

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЦЕНТР ГЕОН им. В.В. ФЕДЫНСКОГО
ЕВРО-АЗИАТСКОЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОФИЗИКА XXI СТОЛЕТИЯ: 2002 год

Сборник трудов Четвертых геофизических чтений
имени В.В. Федынского
(28 февраля – 02 марта 2002 г., Москва)

Москва
Научный Мир
2003

АККРЕЦИОННАЯ ТЕКТОНИКА И ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ

В.Н. Вадковский¹, С.Д. Соколов², В.С. Захаров¹, Н.В. Лубнина¹

¹Геологический факультет МГУ, Москва, Россия; ²ГИН РАН, Москва, Россия

Введение

Изучение палео- и современных активных окраин континентов приводит к более ясному пониманию процессов поглощения океанической и формирования континентальной коры. В настоящее время существуют чисто океанические литосферные плиты, но нет чисто континентальных. Нарастание континентальной коры происходит на активных окраинах за счет надвигания участков океанической коры и находящихся на ней неоднородностей (офиолитов, океанических островов и подводных гор, поднятий, микроконтинентов, островных дуг). Прибавление массы континентальной коры обусловлено также вулканизмом субдукционных зон. Одновременно 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 в виде аккреционных призм, надвигающихся на активную окраину. В зависимости от соотношения скоростей перечисленных процессов континентальная активная окраина может как наращаться, так и сокращаться.

Для осуществления перечисленных процессов необходимо относительное встречное смещение активной окраины континента и океанической плиты, сопровождающееся поглощением океанической коры. Формирование активной окраины сопровождается высокой сейсмической активностью, способствующей аккреционному смещению блоков, ускорению эрозии и сноса осадков, уплотнению аккреционных призм и т.п. Существует много геологических и геофизических свидетельств этому. За-

крывшиеся палеоокеаны оставили свои следы, нарастив континенты, например, в Алтае-Саянской складчатой области, Прибайкалье, на Урале, в Альпийском поясе.

Поэтому представляет интерес попытка количественной оценки столь сложного геологического явления как аккреционная тектоника. Понятно, что эта оценка должна включать огромное количество факторов: скорость субдукции, толщина океанической и континентальной коры, количество и тип неоднородностей океанической коры и т.д.

Что такое террейны?

Геологическими исследованиями установлено, что активные окраины представляют собой нагромождение (коллаж) блоков, надвинутых на край континента. Эти блоки называют "террейнами".

Несмотря на широкое употребление термина "террейн", не существует его однозначного определения.

Согласно работе [3] "террейном можно, по-видимому, назвать блок любых (но в разумных пределах) размеров, который включен в состав складчатого пояса, который отделен от окружающих его горных пород, их структуре, происхождению, геохимической, палеобиогеографической, палеомагнитной характеристикам резко отличается от вмещающих отложений или смежных блоков". Авторы подчеркивают 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 [19, 20]. Террейны имеют различный генезис и собственную историю. Некоторые из них представляют собой неоднородности океанической коры (офиолиты, вулканические острова, поднятия, микроконтиненты, осколки кратонов, островные дуги), другие сформировались в процессе субдукции (аккреционные призмы, островные дуги) [9–11]. На рисунке 1 показана тектоническая карта северного обрамления Тихоокеанского бассейна масштаба 1:5 000 000 [22], на которой видны террейны самого разного размера и происхождения. Обращает на себя внимание мозаичность картины – неупорядоченность расположения и разнообразие форм террейнов.

Обстановки формирования активных окраин также различны [4]. Они зависят от направления и скорости субдукции, ее фазы, угла наклона, геометрии желоба, наличия трансформных разломов, от неоднородностей на субдуцирующей океанической коре и т.п. Согласно многочисленным палеомагнитным данным, некоторые террейны (террейны-странники) проделали огромный путь в тысячи километров, прежде чем оказались на активной

окраине [1, 6, 13, 21], другие (может быть, террейны-сидельцы?) проделали совсем небольшой путь – десятки и сотни километров. Некоторые террейны испытали вращение относительно соседних террейнов или кратонов. Другие террейны раскололись, став субтеррейнами, прежде чем оказались на активной окраине (Врангелия, Омогон), какие-то раскалывались в процессе аккреции. Значительные по размеру террейны иногда называются “супертеррейнами”.

