

УДК 550.3+551.24

АККРЕЦИОННАЯ ТЕКТОНИКА И ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРРЕЙНОВ

© 2013 В.С. Захаров, В.Н. Вадковский

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Геологический факультет, Москва, 119991; e-mail: vszakharov@yandex.ru*

По данным ГИС-проектов для активных континентальных окраин северной части обрамления Тихого океана определены статистические характеристики множества террейнов. Установлено самоподобие форм террейнов в широком диапазоне размеров. По соотношению периметр-площадь определена фрактальная размерность, которая составляет для северного обрамления Тихого океана $D = 1.33 \pm 0.01$, для Аляски $D = 1.30 \pm 0.01$, для северо-западной Канады $D = 1.24 \pm 0.01$. Вычислялась фрактальная размерность террейнов различного типа и возраста приращения. Установлено, что фрактальная размерность слабо варьируется в зависимости от времени приращения. Это отражает малую степень деформирования террейнов в процессе аккреции и свидетельствует об их жесткости во всех диапазонах размеров. Более крупные блоки земной коры (континенты и крупные острова) также подчиняются единому степенному закону и характеризуются близким значением фрактальной размерности $D = 1.25 \pm 0.03$. Это указывает на отсутствии каких-либо выделенных характерных размеров, которые можно было бы использовать для классификации террейнов, супертеррейнов, микроконтинентов, континентов, а, кроме того, свидетельствует о едином механизме объединения тектонических единиц различных размеров и происхождения.

Ключевые слова: террейны, активная окраина, аккреция, степенные распределения, фрактальная размерность.

ВВЕДЕНИЕ

На активных окраинах происходили и продолжают происходить два взаимосвязанных процесса — роста континентальной коры и уничтожения океанической. Изучение современных и палеоактивных окраин континентов приводит к более ясному пониманию этих процессов.

Нарастивание континентальной коры происходит на активных окраинах за счет приращения участков океанической коры и ее неоднородностей (офиолиты, океанические острова и подводные горы, поднятия, микроконтиненты, островные дуги). Прибавление массы континентальной коры обусловлено также вулканизмом субдукционных зон. В этом сложном процессе происходит и разрушение континентальной окраины за счет субдукционной эрозии и сноса осадков в желоб и затягивание их в зону субдукции. Вместе с тем происходит возврат эродированной части континентальной коры: аккреционные призмы надвигаются на активную окраину. Во всех случаях необходимо

относительное встречное смещение активной окраины континента и океанической литосферы и ее поглощение с дневной поверхности. Этот процесс сопровождается высокой сейсмической активностью, способствующей аккреционному смещению блоков, ускорению процессов эрозии и сноса осадков, уплотнению аккреционных призм и т.п. Закрывшиеся палеоокеаны оставили свои следы, нарастив континенты, например, в Алтае-Саянской складчатой области, Прибайкалье, на Урале и в Альпийском поясе.

В зависимости от соотношения скоростей перечисленных процессов активная континентальная окраина может как нарастиваться, так и сокращаться. Одновременное действие противоположенных процессов роста и уничтожения приводят к сложной структуре формирующихся объектов. Поэтому, по нашему мнению, представляет интерес количественные оценки столь сложного взаимодействия (Вадковский, Захаров, 2003а, 2003б, 2003в; Вадковский и др., 2003а, 2003б). Эта сложность будет проявляться, в том числе, и в прихотливости форм и изрезанности

границ, для анализа которых разработан аппарат фрактальной геометрии (Мандельброт, 2002; Turcotte, 1997).

Цель работы – оценка количественных параметров самоподобия террейнов на основании фрактального анализа и их сопоставление с тектоническими характеристиками.

ПОНЯТИЕ ТЕРРЕЙНА

Геологическими исследованиями установлено, что активные окраины представляют собой нагромождение (коллаж) блоков, надвинутых на континентальную окраину. Эти блоки называют «террейнами». Несмотря на широкое употребление термина «террейн», не существует его однозначного определения. Согласно работе (Зоненшайн, Кузьмин, 1992, с. 149) «террейном можно, по-видимому, назвать блок любых (но в разумных пределах) размеров, который включен в состав складчатого пояса, который отделен от окружающих одновозрастных или более древних пород тектоническими контактами и который по составу слагающих его горных пород, их структуре, происхождению, геохимической, палеобиогеографической, палеомагнитной характеристикам резко отличается от вмещающих отложений или смежных блоков». В этой же работе подчеркивается условность разграничения понятий «микроконтиненты» и «террейны».

Террейнами называют, в общем случае, геологические тела, отделенные четкой тектонической границей от соседних тел и имеющие отличное от них литолого-стратиграфическое строение (Moore, 1992; Nokleberg et al., 1994). Террейны имеют различный генезис и собственную историю. Некоторые из них представляют собой части океанической коры и ее неоднородности (офиолиты, вулканические острова, поднятия), другие представлены континентальной корой (микроконтиненты, осколки кратонов) или сформировались в процессе субдукции (аккреционные призмы, островные дуги) (Соколов, 1992, 2003; Соколов и др., 1997; Соколов и др., 2001).

Обстановки формирования активных окраин также различны (Хаин, Ломизе, 2005), зависят от направления и скорости субдукции, ее фазы, угла наклона, от геометрии желоба, наличия трансформных разломов, от неоднородностей на субдуцирующей океанической коре и т.п. Согласно многочисленным палеомагнитным данным, некоторые террейны совершили огромный путь в тысячи километров, прежде чем оказались на активной окраине (Храмов, 1982; Ben-Avraham et al., 1981; Pechersky et al., 1997), другие проделали совсем небольшой путь – десятки и сотни километров. Некоторые террейны испытали вращение относительно соседних

террейнов или кратонов. Некоторые террейны раскололись, став суб-террейнами, прежде чем оказались на активной окраине (Врангелия, Омолон), другие раскалывались в процессе аккреции. Значительные по размеру террейны иногда называются «супертеррейнами».

