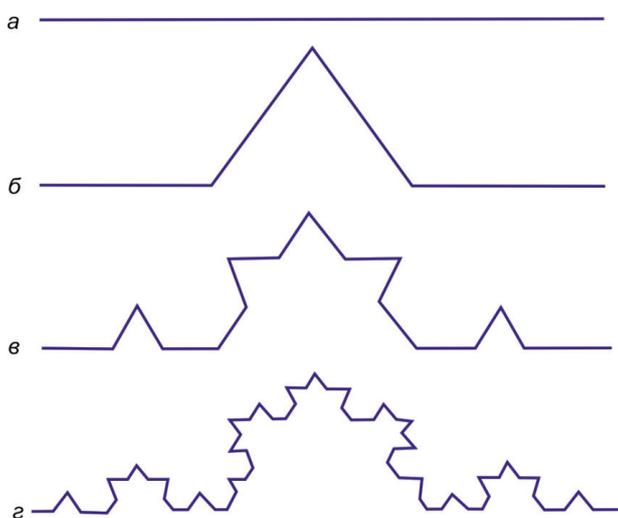


Рис. 1. Кривая Коха отражает иерархию и самоподобие фрактальных структур

самоподобием – и это одно из фундаментальных свойств фракталов. Другими фундаментальными свойствами фракталов является делимость на самоподобные фрагменты и иерархичность структуры, т.е. ее повторяемость на разных масштабных уровнях. Наиболее простым и наглядным примером этих свойств является фрактальная кривая Коха (рис. 1).

Морфоструктура осадочных бассейнов

Осадочные бассейны – характерный морфоструктурный элемент земной коры различных геоструктур. Проанализированы бассейны различной формы, возраста и геодинамической природы: протерозойские Онежская и Оршанская впадины (Восточно-Европейская платформа), палеозойский Мичиганский бассейн (Северо-Американская платформа), мезозойские и кайнозойские впадины Тяньшаньского орогена, Зондский шельф Южно-Китайского моря, передовые прогибы Кавказа и Эль-Рифа (Северная Африка) и пр. Ниже дана краткая характеристика некоторых из них с акцентом на особенности их инфрасруктуры.

Гиссаро-Алайский сегмент Южного Тянь-Шаня. Гиссаро-Алай – это внутриконтинентальный ороген, возникший в процессе герцинского и альпийского тектонических этапов на месте Палеоазиатского океана. Не рассматривая все аспекты строения и эволюции региона (библ. см. в [Леонов, 2008]), подчеркнем одну особенность, важную в контексте статьи, а именно – морфоструктурную дифференциацию океанического (палеозой) и плитно-орогенного (мезозой–кайнозой) пространства.

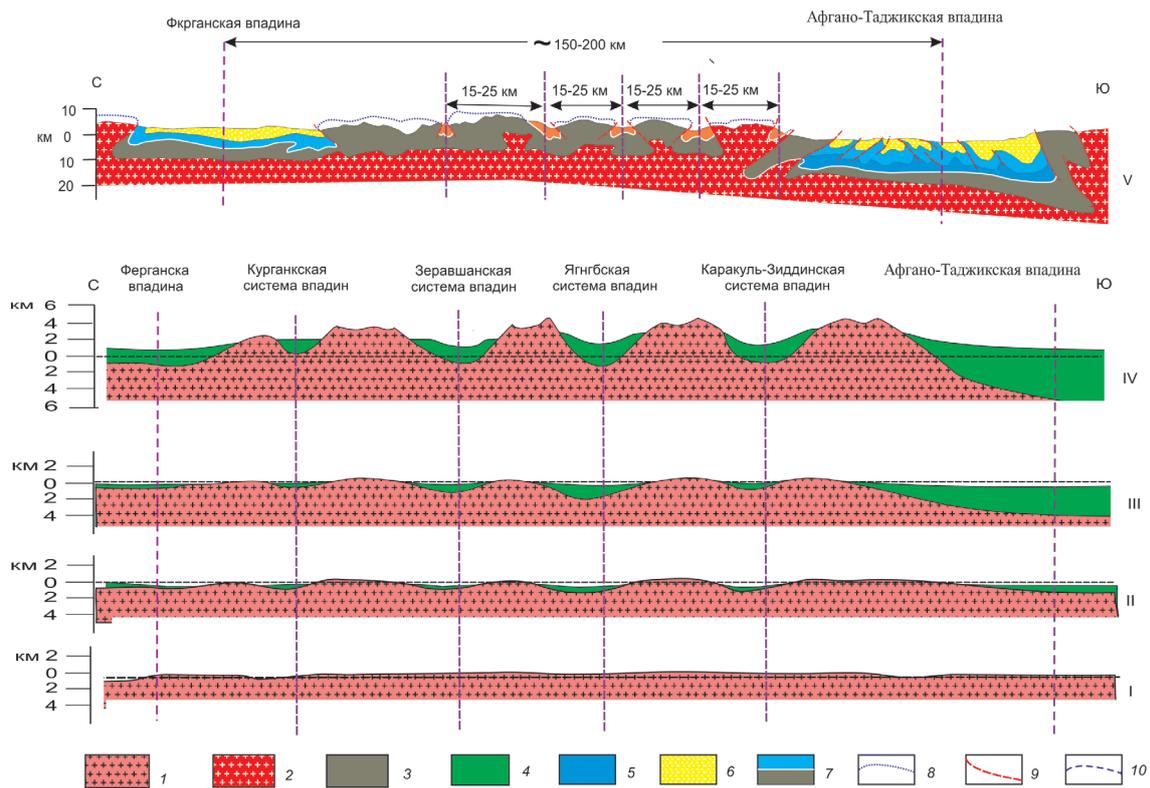


Рис. 2. Последовательность становления и перемежаемость положительных (поднятия) и отрицательных (впадины) морфоструктур Гиссаро-Алая.

1–3 – фундамент: 1 – кристаллический и складчато-метаморфический нерасчлененные (профили I–IV), 2 – кристаллический (профиль V), 3 – складчато-метаморфический (профиль V); 4 – мезозойско-кайнозойские отложения нерасчлененные; 5 – юрско-меловые отложения, нерасчлененные; 6 – кайнозойские отложения, нерасчлененные; 7 – домезозойская поверхность выравнивания, наблюдаемая и реконструированная по геофизическим данным; 8 – поверхность фундамента, реконструированная по вершинным поверхностям и останцам поверхности выравнивания; 9 – разломы; 10 – внутри формационные разделы. I–IV – палеоструктурные профили: I – к концу триаса, II – к началу раннего мела, III – к началу олигоцена, IV – для неоген-квартера, V – современная морфоструктура

Прослеживаются два этапа дифференциации: на первом (поздний силур – начало девона) происходит расчленение палеозойского океанического бассейна на систему поднятий и прогибов; на втором (ранняя юра – квартал) имеет место расчленение поверхности докембрийского фундамента на систему положительных и отрицательных морфоструктур и образование дискретных бассейнов первого (межгорные впадины) и второго (внутригорные впадины) порядков (рис. 2).