В известной мере, неопределенность термина “террейн” отражает сложность и разнообразие процесса формирования активных континентальных окраин. Во многих областях науки для изучения подобных процессов оказывается плодотворным подход с использованием понятий фрактальной геометрии [23].

Самоподобие и фрактальная размерность множества террейнов

В наиболее общем виде фракталом можно назвать объект, состоящий из частей, которые в каком-то смысле подобны целому – *самоподобны*, – причем это подобие может быть как геометриче-

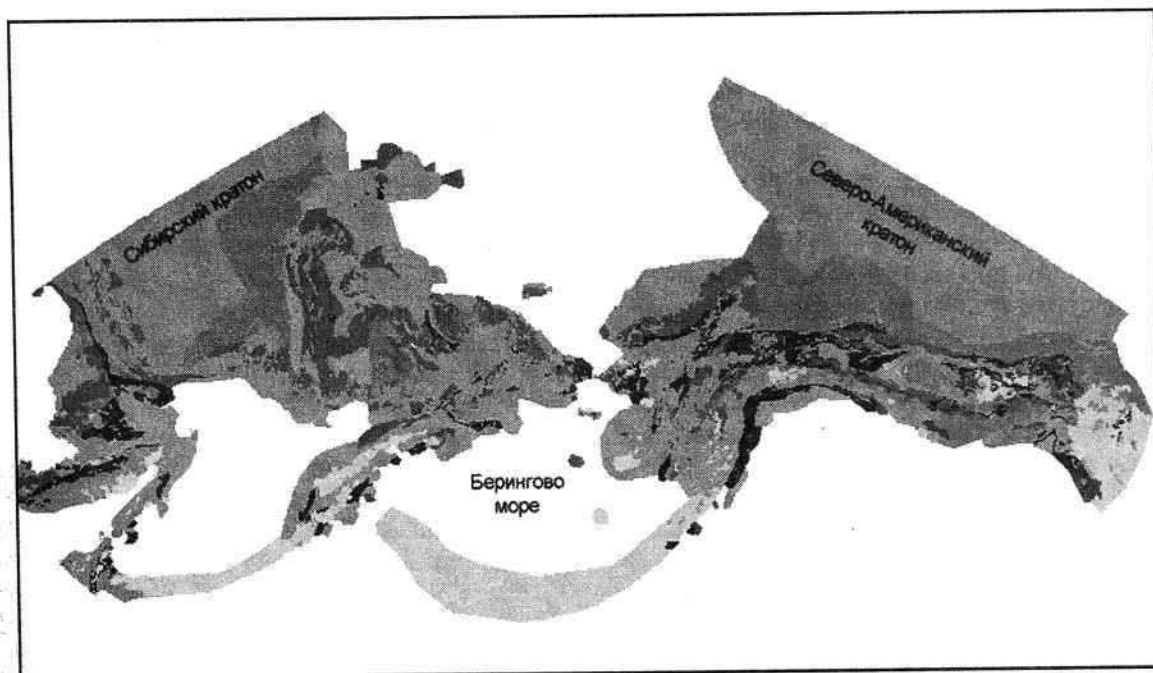


Рис. 1. Карта террейнов северного обрамления Тихоокеанского бассейна
Оттенками серого цвета показан разный возраст террейнов

ским, так и статистическим [12, 17]. При внимательном рассмотрении карты террейнов (см. рис. 1) видно, что каждый террейн из всего неупорядоченного множества уникален, в том числе по геометрической форме контура и размерам. Является ли множество форм террейнов фрактальным и какова его фрактальная размерность?

Для получения ответа воспользуемся соотношением

$$S = S_0 \cdot P^E,$$

где P — длина контура (периметр объекта), S — площадь, заключенная внутри контура, $S_0 = \text{const}$. Если существует самоподобие объектов самых разных размеров, показатель степени E является константой и определяет фрактальную размерность всего множества d . Показатель степени E связан с фрактальной размерностью контура соотношением $E=2/d$ [5, 23]. Близость величины фрактальной размерности d к единице свидетельствует о “гладкости” линии контура, тогда как при d , близком к двум — о сильной изрезанности линии контура. Для определения фрактальной размерности для множества объектов (террейнов) строилась эмпирическая зависимость $\ln(S)$ от $\ln(P)$ и методом наименьших квадратов вычислялся наклон аппроксимирующей прямой линии и ее статистические характеристики — коэффициент корреляции и значимость по критерию Стьюдента.