В известной мере, неопределенность термина «террейн» отражает сложность и разнообразие процесса формирования активных окраин. Во многих областях науки в подобных случаях оказываются плодотворным использование фрактальных оценок множества рассматриваемых объектов (Мандельброт, 2002; Turcotte, 1997).

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа нами использовались ГИС-проекты, объединяющие геологические, геофизические и тектонические данные для северо-востока России от Чукотки до Приморья и запада Северной Америки, от Аляски до Калифорнии, подготовленные большими коллективами авторов – геологами и геофизиками России, Японии, Канады, США (Geographic..., 1999). В базах данных, содержащихся в этих ГИС-проектах, для каждого объекта указаны его геологический возраст и тектонический тип, для большинства указаны возраст образования и время причленения, а также рассчитаны его площадь и периметр. В обобщающей базе для всего северного обрамления Тихого океана (рис. 1) содержится $N=2992$ объектов. Для Аляски и северо-западной Канады приводятся также более детальные базы данных, которые в нашей работе анализируются отдельно, количество объектов в них $N=1763$ и $N=12244$ соответственно. Такие объемы совокупностей данных позволяют проводить их статистический анализ достаточно достоверно. Использовались также цифровые контуры континентов и островов и данные по границам плит по (Bird, 2003).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРРЕЙНОВ ПО РАЗМЕРАМ

На рис. 2 показано частотное распределение количества террейнов северного обрамления Тихого океана по величине. Для террейнов площадь и статистические характеристики даны в условных единицах. Эти распределение имеет асимметричный характер и значимо скошено в сторону больших значений. Оно существенно отличается от нормального распределения тем, что вклад объектов с размерами, лежащими правее максимума (моды), относительно велик. Распределения для Аляски и северо-западной Канады имеют такой же вид, характеристики распределений представлены в таблице.

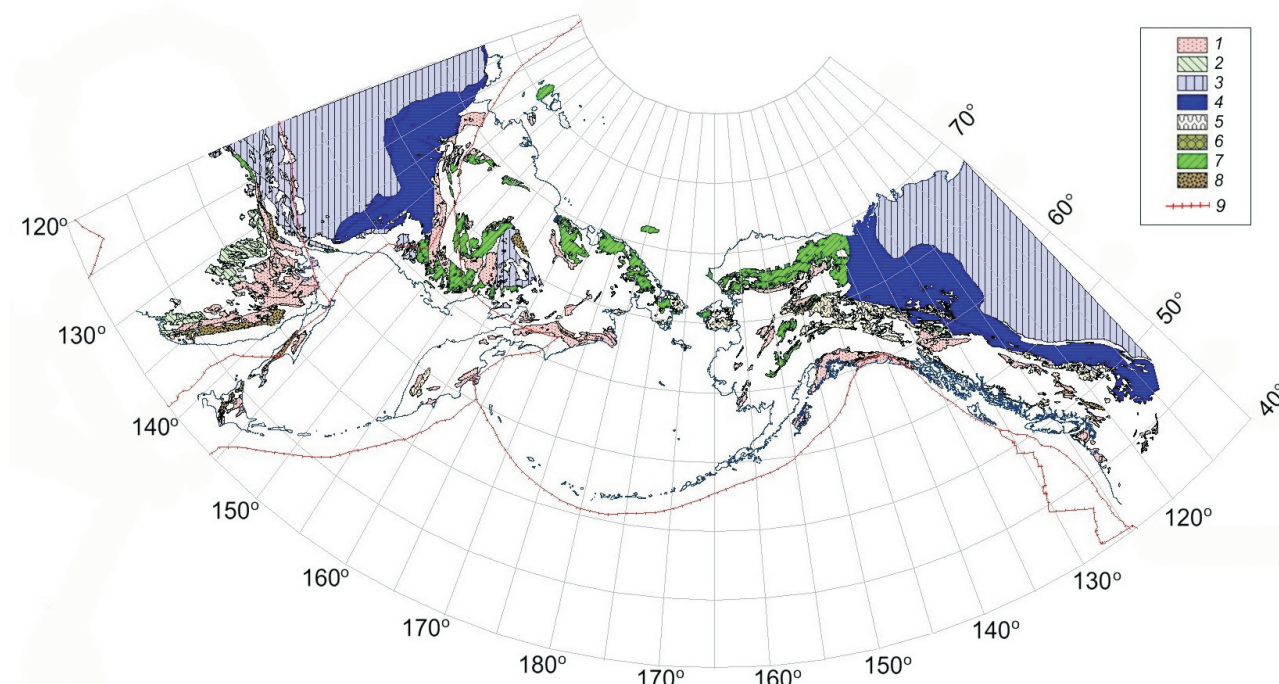


Рис. 1. Упрощенная схема террейнов северного обрамления Тихого океана, по (Geographic..., 1999). 1 – аккреционная призма, 2 – окраинно-континентальный пояс, 3 – кратон, 4 – окраина кратона, 5 – метаморфический комплекс, 6 – океаническая кора, офиолиты, подводные горы, 7 – пассивная континентальная окраина, 8 – турбидитовый бассейн, 9 – границы плит по (Bird, 2003).