В современной структуре мезозойско-кайнозойские впадины образуют кулисно эшелонированные системы, пространственно приуроченные к зонам концентрированной деформации и продольного сдвигового течения [Морозов и др., 2014]. Расстояние между осевыми плоскостями составляет 15–25 км [Леонов и др., 2020в].

Оршанская впадина. Оршанская впадина (юго-запад Восточно-Европейской платформы) представляет собой неопротерозойскую отрицательную морфоструктуру фундамента размером ~150×250 км, вытянутую в меридиональном направлении (рис. 2) [Айзберг и др., 2004; Аксаментова, 2004; Гарецкий, Каратаев, 2014; Кудрявец и др., 2003; Леонов и др., 2020в; Разломы..., 2007; Чамов, 2016] (рис. 3).

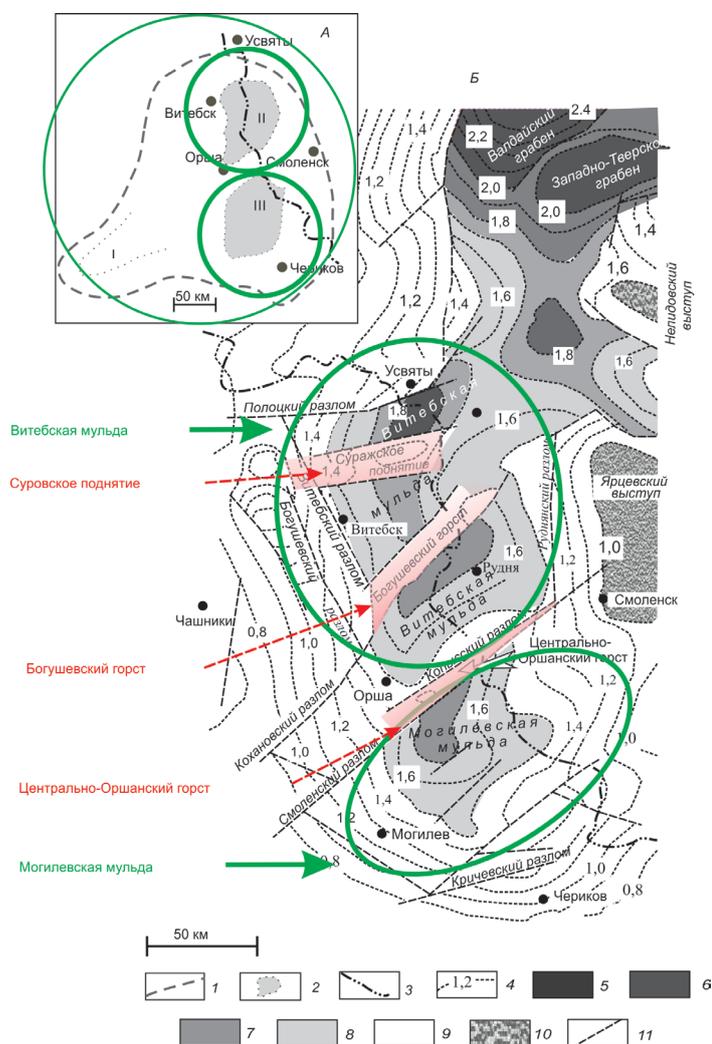


Рис. 3. Структурная схема Оршанской впадины (по данным [Айзберг и др., 2004; Кудрявец и др., 2003; Разломы..., 2007; Чамов, 2016]). А – общая схема, Б – структурная схема. Рисунок с изменениями и добавлениями заимствован из [Леонов и др., 2020].

1 – граница Оршанской впадины; 2 – главные отрицательные структуры поверхности фундамента: Червенский структурный залив (I), Витебская (II) и Могилевская (III) мульды; 3 – государственная граница; 4 – изогипсы поверхности фундамента (в км); 5–9 – отрицательные структуры с глубиной залегания фундамента: 5 – >2.0 км, 6 – 2.0–1.8 км, 7 – 1.8–1.7 км; 8 – 1.7–1.5 км, 9 – <1.5 км; 10 – погребенные выступы и горсты; 11 – разломы

Данные по геологии Оршанской впадины суммированы в [Леонов, 2020в; Чамов, 2016]. Оршанская впадина выражена в рельефе поверхности архейско-раннепротерозойского фундамента и выполнена отложениями рифея и нижнего венда общей мощностью до 1500 м, которая фиксирует амплитуду прогибания дна бассейна. Впадина рассечена крутыми (70° – 80°) разломами ЗЮЗ-ВСВ простирания с вертикальной амплитудой смещения 40–150 м, которые делят ее на поднятия и мульды второго порядка: Могилевскую и Витебскую мульды, разделенные Центрально-Оршанским горстом – резко приподнятым блоком древнего фундамента. Глубина залегания поверхности фундамента в мульдах второго порядка достигает 1300–1800 м. Витебская мульда, в свою очередь, расчленена Сурожским поднятием и Богушевским горстом на три отрицательных сегмента. Смещение поверхности фундамента в Сурожском поднятии составляет 560 м. Таким образом, впадина испытала морфоструктурную дифференциацию на систему частных мульд и разделяющих мульды горстообразных поднятий, расстояние между осевыми плоскостями которых составляет 25–50 км.

Онежская структура – сложно построенный бассейн, возникший в палеопротерозое на архейском гранитно-метаморфическом фундаменте и испытавший тектоническую активизацию в мезозое и кайнозое. Разрез бассейна представлен вулканогенными и осадочными отложениями ятулия–людиковия (Северо-Онежская мульда), надстраиваемые терригенными толщами вепсия (Южно-Онежская мульда). Мощности и фациальный состав пород отражают относительно медленное прогибание дна бассейна: за ~600 млн. лет накопилось около 5000 м отложений.

Северо-Онежская мульда. Тектоническая структура Северо-Онежской мульды [Леонов и др., 2000в; Леонов и др., 2003а, б; Онежская..., 2011] (рис. 4) – это пологая блюдцеобразная синклираль, разделенная на серию широких корытообразных синклиналей второго порядка (ширина 6–15 км) и узких линейно вытянутых диапироподобных псевдоантиклиналей (ширина 200 м–2 км), к которым приурочены зоны сдвиговых деформаций [Леонов, 2012]. В ядрах антиклинальных структур расположены интенсивно раздробленные и катаклазированные граниты архейского фундамента.