Для анализа использовались наборы данных о террейнах, сопровождающие цифровые геологические карты Северо-Востока России от Чукотки до Приморья и Северо-Запада Северной Америки от Аляски до Калифорнии, подготовленные большими коллективами авторов — геологами и геофизиками России, Японии, Канады, Соединенных Штатов [15, 23]. В этих наборах данных для каждого террейна рассчитаны его площадь, периметр и указаны геологические и тектонические характеристики и времена образования и приращения.

Для множества террейнов зависимость площади от периметра в двойном логарифмическом масштабе хорошо аппроксимируется прямой линией, что свидетельствует о самоподобии форм террейнов. Это же самоподобие сохраняется и при рассмотрении групп террейнов одного возраста. Определенная по всему множеству ($n=12586$) террейнов Северо-Востока России (рис. 2а) фрактальная размерность d имеет значение 1,377, коэффициент корреляции $r=0,977$ и статистическая значимость

по критерию Стьюдента $t=183$, что существенно превышает пороговое значение, равное 3. Аналогичная зависимость установлена для множества ($n=2693$) террейнов Северо-Запада Северной Америки (рис. 2б): фрактальная размерность $d=1,202$, коэффициент корреляции $r=0,998$, критерий Стьюдента $t=82$. Различие фрактальных размерностей террейнов Северо-Востока России и Северо-Запада Северной Америки может быть связано с различием строения океанического дна в западной и восточной частях Палеоокеана и различием их эволюции [14, 18].

Обсуждение

Линейная зависимость между периметром и площадью в двойном логарифмическом масштабе, как видно из рисунка 2, выполняется для огромного диапазона размеров террейнов. Распределение количества террейнов в зависимости от величины логарифма площади показано на рисунке 3. Это распределение сильно скошено в сторону больших значений площади, что отличает его от нормального. Обусловлено это отличие тем, что вклад объектов с размерами, лежащими правее максимума, относительно велик. Про такие распределения говорят иногда, что у них “тяжелый хвост” — именно в том смысле, что “хвостом” здесь нельзя пренебрегать, как это делается для нормальных распределений. На этом же рисунке показано, что в двойном логарифмическом масштабе правый склон хорошо аппроксимируется прямой линией. Это еще одно подтверждение того, что все множество террейнов, составляющих активную окраину, является фрактальным.

Такого вида распределения свидетельствуют об *отсутствии* каких-либо выделенных *характерных размеров* в совокупности объектов, поскольку вероятность встретить объект (террейн) с размерами, отличающимися от “среднего”, здесь значительно выше, чем в нормальном распределении. Слово “средний” заключено в кавычки, поскольку, вообще говоря, *понятие среднего* для таких распределений *неприменимо* — можно говорить о величине, соответствующей максимуму на распределении.

Были определены фрактальные размерности для множеств террейнов разного тектонического типа. Они оказались разными, варьирующими от $d=1,286$ для кратонов до 1,517 для подводных гор, офиолитов и фрагментов океанической коры.