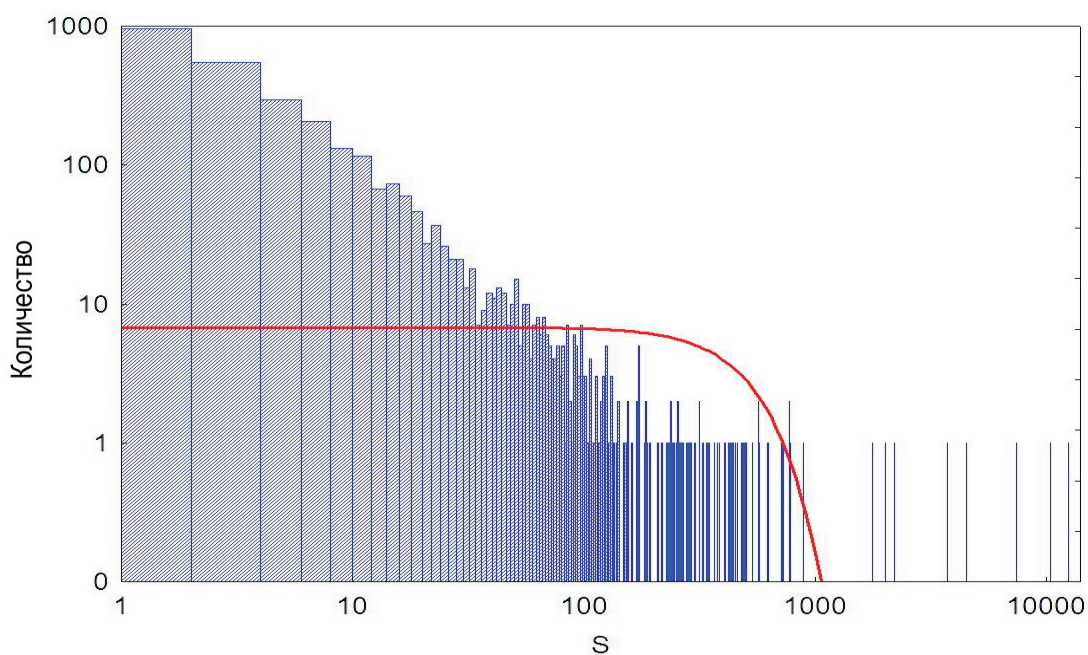


Рис. 2. Частотное распределение по площади множества террейнов северного обрамления Тихого океана. Линией показано нормальное распределение с теми же средним и дисперсией. Площадь S дана в условных единицах.

Характеристики распределений террейнов по площади.

Регион	Количество	Диапазон значений	Среднее	Мода	Дисперсия
Северное обрамление Тихого океана	2992	0.005–12454.1	34.5±6.5	0.6	124679.61
Аляска	1763	0.006–2857.9	8.4±1.8	1.3	5944.41
Северо-западная Канада	12244	0.027–49.0	1.6±0.05	0.1	30.25

В двойном логарифмическом масштабе правый склон хорошо аппроксимируется прямой линией, что указывает на степенной характер закона распределения, который охватывает около двух порядков по величине площади и имеет вид:

$$N \sim S^{-\gamma}, \quad (1)$$

где γ – параметр распределения. Для периметра характер распределения аналогичный.

Для степенных распределений не действует правило 3σ – нельзя пренебречь теми частями распределения, которые не попадают в интервал шириной 3σ . Из-за этого свойства такого рода распределения называют иногда распределениями с «тяжелыми хвостами». Эти особенности проявляются тем сильнее, чем меньше значение параметра в законе распределения (Писаренко, Родкин, 2007; Управление риском, 2000).

Такие характеристики распределения свидетельствуют об отсутствии каких-либо выделенных, характерных размеров в совокупности объектов, поскольку вероятность встретить объект (в данном случае – террейн) с размерами, отличающимися от «среднего», здесь значительно выше, чем в нормальном распределении. Слово «средний» заключено в кавычки, поскольку, вообще говоря, это понятие для таких распределений малоинформативно (а в некоторых случаях и неприменимо), и нужно пользоваться другими характеристиками, например модой распределения.

Если распределение дискретной величины носит степенной характер, то для его количественной характеристики можно вычислять показатели степени частотного (γ) или кумулятивного ($\alpha = \gamma - 1$) распределения (Bonnet et al., 2001). Кумулятивное распределение широко используется при статистическом анализе, оно обычно получается суммированием частотных данных, поэтому получается сглаженным и более удобным для аппроксимации. Однако оно очень чувствительно к эффектам, связанным с конечностью реальных объектов и с ограниченностью выборки. Для реальных совокупностей данных диапазон возможных значений всегда ограничен, как снизу, так и сверху. Наличие максимального значения в выборке приводит к тому, что кумулятивное распределение подчиняется степенному закону с достаточной точностью только вдали от максимального значения, а вблизи к нему «загибается». Кумулятивное степенное распределение с максимальным элементом S_{\max} описывается соотношением:

$$N_c \sim S^{-\alpha} - S_{\max}^{-\alpha}. \quad (2)$$

Кумулятивное распределение по площади террейнов северного обрамления Тихого океана

представлено на рис. 3. Применение в настоящем исследовании распределения с ограничением по максимальному значению позволяет описать всю исследуемую совокупность однородной степенной зависимостью. Это развивает результаты, полученные в (Вадковский, Захаров, 2003а, 2003б, 2003в; Вадковский и др., 2003а, 2003б) и, по нашему мнению, указывает на определенное единство процесса формирования и эволюции исследуемых объектов (в данном случае террейнов). Распределения, полученные по отдельным базам данных для Аляски и северо-западной Канады имеют такой же вид.

