

На правах рукописи



ЗАХАРОВ Владимир Сергеевич

**САМОПОДОБИЕ СТРУКТУР И ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ФРАКТАЛЬНОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Специальность 25.00.03 – геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва

2014

Работа выполнена на кафедре динамической геологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, профессор, декан Геологического факультета Воронежского государственного университета
Ненахов Виктор Миронович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН
Родкин Михаил Владимирович

доктор геолого-минералогических наук
главный научный сотрудник
Геофизического центра РАН
Родников Александр Георгиевич

Ведущая организация: Казанский (Приволжский) Федеральный университет, г. Казань

Защита состоится 25 апреля 2014 г. в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д.051.001.39 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет, сектор «А», ауд. 415.

Автореферат размещен на интернет-сайтах Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова www.geo.web.ru и Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru. С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, в Отделе диссертаций Фундаментальной библиотеки по адресу: Ломоносовский проспект, 27.

Автореферат разослан 25 февраля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геол.-мин. наук, профессор



А.Г. Рябухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Согласно современным представлениям, литосфера – структурированная, иерархическая (многоуровневая), самоподобная, грубо дискретная среда [Садовский, Писаренко, 1991]. Это проявляется как в геолого-геоморфологических характеристиках, так и в различных геофизических полях, а также в вещественно-структурных характеристиках среды.

Со структурой неоднородной геологической среды самым тесным образом соотносится сейсмический процесс. Самоподобные свойства сейсмического процесса и среды, в которой он протекает, выражаются в степенном характере законов распределения вида:

$$N = x^a, \quad (1)$$

где x – характеристика объекта (размер, сила, энергия и т. п.), N – количество объектов, a – показатель, характеризующий степень самоподобия.

Закон такого вида справедлив для распределений блоков и разломов по размерам, пространственного распределения очагов землетрясений, распределения землетрясений по магнитудам (закон Гутенберга-Рихтера), распределения количества афтершоков сильных землетрясений во времени (закон Омори). Самоподобные свойства сейсмотектонического процесса проявляются также в динамических характеристиках порождаемых им временных рядов.

В настоящее время в науки о Земле активно внедряются подходы теории динамических систем, фракталов, катастроф, самоорганизации, синергетики, радикально изменившие представления о соотношениях упорядоченности и хаотичности, предсказуемости и непредсказуемости, стационарности и катастрофичности [Горяинов, Иванюк, 2001; Лукк и др., 1996; Нелинейная геодинамика, 1994; Писаренко, Родкин, 2007; Fractals and Dynamic..., 1994; Turcotte, 1997; многие другие].

Опубликовано большое количество работ, посвященных фрактальному и динамическому анализу в сейсмотектонике, геодинамике, геофизике, геоморфологии и т. д. В значительной степени в них просто фиксируются свойства самоподобия для разных объектов и процессов. В то же время на основании результатов такого анализа можно делать важные заключения о типе рассмотренных систем, в частности, сейсмотектонических, с точки зрения регулярности и прогнозируемости их динамики.

Диссертация направлена на решение важной научной проблемы – определения принципиальных возможностей и ограничений прогноза состояния и динамики геологических систем.

Цель работы: выявление самоподобных свойств структур литосферы и процессов, происходящих в ней (сейсмичность, современные движения), на основании фрактального и динамического анализа и связи их количественных характеристик с геодинамикой, тектоникой и особенностями сейсмического режима, а также предложение их возможных механизмов и моделей.

Задачи исследования предполагают рассмотрение и анализ разномасштабных структур и процессов в литосфере и включают:

- Изучение проявлений самоподобия структур литосферы в широком диапазоне масштабов на основании анализа законов распределения по размерам и фрактальных характеристик размерности плит, континентов, блоков, террейнов.
- Изучение блочности земной коры и литосферы в целом на разных масштабных уровнях по данным GPS, выявление блоков и их относительного движения в областях новейшей тектоники на основании разработанных методов, рассмотрение их согласованности с сейсмотектоникой, геофизическими данными и предложенными моделями блоковой динамики.
- Анализ самоподобных характеристик сейсмотектонического процесса, выражающихся в параметрах степенных законов (закона Гутенберга–Рихтера, закона Омори, фрактальных распределений очагов землетрясений и разломов) и динамических характеристиках временных рядов (фрактальная размерность D , показатель Херста H , скейлинговый спектральный параметр β) сейсмичности, их согласованности и возможных интерпретаций.
- Изучение особенностей и возможных механизмов генерации субвертикальных кластеров очагов землетрясений (*сейсмических «гвоздей»*) на основании анализа их пространственно-временных характеристик.
- Изучение мелкомасштабных современных движений земной коры на основании анализа временных рядов смещений GPS, определение динамических свойств этих рядов и их связи с сейсмотектоническими особенностями районов расположения пунктов наблюдений и предлагаемыми моделями блоковой динамики.
- Построение новых блоковых моделей сейсмотектонических систем с типичным законом трения, изучение свойств этих моделей, их применение для описания разломно-блоковой структуры и взаимодействий в литосфере с учетом ее реологической и тектонической расслоенности.