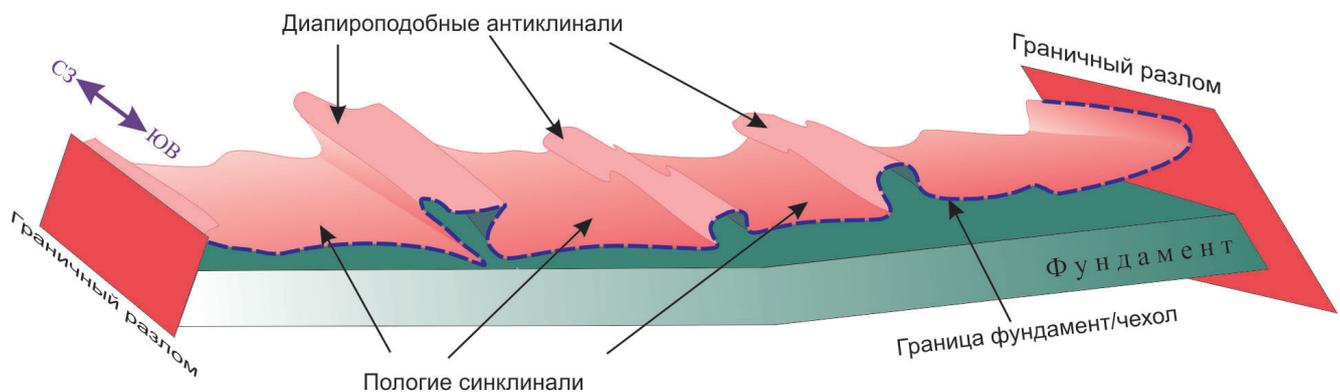


Рис. 4. Схема строения Северо-Онежской мульды. Характерно чередование широких (6–15 км) синклинальных и узких (100 м–2–3 км) псевдоантиклинальных структур

Мичиганский бассейн. В пределах плитной части Северо-Американской платформы расположены структуры округлой или овальной форм, выполненные отложениями палеозоя (рис. 5, 6). Современная структура Мичиганского бассейна – это почти круглая синклираль с пологими углами падения на крыльях. Такая форма сохранялась все время ее существования, что зафиксировано в кольцевом расположении фаций. Чашеобразная структура осложнена системой конседиментационных линейных антиклинальных складок высотой до 100 м. Расстояние между осями складок 25–55 км.

Морфоструктурная дифференциация, подобная описанной выше, свойственна и другим осадочным бассейнам, среди которых Предкавказский передовой прогиб (расстояние между грядами куполов-



Рис. 5. Центральносимметричные осадочные бассейны в теле Северо-Американской древней платформы.

1 – докембрийский фундамент Канадского щита; 2 – плитная часть платформы, мезозойды и области мезозойской активизации; 4 – Аппалачская складчатая система; 5 – фанерозойские осадочные бассейны в теле платформы.

Римские цифры: бассейны: I – Альберта, II – Виллистон; III – Паудер-Ривер, IV – Гудзонова залива; V – Денвер, VI – Мичиганский, VII – Иллинойс, VIII – Предаппалачский, IX – Салина-Форест-Сити; X – Додж-Сити; XI – Сан-Хуан; XII – Пермский; XIII – Мексиканского залива

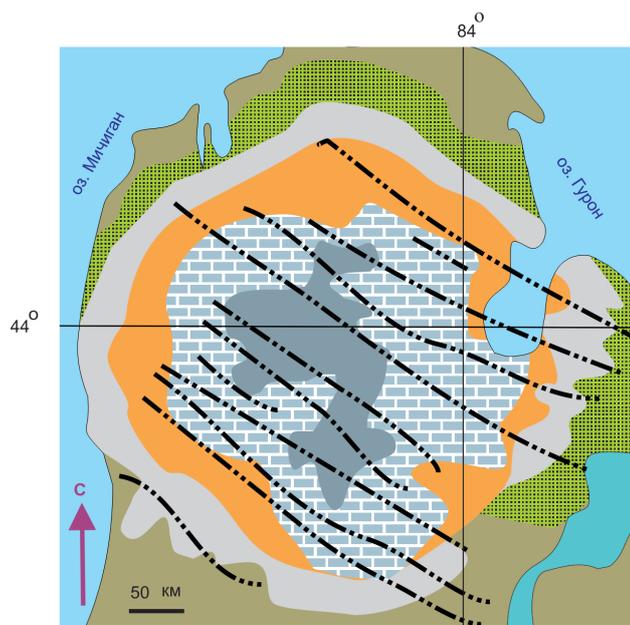


Рис. 6. Мичиганский бассейн. Центральносимметричная синклиальная морфоструктура бассейна осложнена серией антиклинальных поднятий

антиклиналей ~15–20 км), передовой прогиб Предрифа в Северной Африке (расстояние между антиклинальными морфоструктурами ~15–17 км), мезозойские впадины Забайкалья, которые отстоят одна от другой на расстоянии 20–50 км.

Бассейны Зондского шельфа. Подробное описание объекта содержится во многих публикациях, например [Арешев и др., 1990; Богоявленский и др., 2016; Керимов и др., 2019; Леонов и др., 2020б; Шустер и др., 2003] (рис. 7). Фундамент Зондского шельфа сложен гранитами юрско-мелового возраста. К концу мела – началу палеоцена была сформирована молодая плита, и в позднем палеоцене – начале эоцена произошла нивелировка поверхности фундамента и образование коры выветривания. С эоцена начинается расчленение плиты на серию осадочных бассейнов, которые заполнялись континентальными, прибрежно-морскими, авандельтовыми и лагунными отложениями общей мощностью до 9 тыс. м. Области интенсивного прогибания разделены зонами относительных поднятий. Морфоструктура морского дна Зондского шельфа достаточно проста и несет в себе черты субаквального рельефа.

Однако морфоструктура фундамента современной осадочной ванны весьма сложная, представляя собой закономерно построенную систему тектонических прогибов и поднятий, которым соответствуют антиклинальные перегибы в отложениях чехла. Поднятия имеют овальную форму, длину до 20–30 км и ширину 5–10 км. Амплитуда смещения по поверхности фундамента составляет 500–1000 м. Изогипсы кровли фундамента в апикальной части и на периклинальных замыканиях массива обрисовывает плавные сглаженные изгибы поверхности, которые на бортах осложнены надвигами и сбросами. Прогибы и поднятия чередуются в пространстве и образуют регулярную морфоструктурную архитектуру шельфа.

Граниты фундамента интенсивно раздроблены, пронизаны множеством разломов и зон повышенной трещиноватости, где породы превращены в щебнистую брекчию, катаклазированы и милонитизированы.