Параметр α в законе (2) принимает следующие значения: для множества террейнов всего северного обрамления Тихого океана $\alpha = 0.78 \pm 0.01$, для Аляски $\alpha = 0.61 \pm 0.01$, для северо-запада $\alpha = 0.69 \pm 0.01$. Параметры в степенных законах, полученные для частотного и кумулятивного распределения достаточно хорошо согласуются: например, для террейнов северо-запада Канады $\gamma = 1.70$, $\alpha = 0.69$.

САМОПОДОБИЕ И ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ МНОЖЕСТВА ТЕРРЕЙНОВ

При внимательном рассмотрении карты террейнов (рис. 1) видно, что каждый террейн из всего неупорядоченного множества уникален, в том числе по геометрической форме контура и размерам. В то же время степенной характер распределений по размерам указывает на определенную масштабную инвариантность рассмотренной совокупности.

Для характеристики сложности форм и изрезанности границ множества террейнов использовалась фрактальная размерность. Поскольку мы анализируем совокупность террейнов, плотно заполняющих поверхность, подобно фрактальной «плитке», и в анализируемых нами базах данных приводятся сведения о

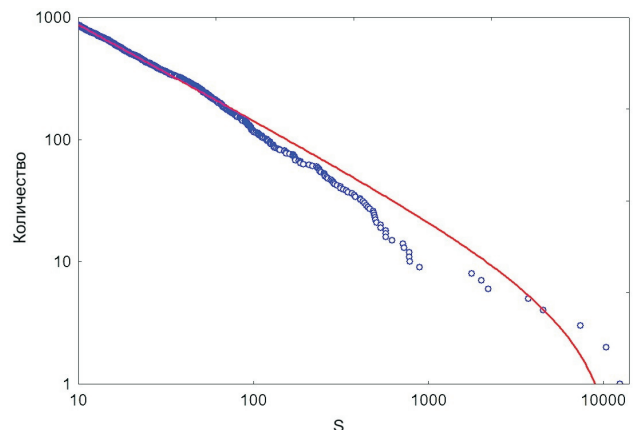


Рис. 3. Кумулятивное распределение по площади множества террейнов северного обрамления Тихого океана. Линией показан степенной закон вида (2) с $\alpha = 0.78 \pm 0.01$. Площадь S дана в условных единицах.

площади и периметре каждого объекта, то нами вычислялась размерность, определяемая по соотношению площади и периметра. Методика ее определения основана на следующем. Если при плотном заполнении поверхности объектами самых разных размеров и формы существует определенное самоподобие: объекты подобны как друг другу, так и общей совокупности, то это самоподобие проявляется в степенной зависимости, связывающей периметр объекта P и заключенную в нем площадь S . Для фрактальных фигур периметр растет быстрее, чем площадь, и выполняется соотношение:

$$S \sim P^{2/D}, \quad (3)$$

где D – фрактальная размерность контура, ограничивающего объект ($1 \leq D \leq 2$), то есть линии на поверхности (Мандельброт, 2002; Шредер, 2001). Близость величины фрактальной размерности D к 1 свидетельствует о «гладкости» линии контура, к 2 – о ее сильной изрезанности.

Для определения фрактальной размерности по множеству геологических объектов строилась эмпирическая зависимость $Lg(S)$ от $Lg(P)$ и методом наименьших квадратов вычислялся наклон аппроксимирующей прямой линии и ее статистические характеристики – коэффициент корреляции R и значимость по критерию Стьюдента t .

Для множества террейнов зависимость площади от периметра в двойном логарифмическом

масштабе хорошо аппроксимируется прямой линией. Определенная по обобщающей базе для террейнов северного обрамления Тихого океана фрактальная размерность $D = 1.33 \pm 0.01$ (рис. 4). Аналогичные зависимости установлены по отдельным базам данных для Аляски ($D = 1.30 \pm 0.01$) и северо-западной Канады ($D = 1.24 \pm 0.01$). Для всех случаев коэффициент корреляции $R > 0.98$, статистическая значимость по критерию Стьюдента $t > 200$, что существенно превышает пороговое значение, равное 3 и указывает на достоверность результатов. Значение D для Аляски уточнено по отношению к полученному нами в предыдущих работах (Вадковский, Захаров, 2003а, 2003б, 2003в; Вадковский и др., 2003а, 2003б), за счет более корректного выделения именно террейнов из общей базы данных геологических объектов.

ЗАВИСИМОСТЬ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ОТ ТИПА ПОРОД И ОТ ТИПА ТЕРРЕЙНА

Нами определялась зависимость фрактальной размерности D террейнов в зависимости от типа слагающих пород: plutonic, volcanic, sedimentary and metamorphic. Результаты для террейнов северо-западной Канады представлены на рис. 5. Можно выделить по значениям фрактальной размерности три группы террейнов (в порядке убывания