Фактический материал: геологические карты и карты террейнов северного обрамления Тихого океана; карты активных разломов различных регионов (Евразия, Япония, США); сейсмические каталоги: Национального центра информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC PDE); Японского метеорологического агентства (JMA); Южно-Калифорнийского (SCEDC) и Северо-Калифорнийского (NCEDC) центров данных по землетрясениям, каталог Камчатского филиала Геофизической службы РАН; данные по скоростям пунктов GPS в Эгейско-Анатолийском регионе и Южной Калифорнии, данные по смещениям пунктов GPS в Японии; по временным рядам смещений пунктов GPS. Используются также база данных Глобальной программы вулканизма (GVP), данные по магнитным и гравитационным аномалиям различных регионов.

Методы исследований. Анализ и научное обобщение результатов теоретических исследований взаимосвязи разломно-блоковой структуры среды, современных тектонических движений и сейсмического процесса; фрактальный анализ геолого-геофизических данных; исследование параметров степенных законов распределений объектов по размерам, времени, энергии; анализ временных рядов методами, разработанными в теории динамических систем (*динамический анализ*); построение дискретных кинематических моделей по данным GPS; построение блоковых моделей сеймотектонических систем; сопоставление полученных при анализе количественных характеристик с геолого-геофизической информацией.

Научная новизна

- Впервые установлено самоподобие форм и размеров континентальных структур от суперконтинентов до террейнов, что согласуется с иерархией литосферы от крупных литосферных плит до мелких блоков земной коры. Небольшая величина вариации фрактальной размерности террейнов говорит об их малой деформируемости (*жесткости*) и о единстве механизмов объединения и распада.
- Разработаны оригинальные методики построения дискретных кинематических моделей и выделения жестких блоков земной коры по данным GPS; они применены, с учетом геолого-геофизической информации, к анализу отдельных регионов в областях молодой тектоники. На основании этого впервые выявлено сложное блоковое строение исследуемых регионов на более мелком масштабном уровне.
- Установлено на новом материале с применением усовершенствованных методик, что разломно-блоковая структура литосферы и пространственная структура распределения эпицентров землетрясений подчиняются одинаковым соотношениям самоподобия. Соотношение параметров распределения землетрясений по магнитудам и фрактальной размерности сетей активных разломов количественно подтверждает согласованные самоподобные свойства сеймотектонического процесса.
- Выявлено длительное (до года после главного события) пониженное значение параметра в законе Гутенберга-Рихтера в зонах эпицентров сильных землетрясений с последующим его повышением, что является проявлением перераспределения разрушения в афтершоковых процессах от больших масштабов к меньшим.
- Показана роль флюидов как наиболее вероятного механизма генерации сейсмических «гвоздей», не связанного явно с сильными землетрясениями, вулканами и тектоническими структурами.
- Впервые показана закономерная связь динамических характеристик временных рядов GPS с геотектоническими и геодинамическими особенностями регионов (сейсмичность и жесткость блоков).
- Впервые установлено, что временные ряды выделения сейсмической энергии и ряды GPS относятся к классу фликкер-шума (шума

перемежаемости), что указывает на возможность резких непредсказуемых изменений режима и возникновения быстрых катастрофических событий.

- Показана обоснованность применения теоретических соотношений между динамическими характеристиками временных рядов (β , D и H) при оценке фрактальных характеристик природных геофизических временных рядов (ряды GPS, ряды выделения сейсмической энергии).
- Предложены новые варианты моделей блоковой динамики, базирующиеся на типичных законах трения, которые порождают детерминированный хаос, катастрофы и степенные распределения характеристик в сеймотектонических системах. Показано, что разломно-блоковая структура литосферы с учетом ее реологической расслоенности должна рассматриваться как динамическая характеристика.

Личный вклад автора состоит в практической реализации фрактального и динамического анализа всех перечисленных выше структур и процессов в литосфере. Автор принимал активное участие в изучении самоподобия форм и размеров континентальных структур от суперконтинентов до террейнов (совместно с В.Н. Вадковским, С.Д. Соколовым), в разработке методик построения дискретных кинематических моделей и выделения жестких блоков коры по данным GPS и их применении для анализа блоковой структуры ряда регионов (совместно с Д.А. Симоновым), в анализе и предложении механизмов генерации сейсмических «гвоздей» (совместно с В.Н. Вадковским). Автором лично проводил фрактальный анализ сейсмичности и сетей разломов, анализ динамических характеристик временных рядов выделения сейсмической энергии и рядов GPS, для чего разработал специализированное программное обеспечение. Во всех исследованиях автор являлся инициатором их постановки, а также интерпретировал полученные результаты и делал выводы.