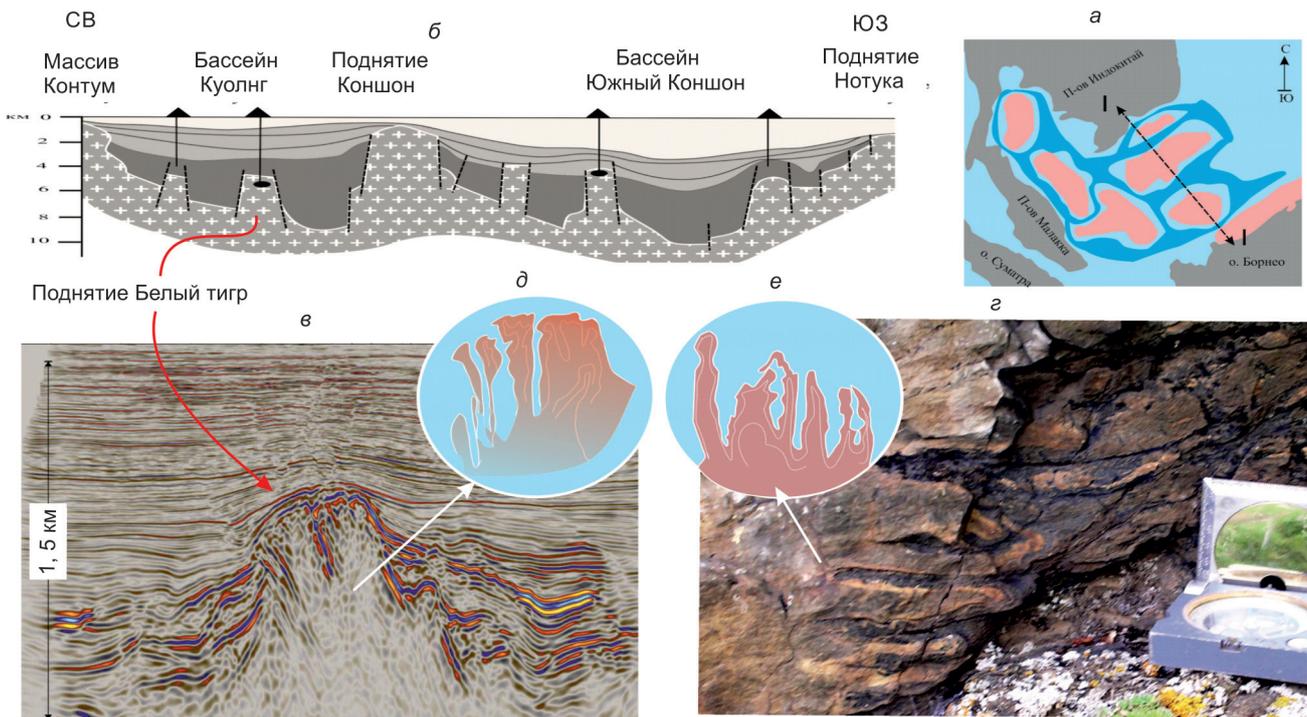


Рис. 7. Морфоструктура Зондского шельфа и структуры типа вязких пальцев: а – расположение поднятий (розовый цвет) и прогибов (голубой цвет) в пределах Зондского шельфа (по [Керимов и др., 2009 ; Леонов и др., 2020]); б – поперечный профиль I-I через Зондский шельф (по [Арешев и др., 1997] с изменениями), на профиле отражено расположение поднятий и прогибов фундамента; в – сейсмотомографический профиль гранитного купола Белый Тигр (рисунок предоставлен В.А. Быкадоровым); г – структура типа вязких пальцев на контакте гранитов и складчато-метаморфических пород палеозоя (Западное Забайкалье); д, е – морфоструктуры типа вязких пальцев в гранитах поднятия Белый тигр и в гранитах периферической части Заганского хребта (Западное Забайкалье)

Зияющие трещины заполнены гидротермальными минералами и нефтью. Инфраструктура гранитов и взаимоотношение с отложениями чехла свидетельствуют о конседиментационном тектоническом внедрении холодных гранитов фундамента в осадочный чехол в виде протрузивных тел (куполов), которые прорывают осадочный чехол вплоть до горизонтов среднего миоцена.

Как можно видеть из приведенного выше обзора, разнопорядковые бассейновые структуры, имея сходное строение и инфраструктуру, в известном смысле, обладают самоподобием, иерархичностью и сходной размерностью морфоструктурной дифференциации. Эти свойства делают правомерным предположение о фрактальном характере [Федер, 2014; Mandelbrot, 1982] геометрии осадочных бассейнов.

Морфоструктура пород фундамента

Допустив фрактальный характер инфраструктуры осадочных бассейнов, нужно предположить, что признаки фрактальности должны присутствовать и в морфоструктурах фундамента, поскольку конфигурация осадочных линз соответствует геометрии поверхности фундамента, которая варьирует от простых синклиналей до сложных складчатых и разрывно-блоковых форм. Изгибная деформация поверхности фундамента обеспечивается различными механизмами 3D структурно-вещественной переработки пород [Леонов, 2008; Леонов и др., 2018; Лукьянов, 1991]. Основными механизмами являются хрупко-пластическое и катакластическое течение. Значительную часть объема фундамента (в некоторых регионах до 50%–80%) слагают породы гранитного ряда, и можно полагать, что именно граниты во многом определяют как реологию и структуру фундамента, так морфологию осадочных бассейнов.

Граниты фундамента как правило подвержены интенсивной хрупкой и пластической деформации: разлинзованы, брекчированы, катаклазированы (рис. 8, 9).

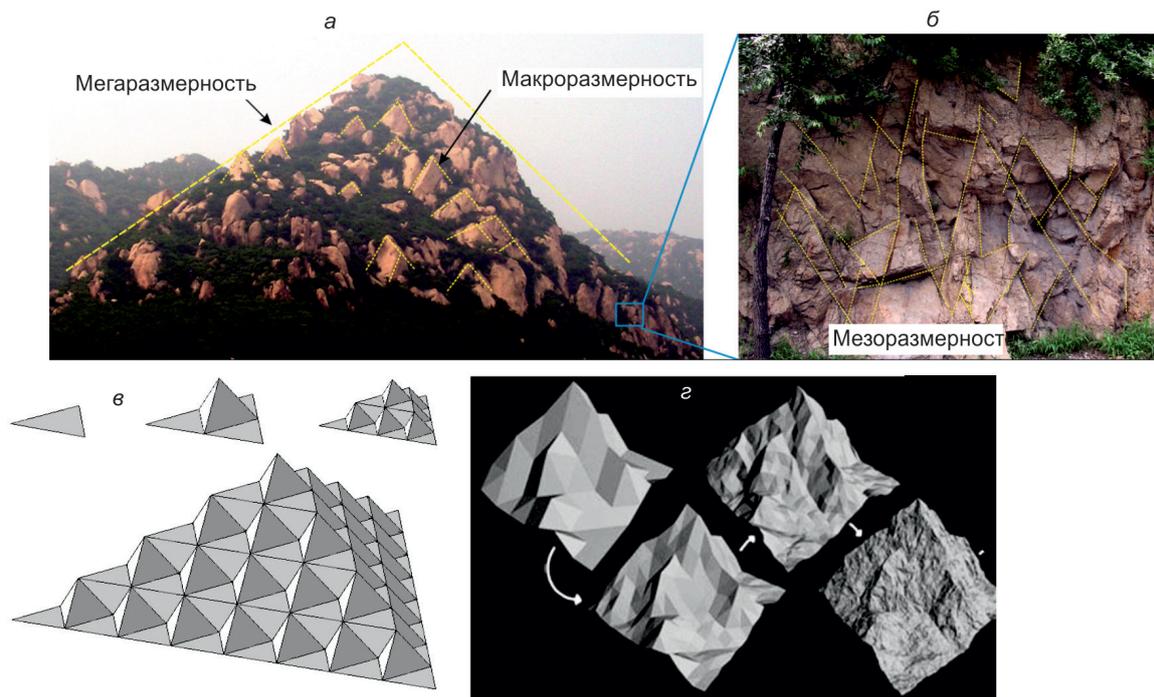


Рис. 8. Фрактальная блоковая структура гранитов: а, б – граниты (О–S) Яньшанских гор (Китай) (фотографии автора); в – фрактальная пирамида Коха*; г – компьютерная модель горного массива**. Интернет-ресурсы: •[<https://shareslide.ru/img/thumbs/ab8bb0cef8699dd1631d88bb62ce3911-800x.jpg>]; **<https://fractalmovie.ru/fractalmovie/images/articles/1/10fr.jpg>