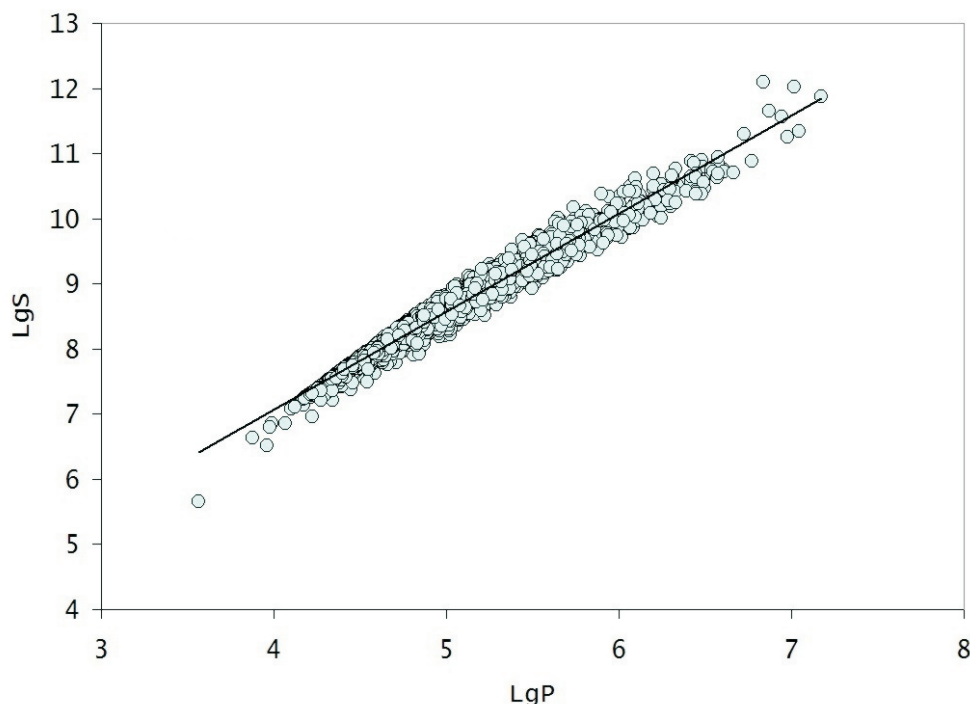


Рис. 4. Зависимость площадь (S) – периметр (P) в двойном логарифмическом масштабе для множества террейнов северного обрамления Тихого океана ($D = 1.33 \pm 0.01$). Прямой линией показана зависимость вида (3), площадь и периметр даны в условных единицах.



Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности D террейнов северо-западной Канады от типа пород.

значений D): осадочные, вулканические и метаморфические, плутонические. Это связано, вероятно, с меньшей прочностью осадочных пород, что приводит в процессе взаимодействия с соседними тектоническими единицами к большей изрезанности границ.

В ходе работы определены также фрактальные размерности для множеств террейнов разного типа. Хотя нами не выявлено зависимости фрактальной размерности D от количества объектов N в совокупности, для большей достоверности оценки проводились только в том случае, если количество террейнов этого типа в базе превышало 100.

Результаты для террейнов северо-западной Канады представлены на рис. 6, значения фрактальной размерности варьируются от $D = 1.16$ для аккреционных призм до 1.36-1.37 для фрагментов океанической коры. Здесь также можно выделить по значениям фрактальной размерности три группы террейнов. Относительно пониженные значения соответствуют метаморфическим комплексам, островным дугам, в которых много плутонических и вулканических пород. Относительно повышенные значения характеризуют террейны, представляющие собой фрагменты океанической коры и субдукционных комплексов. Промежуточные значения D (но ближе повышенным значениям) характерны для кратонов и континентальных окраин, в составе которых много осадочных пород. Это достаточно хорошо согласуется с разделением по типу пород, полученным выше. Исключение составляет относительно низкие значения D для аккреционных призм, в которых много осадочных пород и турбидитов.

ЗАВИСИМОСТЬ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИЧЛЕНЕНИЯ ТЕРРЕЙНОВ

На рис. 7 показаны вариации фрактальной размерности D множеств террейнов в зависимости от времени приращения. При анализе этих вариаций мы предполагали, что в них могут проявиться: (1) этапы формирования активной окраины; (2) общий тренд увеличения или уменьшения D , связанный с возможными процессами деформации и разрушения террейнов. В частности, увеличение D в зависимости от возраста приращения означало бы усложнение формы, изрезанности границ объектов, что говорит о достаточно активном взаимодействии по этим границам с соседями. Уменьшение же D указывало бы на общее пластическое «раздавливание», «затекание» неоднородностей и изрезанности границ.

Однако выделяемые геологами рубежи формирования активной окраины 145, 80-60, 43,15 млн. лет (Соколов, 1997; Fujita et al., 1983; Maquyama et al., 1997) не отражаются на изменении фрактальной размерности множеств террейнов соответствующего возраста. От возраста довольно сильно зависит количество N приращенных террейнов. Наибольшая вариация фрактальной размерности выявлена по данным для северо-западной Канады для возраста 200 миллионов лет (граница Триаса и Юры).

Визуальный анализ зависимости фрактальной размерности от времени указывает на возможность некоторой тенденции к увеличению D для более древних террейнов. Однако достоверно выявить тренды не удается: для Канады критерии