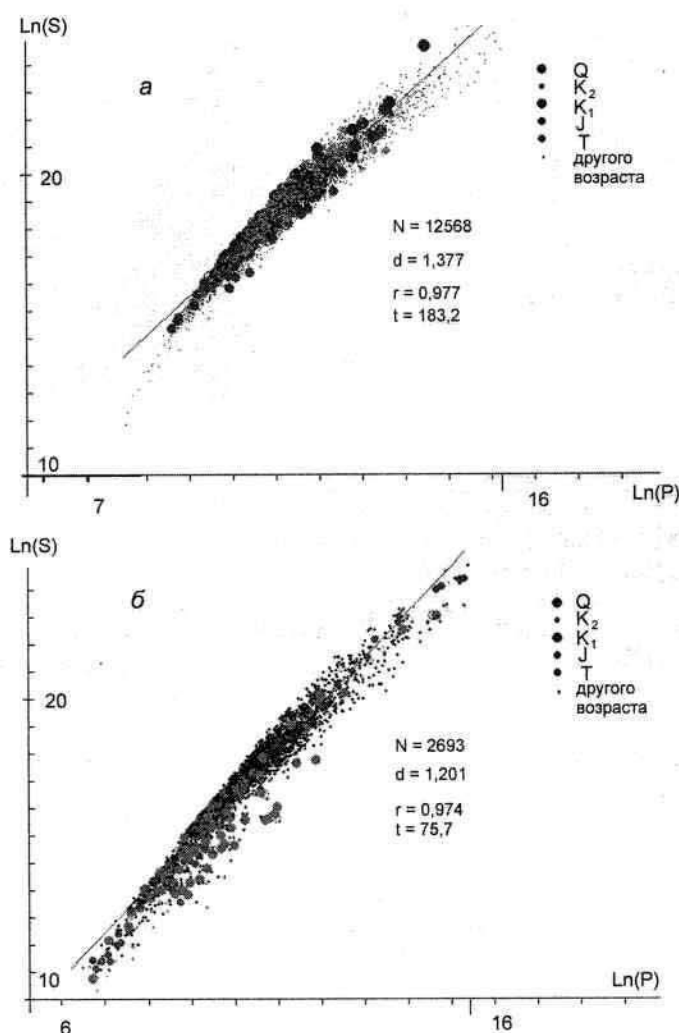


Рис. 2. Зависимость “площадь–периметр” в двойном логарифмическом масштабе множества террейнов
а – для Северо-Востока России; *б* – для Северо-Запада Северной Америки. Кресты разного диаметра соответствуют разным возрастам террейнов. Здесь и далее используются натуральные логарифмы

Естественно предположить, что с течением геологического времени террейны приобретают более гладкую форму. На рисунке 4 показаны фрактальные размерности множеств террейнов в зависимости от времени приращения (возраста) по данным для Северо-Востока России и Северо-Запада Северной Америки, соответственно. Видно, что фрактальная размерность, а, следовательно, и изрезанность контуров террейнов, с течением времени изменяются незначительно.

Можно ожидать, что изменение фрактальной размерности со временем отражает различные эта-

пы формирования активной окраины. Однако, выделенные геологами рубежи 145, 80–60, 43, 15 млн. л. [7, 14, 18] не отражаются на изменении фрактальной размерности множеств террейнов того возраста, который соответствует выделенным рубежам для Северо-Востока России (см. рис. 4а). Наиболее резкое изменение фрактальной размерности выявлено по данным для северо-западной части Северной Америки (см. рис. 4б) для возраста 200 млн. л. (граница триаса и юры).

На рисунке 4 показано также, что от времени зависит количество приращенных террейнов. Со-

Рис. 3. Распределение количества террейнов N в зависимости от логарифма площади для множества террейнов Северо-Востока России

Кружками показана зависимость $\ln(N)$ от логарифма площади

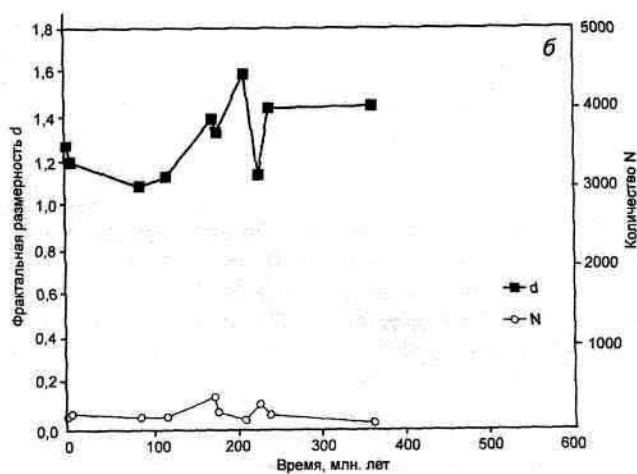
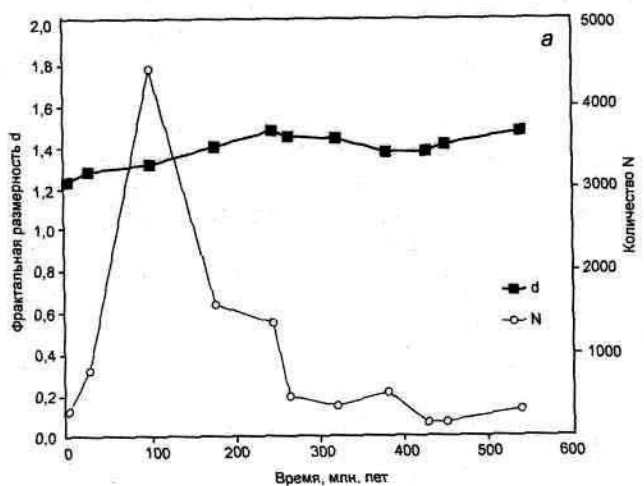
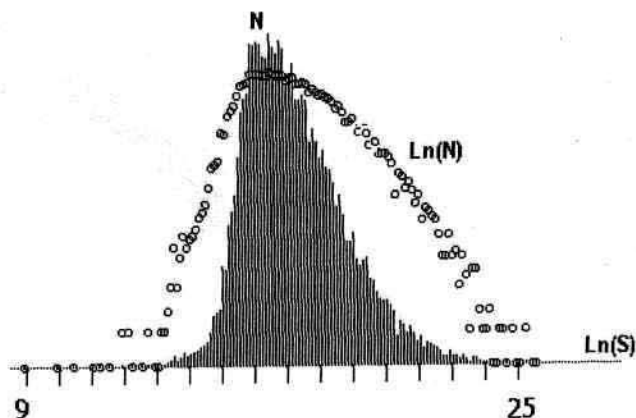