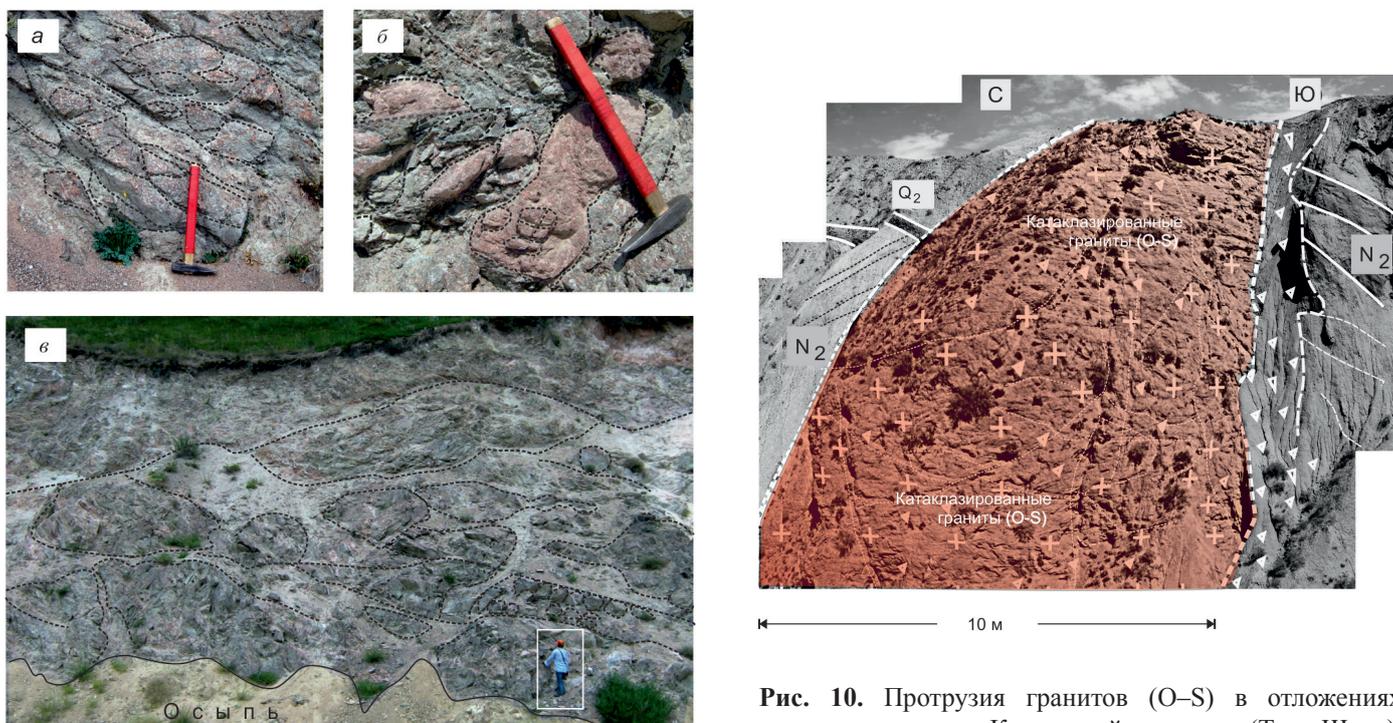


Рис. 9. Фрактальная линзовидно-блоковая структура гранитов (О–S) фундамента в южном борту Чу-Илийской впадины. А–Б – мезоразмерность, В – макроразмерность

Рис. 10. Протрузия гранитов (О–S) в отложениях неогенового чехла Кочкорской впадины (Тянь-Шань). Фото Е.С. Пржиялговского

Деформация проявляется на всех масштабных уровнях от мега- до микромасштаба и имеет фрактальную природу, обладая, как видно из рисунков, самоподобием и иерархичностью. В ряде регионов граниты фундамента образуют своеобразные структуры протыкания (рис. 10), форма и расположение которых обнаруживают признаки самоподобия и иерархичности. На мега- и макроуровнях эти структуры описаны как кристаллические протрузии, и их возникновение связывается с вязкостной инверсией (обзор проблемы и фактический материал см. [Керимов и др., 2009; Леонов и др., 2018]).

Одним из признаков фрактальности структур являются так называемые вязкие пальцы (*viscous fingers*) – структуры, образование которых связано с морфологической неустойчивостью раздела между субстанциями с различной вязкостью [Engelberts, Klinkenberg, 1951; Homsy, 1987]. Вязкие пальцы возникают при вытеснении более вязких жидкостей менее вязкими. Это явление проявляется, в частности, при закачивании в нефтесодержащие пласты растворов меньшей, чем нефть, вязкости, что создает так называемый фронт вытеснения и повышает нефтеотдачу пластов, а также вызывает образование вязких пальцев.

Экспериментально доказано, что вязкие пальцы в пористой среде имеют фрактальную природу. Существуют доступные публикации и интернет-ресурсы с описанием вязких пальцев. Одна из компьютерных моделей приведена на рисунке 11.

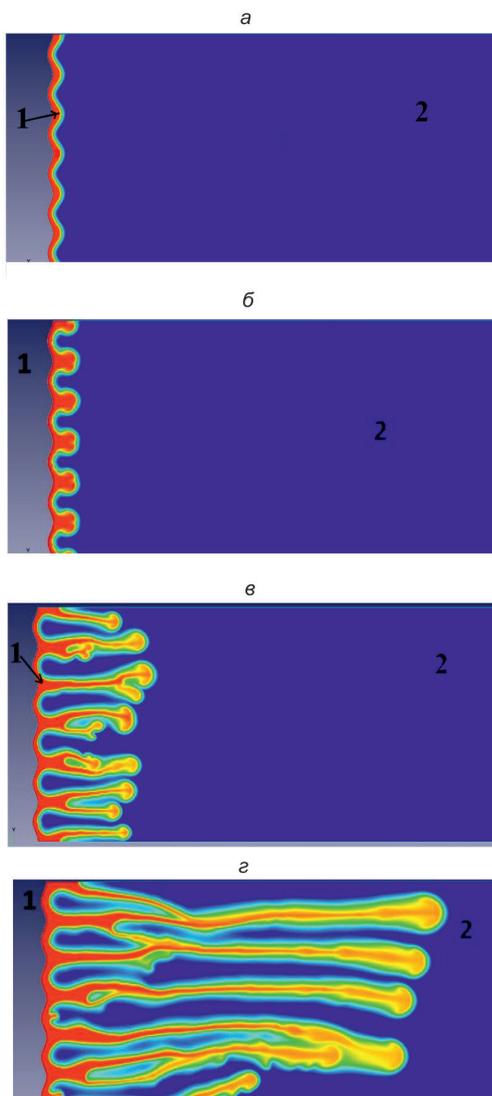


Рис. 11. Компьютерная модель образования вязких пальцев при вытеснении масла водой. Описание модели и хода процесса см. в [Гараева, 2018]: а–г – стадии процесса. 1 – вода; 2 – масло.