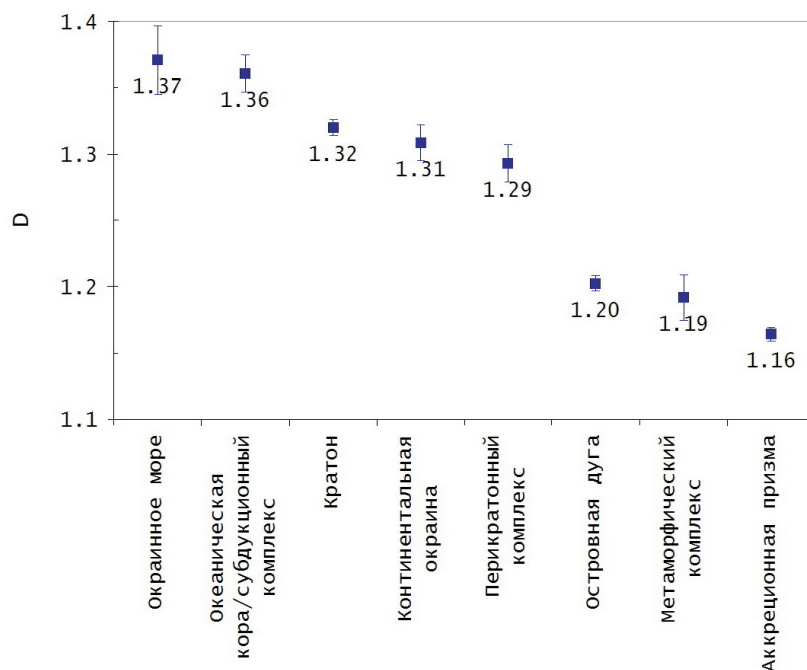


Рис. 6. Фрактальная размерность D различных типов террейнов северо-западной Канады.

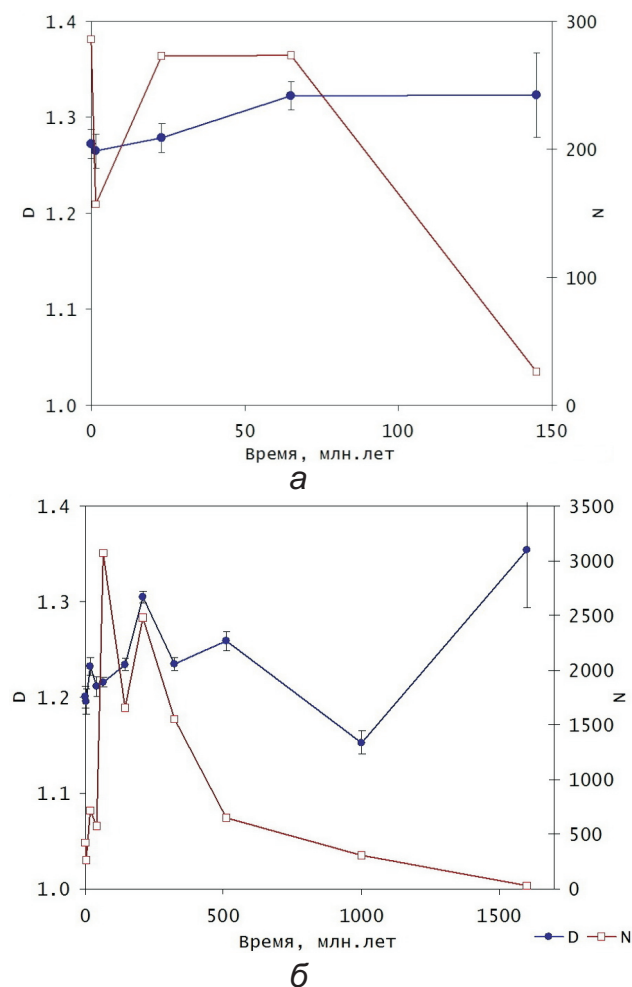


Рис. 7. Зависимость фрактальной размерности D от времени причленения для множества террейнов a – Аляски, b – северо-запада Канады. Показана также зависимость количества N террейнов от времени.

рий Стьюдента $t = 1.55$ (число степеней свободы $df = 9$), для Аляски $t = 3.28$ ($df = 3$).

САМОПОДОБИЕ И ФРАКТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСТРОВОВ И КОНТИНЕНТОВ

С точки зрения соотношения площади и периметра нами были проанализированы цифровые данные координат береговых линий континентов и крупных ($S \geq 1000 \text{ км}^2$) островов. Кумулятивное распределение континентов и островов по площади имеет степенной характер и аппроксимирующий закон вида (2) с максимальным элементом в выборке, который выполняется в диапазоне нескольких порядков величин (рис. 8). Однако значение параметра распределения ($\alpha = 0.36 \pm 0.01$) отличается от аналогичных параметров распределений террейнов по площади.

Соотношение между площадью и периметром для континентов и островов также подчиняется степенному закону вида (3) в диапазоне нескольких порядков (рис. 9). Фрактальная размерность множества современных континентов и островов, рассчитанная по соотношению (3) равна $D = 1.25 \pm 0.03$ ($R = 0.983$, $t = 48$). Это значение достаточно хорошо соответствует фрактальной размерности террейнов, особенно северо-западной Канады.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа установлено самоподобие форм различных геологических тел в огромном диапазоне размеров – от первых километров до тысяч километров.

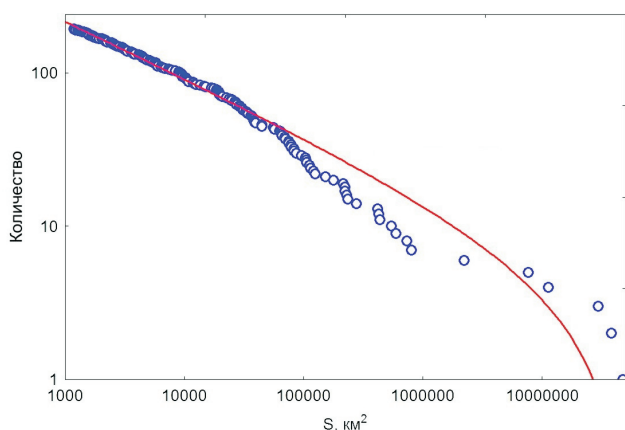


Рис. 8. Кумулятивное распределение континентов и крупных островов по площади S . Линией показан степенной закон вида (2) с $\alpha = 0.36 \pm 0.01$.