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности от времени приращенния множества террейнов
а – для Северо-Востока России; б – для Северо-Запада Северной Америки. Квадратами показано количество террейнов каждого возраста

гласно этого рисунка отсутствует корреляция между фрактальной размерностью и количеством террейнов.

Малая вариация фрактальной размерности в зависимости от времени причленения свидетельствует, по-видимому, об относительно малой деформации террейнов после их причленения. Это означает, что не существует механизмов взаимного притяжения террейнов, они остаются неизменными, ведут себя как жесткие блоки и подчиняются законам гранулярной механики [16]. На больших временах механизм аккреции не обладает обратной связью – уже сформированная окраина формируется так же, как и молодая. Это наводит на мысль о независимости причленения нового террейна к совокупности террейнов уже образовавшейся континентальной окраины. Процессы такого типа носят названия марковских.

По координатам современных береговых линий континентов и островов, рассчитаны их периметры и площади. Фрактальная размерность множества современных континентов и островов получилась равной $d=1,220$, (при $r=0,983$, $t=50$), что демонстрирует рисунок 5. Таким образом, можно говорить о самоподобии форм различных геологи-

ческих тел в огромном диапазоне размеров – от километров до тысяч километров. По-видимому, не существует объективных критериев классификации геологических объектов по размерам, поэтому Австралия называется континентом, а Гренландия – островом. Могло быть и наоборот.

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 является фракталом [23].

Сделанный выше вывод о жесткости блоков самого разного размера позволяет по-новому взглянуть на проблему внутриплитовой деформации больших плит. Деформации плит, согласно полученным результатам, можно объяснить движениями по границам аккретированных блоков их составляющих. При таком подходе находит естественное объяснение и структурная унаследованность – блоки не срастаются, тектонические швы допускают некоторое относительное смещение блоков разного масштаба.

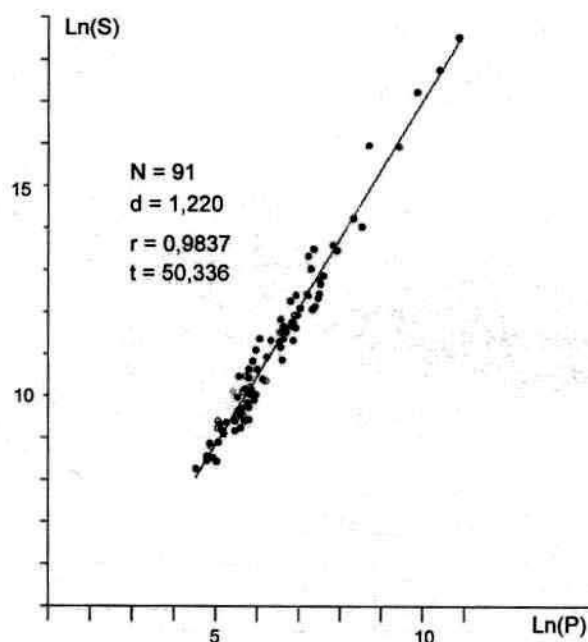


Рис. 5. Зависимость площадь–периметр в двойном логарифмическом масштабе для современных континентов и крупных островов

Сейсмичность Западной Аляски и Чукотки исследована в работе [2]. Большинство землетрясений в этом регионе – слабые, для их регистрации необходима локальная сеть сейсмостанций. Точность определения координат эпицентров составляет 25–50 км, глубины гипоцентров не определяются. Однако, согласно этой работе, записи некоторых землетрясений свидетельствуют о возможной глубине очага ниже подошвы коры. Авторы связывают особенности проявления сейсмичности с возможностью существования в регионе небольших независимых плит.