На рисунке 12 отображен природный эксперимент. Образование структуры типа вязких пальцев происходит в потоке, который представляет собой трехкомпонентную систему из воды, воздуха и пены (водно-воздушной механической суспензии) с заведомо различными параметрами плотности, вязкости, поверхностного натяжения и пр. Пена образует пограничный слой между водным и воздушным слоями. Движение пены в тылу потока турбулентное, по направлению течения оно становится более упорядоченным (ламинарно-турбулентным), и возникают потоки второго и третьего порядков, которые опережают основной поток и формируют пальцеобразные структуры. К сожалению, описать природный процесс с помощью математического аппарата невозможно, так как в уравнениях состояния будет слишком много неизвестных. Но виден ход процесса и его результат, из чего следует, что физические условия, необходимые для его достижения, в целом соблюдены, что и отражено в наблюдаемом образе.

Примером вязких пальцев в породах фундамента, вероятно, может служить структура контакта гранитов и складчато-метаморфических пород палеозоя на периферии Заганского хребта в Западном Забайкалье (см. рис. 7 г). Трактовка этой структуры как вязких пальцев, конечно, вероятностная, но она не лишена оснований, каковыми являются: (а) сходство природной морфоструктуры и вязких пальцев, получаемых в эксперименте, а также при закачивании жидкостей в скопления нефти

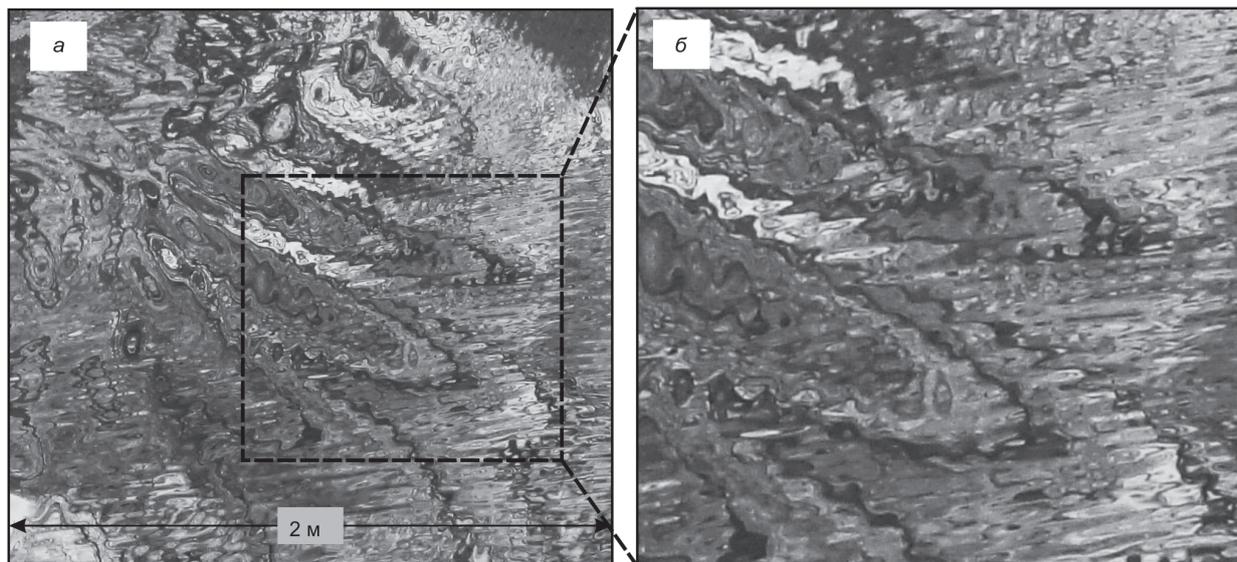


Рис. 12. Образование «вязких» пальцев в системе вода/пена/воздух (природный эксперимент). Описание в тексте

для повышения нефтеотдачи; (б) сочетание внешней формы и инфраструктуры «природных пальцев», свидетельствующих о реидном поведении горной породы; (в) закономерный геометрический рисунок расположения «пальцев»; (г) наличие «фронта вытеснения», фиксируемого границей «гранит – вмещающие сланцы». Также обращает на себя внимание идентичная форма гранитных тел (см. рис. 7) и вязких пальцев в компьютерной и природной моделях, что может служить дополнительным свидетельством фрактальности природных объектов.

Обсуждение материала и выводы

Как уже упоминалось, описание фракталов требует сложного математического аппарата. Однако математический анализ явления, рассматриваемого в этой работе, затруднен в силу ряда обстоятельств. Во-первых, при восстановлении условий формирования геологических объектов, решается «обратная» задача, и мы имеем дело с конечным результатом природного процесса, но исходные физические и геометрические параметры объектов и геологических сред, а также граничные условия природного эксперимента либо неизвестны либо весьма расплывчаты. Во-вторых, отсутствует набор корректных данных, необходимых для проведения численных расчетов, и в уравнениях состояния будет слишком много неопределенностей. И наконец, согласно мнению [Федер, 2014, с. 67], количественный анализ трехмерных объектов (а бассейны трехмерны – вставка М.Л.) весьма затруднен. В этой статье, базируясь на мнении основателя учения о фракталах математика Б. Мандельброта, который считал, что интуитивно-образное восприятие отражает суть явления не менее точно, чем формула и цифра, проблема фракталов рассмотрена в ее описательном аспекте.

Всем изученным бассейнам, независимо от их формы и тектонической природы, присуща пространственная упорядоченность в расположении отрицательных (впадины) и разделяющих впадины положительных (поднятия) морфоструктур. В одних случаях, в теле платформ или орогенов изначально возникает система закономерно расположенных изолированных бассейнов, в других – вначале возникает единый обширный бассейн, который в дальнейшем испытывает морфоструктурную дифференциацию. В пределах первичного бассейна возникает серия структур более высокого порядка, по форме и типу развития сходных с исходным бассейном. Возникшая делимость в разных бассейнах имеет сходную размерность: осевые плоскости морфоструктур расположены на расстоянии от 15–25 до 30–50 км друг от друга. Явление морфоструктурной дифференциации привлекало внимание исследователей, и было предложено несколько моделей этого процесса [Дэлмесс, 1961; Косыгин, Магницкий, 1948; Леонов и

др., 2020в; Леонов и др., 2003а, б], однако ни один из предложенных механизмов не объяснял природы регулярности морфоструктурного расчленения отрицательных структур (бассейнов) и повторяемости этого явления от бассейна к бассейну.