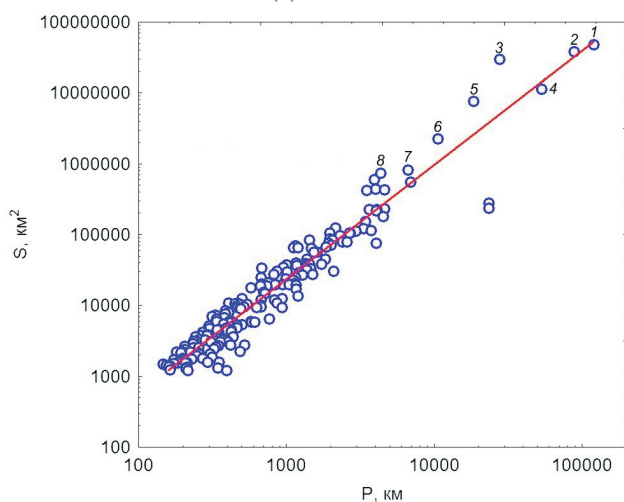


Рис. 9. Зависимость площадь (S) – периметр (P) для современных континентов и крупных островов. Фрактальная размерность $D = 1.25 \pm 0.03$. 1 – Евразия; 2 – С. и Ю.Америка; 3 – Африка; 4 – Антарктида; 5 – Австралия; 6 – о. Гренландия; 7 – о. Новая Гвинея; 8 – о. Калимантан.

Малая вариация фрактальной размерности в зависимости от возраста причленения свидетельствует об относительно малой деформации террейнов после их причленения. Это означает, что не существует механизмов взаимного притяжения террейнов, они остаются неизменными, ведя себя как относительно жесткие блоки, и подчиняются законам, схожим с законами гранулярной механики (Jaeger et al., 1996). На больших временах механизм аккреции не обладает «памятью» – более молодая континентальная окраина формируется так же, как и более древняя. Это, по нашему мнению, указывает на независимость причленения нового террейна к совокупности террейнов уже образовавшейся континентальной окраины и о единстве механизма их взаимодействия (объединения и распада). Процессы такого типа носят названия Марковских. Береговая линия

растущей активной окраины также является фракталом.

По-видимому, не существует объективных критериев классификации геологических объектов по размерам. То обстоятельство, что Австралия считается континентом, а Гренландия – островом, является, по-видимому, следствием традиции, а не объективным критерием. Эта традиционная «граница» между континентами и островами не проявляется на соотношении площадей и периметров. Конечно, Австралия больше Гренландии, но Гренландия, в свою очередь, больше Новой Гвинеи, причем примерно с тем же масштабным отношением. В связи с этим возникает вопрос: как «правильно» называть Индостан до коллизии с Евразией: островом, микроконтинентом или континентом?

Это позволяет сделать вывод и о подобии процессов их формирования: объединение континентов в суперконтинент происходит подобно присоединению террейнов на активной окраине – вследствие уничтожения океанической литосферы. При таком механизме формирования, линия растущего фронта (береговая линия) так же обладает фрактальными свойствами.

Вопрос о характере распределения по размерам не только континентальных блоков, но и целых литосферных плит рассматривается в ряде работ. В статье (Bird, 2003) предложена обновленная модель плит PB2002 и установлено, что кумулятивное распределение плит по площади подчиняется степенному закону вида (1) с показателем $\alpha = 0.33$. Однако в области малых и больших размеров наблюдаются отклонения от однородного закона. В работе (Sornette, Pisarenko, 2003) показано, что применение распределения с постоянной суммой (в данном случае 4π для суммарной площади поверхности Земли) позволяет в рамках единого обобщенного степенного закона описать все наблюдаемое распределение плит по размерам с показателем $\alpha = 0.25$. В статье (Голицын, 2008) делается вывод, что рассматриваемый вид распределения для плит характерен для случайных геометрических разбиений поверхностей. В работе (Шерман, 2012), посвященной разломно-блоковой делимости литосферы отмечено, что ее деструкция при разных геодинамических режимах и полях напряжений может быть описана общим математическим выражением степенного вида.

Подход, который предложен в работах (Голицын, 2008; Шерман, 2012; Bird, 2003; Sornette, Pisarenko, 2003), указывает связь между глобальной организацией больших плит и блоковой структурой масштаба десятков километров и меньше. Рассмотренные в настоящей работе структуры (террейны и их объединения) не являются плитами, это только их континенталь-

ные части. Однако применение распределений с ограничением по максимальному значению позволяет выявить сходные закономерности иерархии, описываемые степенными законами того же вида, что и для плит. Количественные значения параметров в этих законах отличаются от установленных для плит, что, по-видимому, отражает различия в процессах их формирования и развития. Однако, по нашему мнению, общим тут являются именно сочетание процессов роста и уничтожения, что и приводит к степенным, фрактальным законам распределений.

Полученные нами результаты о самоподобных свойствах континентальных образований от террейнов до континентов подтверждают и расширяют заключения (Голицын, 2008, Шерман, 2012; Bird, 2003; Sornette, Pisarenko, 2003), а также наших предыдущих работ (Вадковский, Захаров, 2003а, 2003б, 2003в; Вадковский и др., 2003а, 2003б). Фрактальность структур является важным свойством тектоники плит, которое необходимо учитывать для дальнейшего понимания самоорганизации в ходе изучения глобальных геодинамических и геотектонических процессов и суперконтинентальных циклов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №13-05-01033.