Распределение эпицентров по данным каталога из ежегодников “Землетрясения в СССР” за интервал 1962–1989 гг. вместе с основными тектоническими границами показано на рисунке 6. Наиболее примечательным является приуроченность землетрясений к границам блоков, соседствующих друг с другом много миллионов лет и, тем не менее, перемещающихся друг относительно друга, что порождает землетрясения.

Другим прямым свидетельством относительно смещения блоков служат измерения GPS (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>), выявляющие большие горизонтальные градиенты скоростей смещения, так же показанные на этом рисунке.

Выводы

1. Установлено самоподобие форм террейнов в огромном диапазоне размеров.
2. По соотношению “периметр–площадь” в двойном логарифмическом масштабе определена фрактальная размерность множества террейнов Северо-Востока России ($d=1,377$) и западной части Северной Америки ($d=1,202$), а также множества континентов и островов ($d=1,220$).
3. Наличие степенного закона распределения площадей и периметров множества террейнов и вычисленная фрактальная размерность свидетельствуют об отсутствии каких-либо выделенных ха-

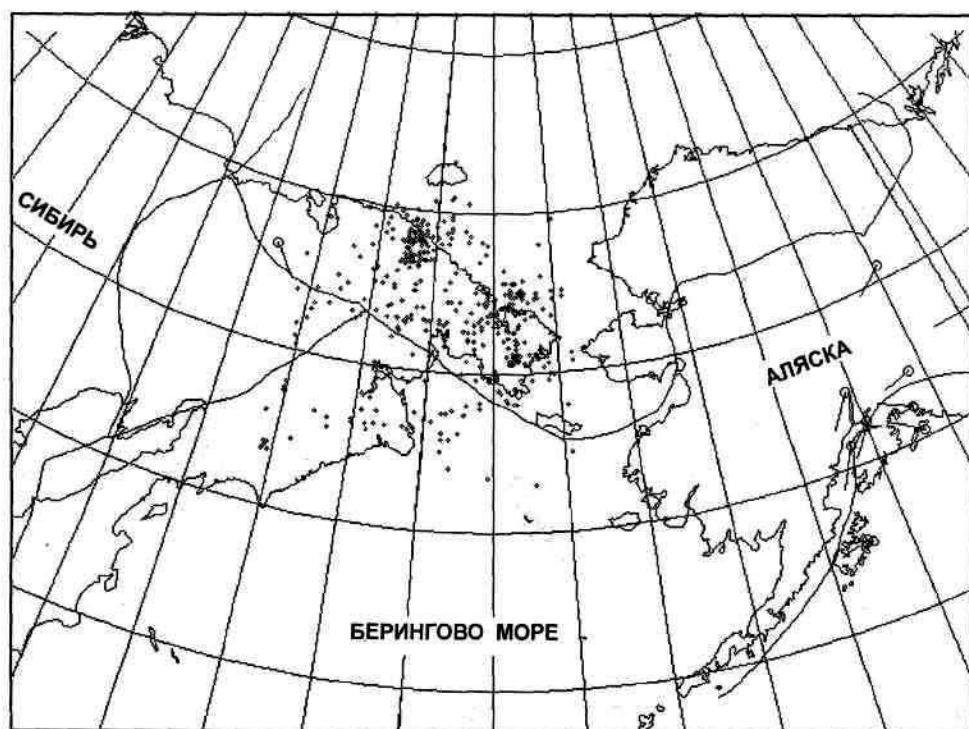


Рис. 6. Распределение эпицентров землетрясений на Чукотке по данным каталогов “Землетрясения в СССР”, 1962–1989 гг.

Линии – границы блоков, выделенные по модели 12 плит; стрелки – векторы скорости по данным GPS, 2001 г.