Приведенные в статье данные по осадочным бассейнам свидетельствуют, что морфоструктурная дифференциация с регулярным расположением положительных и отрицательных морфоструктур проявляется независимо от времени заложения и длительности существования осадочных ванн, от их первичной формы, от геодинамических условий и общей структурной обстановки, характерных для той или иной территории. При этом, как было показано, внешняя геометрия внутриконтинентальных осадочных бассейнов обладает признаками самоподобия и иерархичности. Равным образом, самоподобна и иерархична мофо- и инфраструктура фундамента осадочных ванн. Более того, граниты, слагающие фундамент осадочных бассейнов, образуют структуры типа вязких пальцев, имеющих фрактальную природу. В рамках современных представлений, совокупность всех этих данных, допускает рассмотрение осадочных бассейнов с позиции фрактальной геометрии и объясняет их закономерную (фрактальную) морфоструктурную дифференциацию.

Фрактальный анализ применим также и к другим геологическим объектам, позволяя характеризовать их не только качественно, но количественно, определяя их фрактальную размерность. Такие исследования проведены, в частности, для террейнов Северо-востока России [Вадковский и др., 2003], железорудных месторождений балтийского щита [Горяинов, Иванюк, 2001; Иванюк, 1997] и некоторых других объектов [Мельник, 2007].

Ко всему сказанному следует добавить, что возникновение структур типа вязких пальцев в кристаллических породах фундамента, позволяет рассматривать этот процесс с позиций гидродинамики. Это, конечно, только предположение, но оно имеет достаточно серьезные основания. Земля (эллипсоид или геоид вращения) ведет себя как жидкое тело – тезис, который не оспаривается никем, а граниты – существенная часть корового слоя Земли. Изучены многочисленные гранитные и иные кристаллические тела, которые в холодном кристаллическом состоянии испытывают деформацию течения (катакластического и вязкопластического), так как являются гранулированными средами, обладающими свойством сверхтекучести [Леонов и др., 2018; Леонов и др., 2020а]. Твердые субстанции в определенных условиях и состояниях ведут себя как жидкие тела (например, [Блехман, 1994; Строганов и др., 2002]). Динамика фронта вязких пальцев и их рост в пористых средах (которыми в той или иной степени являются горные породы) определяется соблюдением условий в соответствии с уравнениями гидродинамики Дарси и Лапласа [Федер, 2014].

Таким образом, исходя из анализа рассмотренного в статье материала, разумно предположить, что геометрия внутриконтинентальных осадочных бассейнов и геометрия морфо- и инфраструктуры их фундамента на любом масштабном уровне может быть описана в рамках законов фрактальной геометрии. Этот вывод, кроме определенной самоценности, имеет и более фундаментальное значение в контексте изучения динамики геологических процессов. Допуская фрактальную природу морфоструктурной делимости осадочных бассейнов и их инфраструктуры на различных масштабных уровнях, мы избегаем необходимости искать причину процесса интрабассейновой дифференциации во внешнем по отношению к бассейну силовом воздействии, что в корне может менять многие тектонические и геодинамические построения.

Список литературы

- Айзберг Р.Е., Гарецкий Р.Г., Кудрявец И.Д., Старчик Т.А.* О тектонике Оршанской впадины и ее соотношении со структурами фундамента // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48. № 1. С. 88–92.
- Аксаментова Н.В.* Разрывные нарушения фундамента // Геология Беларуси / Ред. Гарецкий Р.Г., Матвеев А.В. Мохнач А.С.. Минск: Институт геол. наук, 2001. С. 493–497.
- Арешев Е.Г., Гаврилов В.П., Донг Ч.Л. и др.* Геология и нефтегазоносность фундамента Зондского шельфа. М.: Нефть и газ, 1997. 288 с.

Бекман И.Н. Геометрия фракталов, Курс лекций. 2010 // Интернет-ресурс: Profbeckman.narod.ru > NRT/BUM_fractal.pdf.

Блехман И.И. Вибрационная механика. М. : Физматлит, 1994. 400 с.

Богоявленский В.И., Дзюбло А.Д., Иванов А.Н., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Нефтегазоносность кристаллического фундамента шельфа Вьетнама: Белый тигр и Дракон // Геология нефти и газа. 2016. № 5. С. 102–115.

Вадковский В.Н., Соколов С.Д., Захаров В.С., Лубнина Н.В. Аккреционная тектоника и фрактальная размерность // Геофизика XXI столетия: 2002 год: Сборник трудов Четвертых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М. : Научный мир, 2003. С. 278–285.

Гараева С.В. Численное моделирование процесса вытеснения масла водой в ячейке Хеле-Шоу. Казань: КФУ, 2018. Интернет ресурс: https://kpfu.ru/portal/docs/F435940605/VKR_Garaeva.pdf.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Беларуская навука, 2014. 120 с.

Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. М.: ГЕОС, 2001. 312 с.

Дэллмес К.Ф. Основные черты развития бассейна в связи с распространением нефти // Распространение нефти / А.А. Ред. Бакиров. М. : Гостоптехиздат, 1961. С. 634–671.

Жуков Д.С., Лямин С.К. Живые модели ушедшего мира: фрактальная геометрия истории. Тамбов: Изд-во ТГУ, 2007. 176 с.

Иванюк Г. Ю. Фрактальные геологические среды: размерность, основные типы, генетические следствия // Физика Земли. 1997. № 3. С. 21–31.

Иудин Д.И., Копосов Е.В. Фракталы: от простого к сложному. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2012. 200 с.

Керимов В.Ю., Леонов М.Г., Осипов А.В., Мустаев Р.Н., Ву Нам Хай. Залежи углеводородов в фундаменте шельфа Вьетнама и структурно-тектоническая модель их формирования // Геотектоника. 2009. № 1. С. 44–61.

Косыгин Ю.А., Магницкий В.А. О возможных формах геометрической и механической связи первичных вертикальных движений, магматизма и складкообразования // Бюлл. МОИП. 1948. Т. XXIII. № 3. С. 3–15.

Кудрявец И.Д., Айзберг Р.Е., Гарецкий Р.Г., Грибик Я.Г., Старчик Т.А., Шкуратов В.И. Региональное сейсмопрофилирование методом общей глубинной точки в Оршанской впадине // Докл. НАН Беларуси. 2003. Т. 47. № 6. С. 108–112.

Латынова Н.В. Фрактальный анализ: учебное пособие. Ижевск: Издательский центр « Удмуртский университет», 2020. 120 с.

Леонов М.Г. Онежская мульда и Мичиганский бассейн: сравнительная геодинамика и образование внутриплитных отрицательных морфоструктур // Геотектоника, № 3. 2004. С. 31–54.

Леонов М.Г. Тектоника консолидированной коры / Ред. Ю.О. Гаврилов. М. : Наука, 2008. С. 454 с.