Список литературы

- Вадковский В.Н., Захаров В.С.* Внутриплитная сейсмичность: фрактальная размерность и жесткость // Пятые геофизические чтения имени В.В. Федынского. Тезисы докладов. М.: ГЕОН, 2003а. С. 64.
- Вадковский В.Н., Захаров В.С.* В чем красота геологических тел? // Научная конференция «Ломоносовские чтения». Секция «Геология». М.: МГУ, 2003б. <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1169088>.
- Вадковский В.Н., Захаров В.С.* Соотношения площадей и периметров геологических тел активных окраин северного обрамления Тихого океана // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Фракталы и прикладная синергетика». ФиПС-03. М.: МГОУ, 2003в. С. 232-235.
- Вадковский В.Н., Захаров В.С., Лубнина Н.В.* Аккреционная тектоника и фрактальные характеристики террейнов // Материалы XXXVI тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2003а. С. 89-93.
- 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, 2003б. С. 278-285.
- Голицын Г.С.* О распределении числа литосферных плит по размерам // Физика Земли. 2008. № 3. С. 3-8.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.* Палеогеодинамика М.: Наука, 1992. 192 с.
- Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В.* Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: ГЕОС, 2007. 242 с.
- Соколов С.Д.* Аккреционная тектоника Корякско-Чукотского сегмента Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1992. 182 с.
- Соколов С.Д.* Аккреционная тектоника на современном этапе. Геотектоника. 2003. № 1. С. 1-14.
- Соколов С.Д., Бондаренко Г.Е., Морозов О.Л., Луцицкая М.В.* Тектоника зоны сочленения Верхояно-Чукотской и Корякско-Камчатской складчатых областей // Бюллетень МОИП. Отд. Геол. 2001. Т. 76. Вып. 6. С. 24-37.
- Соколов С.Д., Диденко А.Н., Григорьев В.Н. и др.* Палеотектонические реконструкции Северо-Востока России: проблемы и неопределенности // Геотектоника. 1997. № 6. С. 72-90.
- Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- Храмов А.Н.* Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
- Шерман С.И.* Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонофизические закономерности // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 315-344. doi:10.5800/GT-2012-3-4-0077.
- Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Ижевск: РХД, 2001. 528 с.
- Ben-Avraham Z., Nur A., Jones D., Cox A.* Continental accretion: from oceanic plateaus to allochthonous terranes // Science. 1981. V. 213. P. 47-54.
- Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2003. V. 4. № 3. 1027. doi:10.1029/2001GC000252.
- Bonnet E., Bour O., Odling N. E. et al.* Scaling of fracture systems in geological media // Reviews of Geophysics. 2001. V. 39. № 3. P. 347-381.
- Fujita K., Newberry T.* Accretionary Terranes and tectonic evolution of Northeast Siberia // Accretion tectonics in the Circum-Pacific region. Eds.: Hahimoto M., Uyeda S. Tokyo, 1983. P. 43-57.
- Geographic Information System (GIS) Compilation of Geophysical, Geologic and Tectonic Data for Circum-North Pacific. W.J. Nokleberg, M.F. Diggles (Eds.) USGS, Open-File Report 99-422, Version 1.0. 1999 (CD).
- Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P.* The Physics

- of Granular Materials // *Physics today*. 1996. V. 49. № 4. P. 32-38.
- Maruyama S., Isozaki Y., Kimura G., Terabayashi M.* Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present // *The Island Arc*. 1997. V. 6. № 1. P.121-142.
- Moore T.E.* The Arctic Alaska superterrane // *Geologic studies in Alaska by the U.S. Geological Survey / Bradley D.C., Dusel-Bacon C. (eds.) U.S. Geological Survey Bulletin 2041*, 1992. P. 238-244.
- Nokleberg W.J., Parfenov L.M., Monger J.W.H. et al.* Circum-north Pacific tectonostratigraphic terrane map. USGS. Open file report 94-714, 1994. 221 p.
- Pechersky D.M., Shapiro M.N., Sharonova Z.V.* Palaeomagnetic study of the Eastern Kamchatka Cretaceous-Palaeocene arc: new evidence concerning palaeosubduction zone absolute motion // *Geophysical Journal International*. 1997. V.130. № 3. P. 606-622.
- Sornette D., Pisarenko V.* Fractal Plate Tectonics // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. № 3. 1105. doi:10.1029/2002GL015043.
- Turcotte D.L.* *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Second edit. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.

ACCRETION TECTONICS AND FRACTAL CHARACTERISTICS OF TERRANES

V.S. Zakharov, V.N. Vadkovsky

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991

According to the digital maps of active continental margin of Northern Pacific we defined the statistical characteristics of terranes. Self-similarity of the terranes in a wide range of sizes is established. We calculate fractal dimension using the perimeter-area ratio, the value is $D = 1.33 \pm 0.01$ for the north Pacific, $D = 1.30 \pm 0.01$ for Alaska, and $D = 1.24 \pm 0.01$ for the northwestern Canada. Fractal dimension for terranes of various types and accretion ages were calculated. It was found that fractal dimension varies slightly depending on the time of accretion. This reflects the low degree of deformation of terranes during accretion and indicative of their rigidity in all ranges of sizes. Larger blocks of an earth's crust (continents and large islands) also obey to the uniform power law and are characterized by close value of the fractal dimension $D = 1.25 \pm 0.03$. It specifies on absence of any allocated characteristic sizes which could be used for classification of terranes, superterrane, microcontinents and continents. It testifies also to the uniform mechanism of association of tectonic units of the various sizes and origins.

Keywords: terranes, active margins, accretion, power law, fractal dimension.