рактерных размеров геологических тел в диапазоне размеров от первых километров до тысяч километров (континенты).

4. Достаточно узкий диапазон значений фрактальной размерности для столь разных объектов дает основание полагать о единстве механизма их взаимодействия (объединения и распада).

Литература

1. Алексютин М.В., Соколов С.Д., Морозов О.Л., Харберт В., Бондаренко Г.Е., Баженов М.Л. Конфигурация океанических плит северо-западной Палеоокеании в мезозое // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. М.: ОИФЗ, 1998. С. 6.
2. Годзиковская А.А., Ландер А.В. Возможны ли мантийные землетрясения на Чукотке? // Сейсмические исследования. М.: ОИФЗ, 1991. С. 97-100.
3. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. С. 146-162.
4. Ломизе М.Г. Тектонические условия заложения зон субдукции на континентальных окраинах // Тектоника и геофизика литосферы. Т.1. М.: ГЕОС, 2002. С. 309-312.
5. Мандельброт Б. Самоаффинные фрактальные множества // Фракталы в физике. М.: Мир, 1988. С. 10-48.
6. Палеомагнитология. А.Н.Храмов – ред. Л.: Недра, 1982. 312 с.
7. Соколов С.Д. Эволюционная модель активных окраин Тихого океана // Тектоника Азии. М.: ГЕОС, 1997. С. 204-206.
8. Соколов С.Д., Бондаренко Г.Е., Морозов О.Л., Лучицкая М.В., Григорьев В.Н., Силантьев С.А., Худолей А.К. Тектоника зоны сочленения Верхояно-Чукотских мезозонд и Корякско-Камчатской сладчатой области // 7-ая Международная конференция по тектонике плит им. Л.П.Зоненшайна. М.: Научный мир, 2001. С. 359-360.
9. Соколов С.Д., Диденко А.Н., Алексютин М.В., Григорьев В.Н., Крылов К.А., Бондаренко Г.Е. Тектоника Северо-Востока Азии и проблема палеотектонических реконструкций // Тектоника Азии. М.: ГЕОС, 1997. С. 206-207.
10. Соловьев А.В., Брэндон М.Т., Леднева Г.В., Гарвер Д.И. Ансамбли структурных парагенезов в сложно построенных зонах аккреции // Структурные парагенезы и их ансамбли. М.: ГЕОС, 1997. С. 161-163.
11. Соловьев А.В., Шапиро М.Н., Гарвер Д.И. Оценка скорости формирования коллизионного надвига по данным изотопного датирования (Лесновский надвиг, Северная Камчатка) // Тектоника Неогена: общие и региональные аспекты. Т.2. М.: ГЕОС, 2001. С. 211-214.
12. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Ижевск: Удмуртский университет, 2001. С. 302-305.
13. Ben-Avraham Z., Nur A., Jones D., Cox A. Continental accretion: from oceanic plateaus to allochthonous terranes // Science. 1981. V.213. P. 47-54.
14. Fujita K., Newberry T. Accretionary Terranes and tectonic evolution of Northeast Siberia // Accretion tectonics in the Circum-Pacific region. M.Hahimoto, S.Uyeda – eds. Tokyo, 1983. P. 43-57.
15. Geographic Information System (GIS) Compilation of Geophysical, Geologic and Tectonic Data for Circum-North Pacific. USGS, Open-File Report 99-422. Version 1.0. (CD). 1999.
16. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. The Physics of Granular Materials // Physics Today. 1996. V.4. P. 32-38.
17. Mandelbrot B. The fractal geometry of Nature. San-Francisco, 1983. 461 p.
18. 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. P. 121-142.
19. Moore T. The Arctic Alaska Superterrane // Geologic studies by U.S. Geological Survey. 1991. P. 238-243.
20. Nokleberg W.J., Parfenov I.M., Monger J.W.H. et al. Circum-North Pacific tectonostratigraphic terrane map. USGS, Open-File Report 94-714, Pamphlet. 1994. 221 p.
21. 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 // Geophys. J. Int. 1997. V.130. P. 606-622.
22. Summary terrane, mineral deposit, and metallogenic belt maps of the Russian Far East, Alaska and Canadian Cordillera. USGS Open-File Report 98-136 (CD). 1998.
23. Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge: University Press, 1997. 398 p.