Леонов М.Г. Внутриплитные зоны концентрированной деформации: тектоническая структура и особенности эволюции // Геотектоника. 2012. № 3. С. 3–26.

Леонов М.Г., Колодяжный С.Ю., Зыков Д.С., Полещук А.В. Тектоника Онежской мульды. Статья 1. // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 2003а. № 1. С. 3–11.

Леонов М.Г., Колодяжный С.Ю., Зыков Д.С., Полещук А.В. Тектоника Онежской мульды. Статья 2. // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 2003б. № 2. С. 12–18.

Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В. Граниты. Постмагматическая тектоника и углеводородный потенциал / Ред. К.Е. Дегтярев: Тр. ГИН. Вып. 619. М. : ГЕОС, 2018. 332 с. 458 с.

Леонов М.Г., Кочарян Г.Г., Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В. Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // Geodynamics & tectonophysics. 2020а. V. 11. Issue 3. С. 491–521.

Леонов М.Г., Керимов В.Ю., Мустаев Р.Н., Ву Нам Хай. К вопросу о природе и механизме формирования залежей углеводородов на шельфе Вьетнама // Тихоокеанская геология. 2020б. Т. 39. № 5. С. 3–16.

Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Пржиялговский Е.С., Рыбин А.К., Бакеев Р.А., Лаврушина Е.В., Стефанов Ю.П. Тектоническая эволюция системы «фундамент–чехол» и морфоструктурная дифференциация осадочных бассейнов // Геотектоника. 2020в. № 2. С. 1–29.

Лукиянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М. : Наука, 1991. 144 с.

Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. М. : Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

Мельник М.А. Фрактальные закономерности форм рельефа // Автореф. Канд. диссерт. Томск: Изд-во «В-Спектр», 2007. 19 с.

Морозов Ю.А., Леонов М.Г., Алексеев Д.В. Пулл-апартовый механизм формирования кайнозойских впадин Тянь-Шаня: структурные и экспериментальные свидетельства // Геотектоника. 2014. № 1. С. 29–61.

Насонов А.Н., Цветков И.В., Жогин И.М., Кульнев В.В., Ретина Е.М., Киринос С.Л., Звягинцева А.В., Базарский О.В. Фракталы в науках о Земле. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2018. 82 с.

Неведимова О.Г., Мельник М.А., Роздьяков А.В. Фрактальные соотношения и динамические режимы в процессе рельефообразования // Самоорганизация и динамика геоморфосистем: Мат. XXVII Пленума геоморфологической комиссии РАН. Томск: Изд-во ИОЛ СО РАН, 2003. С. 122–126.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов (ред.). Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2011. 432 с.

Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / Ред. Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож. М. : Научный мир, 2004. 526 с.

Разломы земной коры Беларуси / Р.Е. Айзберг (ред.). Минск: Красико-Принт, 2007. 372 с.

Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–830.

Строганов Г.Б., Кайбышев О.А., Фаткуллин О.Х., Мартынов В.Н. Сверхпластичность и износостойкость в машиностроении. М.: «Альтекс», 2002. 322 с.

Терехов С.В. Фракталы и физика подобия. Донецк: «Цифровая типография», 2011. 255 с.

Федер Е. Фракталы. Перевод с англ. М. : УРСС ЛЕНАНД, 2014. 264 с.

Чамов Н.П. Строение и этапы развития катаплатформенного чехла Среднерусско-беломорской провинции // Литология и ползн. ископаемые. 2016. № 6. С. 547–563.

Шустер, В.Л., Левянт В.Б., Элланский М.М. Нефтегазоносность фундамента (проблемы поиска и разведки месторождений углеводородов). М. : Изд-во «Техника», ТУМА ГРУПП, 2003. 176 с.

Allen P., Allen J. Basin analysis: principles and application // Blackwell Sci. Publ. Oxford. 1990. 462 p.

Bunde, A. Fractals and Disordered Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 408 p.

Engelberts W.F., Klinkenberg L.J. Laboratory experiments on the displacement of oil by water from packs of granular material // Petr. Congr. Proc. Third World. 1951. P. 544–554.

Homsy G.M. Viscous fingering in porous media // Ann. Rev. Fluid Mech. 1987. T. 19. P. 271–311.

Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature / W.H. Freeman. New York, 1982. 468 p.

Måløy K.J., Feder J., Jøssang T. Viscous fingering fractals in porous media // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55.

Sergeev S. GIS-Practical Experience in the Boundaries Definition of the Platform Deep Crustal Blocks on the Studying of the Earth's Surface Fractal Divisibility: Example of the White Sea-Kuloi Plateau // Journal of Geodesy and Geomatics Engineering. 2016. Vol. 3. P. 19–24.

Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge: University Press, 1997. 398 p.

Voss R.F., Random fractals: Characterization and measurement // Scaling Phenomena in Disordered Systems / Eds. R. Pynn & A. Skjeltorp). New York: Plenum Press. 1985. P. 1–11.

MORPHOSTRUCTURE OF INTRACONTINENTAL SEDIMENTARY BASINS AND FRACTAL GEOMETRY

M. G. Leonov

Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: mgleonov@yandex.ru

Introduction: Since the 90s of the XX century, the principles of fractal geometry began to penetrate into geology, and this aspect of research is attracting more and more attention. At the same time, basin analysis was developed, but ideas about fractal geometry were not used to describe the structure of sedimentary basins. This article is an attempt to link the observed patterns of the structure of sedimentary basins with the principles of fractal geometry. Objects of research: A number of negative structures of the earth's crust have been studied: Proterozoic Onega and Orsha mulds, Paleozoic Michigan basin, Mesozoic and Cenozoic Tien Shan depressions, Pre-Caucasian trough, the Sunda shelf, the El Rif. Research methods: The paper uses a comparative structural and tectonic analysis of geological objects. To explain the revealed regularities of the structure of sedimentary basins the concepts of fractal geometry in its descriptive aspect are involved. Results of the study. The fundamental property of sedimentary basins has been established - the differentiation of primary sedimentary basins into a system of secondary anticlinal (elevation) and synclinal (deflections) linear morphostructures. The spatial ordering of intra-basin uplifts and depressions, expressed in the arrangement of the axial planes of structures with a step from 15–25 to 30–50 km, as well as the hierarchical dimension (from mega- to micromasshtaba) of structures in the rocks of the foundation of the basins, have been established. Discussion of the material: Multi-order basin structures have a similar structure, orderliness of spatial arrangement and geometric pattern, and, therefore, are to a certain extent hierarchically constructed self-similar objects, which indicates their fractal nature. This position is confirmed by the emergence of structures such as viscous fingers (viscous fingers), which have a fractal nature. Conclusions: These data make it legitimate to apply the principles of fractal geometry to the description of sedimentary basins and allow the consideration of «solid» crystalline rocks of the foundation of sedimentary basins within the framework of the laws of hydrodynamics.

Keywords: sedimentary basin, viscous fingers, geometry, morphostructure, tectonics, fractals.