Основные защищаемые положения

1. Доказано и продемонстрировано самоподобие структур литосферы от суперконтинентов до отдельных террейнов и мелких блоков земной коры, что является следствием процессов самоорганизации при образовании, движении и распаде литосферных структур. Это согласуется с иерархией блоковой делимости литосферы, и, с учетом ее реологической расслоенности, обуславливает возможность сходного блокового поведения на разных масштабах.
2. Выявлено разномасштабное блоковое строение земной коры в областях новейшей тектоники на основании оригинального анализа данных GPS. Выделенные блоки совершают взаимные перемещения, их границы проявлены в особенностях расположения и ориентировки элементов рельефа, разрывных нарушений, очагов землетрясений, гравитационных аномалий и других данных.
3. Установлено, что динамика сеймотектонических систем на разных пространственно-временных масштабах порождает согласованное самоподобие разломообразования, сейсмического процесса и современных тектонических движений. Это проявляется в параметрах степенных законов распределений характеристик сеймотектонического процесса в

пространстве, во времени, по энергии и в динамических характеристиках порождаемых им временных рядов (смещений пунктов GPS, выделения сейсмической энергии).

4. Доказано, что сеймотектонические системы принадлежат к классу систем с самоорганизованной критичностью, в которых реализуется детерминировано-хаотическое поведение с непредсказуемостью конкретной динамики и катастроф (землетрясений, оползней и т. д.). Эти фундаментальные свойства объяснены моделями блоковой динамики с нелинейным трением, демонстрирующими главные особенности сеймотектонического процесса.

Научное и практическое значение

- На новом материале с применением усовершенствованных методик подтверждено понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции сеймотектонической системы к состоянию самоорганизованной критичности, в котором невозможен реальный прогноз динамики и катастроф.
- Рассмотрение разломно-блоковой структуры литосферы как иерархической динамической характеристики должно учитываться при моделировании геотектонических структур и процессов.
- Результаты выделения блоков земной коры по данным GPS могут использоваться в качестве дополнительной информации при определении сейсмической опасности: относительная неподвижность бортов активного разлома свидетельствует о накоплении напряжений на данном участке и возможности здесь сильного землетрясения.
- Модели блоковой динамики с типичным законом трения использованы для описания особенностей сейсмогенного оползнеобразования при выполнении работ по госконтракту № 02.515.11.5093 с Роснаукой «Изучение и моделирование механизмов возникновения катастрофических скальных оползней для разработки технологии комплексного определения оползневой и сейсмической опасности горных районов России».
- Теоретические разработки и фактические данные, изложенные в работе, используются в учебных курсах «Динамические системы и фракталы в геологии», «Компьютерное моделирование в геодинамике», «Физика Земли», которые автор читает на Геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова, а также при подготовке магистрантов и аспирантов кафедры динамической геологии. Полученные результаты могут быть использованы в учебных курсах по геотектонике, геодинамике, сеймотектонике.
- Применение фрактального анализа при исследовании эрозионных систем (таких, как псевдокарст) дает возможность описать их морфологию, проследить динамику фрактальных поверхностей как характеристики степени геологического риска [Лаврусевич и др., 2013].

Апробация работы. Отдельные части диссертационной работы докладывались на международных и российских конференциях и совещаниях:

XXII General Assembly IUGG, 1999; 25th General Assembly of the EGS, 2000; 25th General Assembly of the EGS, 2001; EGU General Assembly, 2012; III Всесоюзном Симпозиуме «Экспериментальная тектоника в решении задач теоретической и практической геологии», 1991 г.; 6-ой и 7-ой международной конференции по тектонике плит им Л.П. Зоненшайна, 1998 и 2001 гг.; семинаре «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород», 2001; 4-х и 5-х Геофизических чтениях им В.И. Федынского, 2002, 2003 гг.; I, II, III Яншинских чтениях, 2001, 2002, 2003 гг.; Международном междисциплинарном симпозиуме «Фракталы и прикладная синергетика» ФиПС-03, 2003 г.; Междисциплинарном симпозиуме ФиПС-08 «Прикладная синергетика в нанотехнологиях», 2008 г.; научной конференции «Ломоносовские чтения», 1995–1997, 2003, 2008, 2010–2013 гг.; XXXII, XXXIII, XXXV, XXXVI, XXXIX, XLI, XLIII тектоническом совещании, 1999, 2000, 2002, 2003, 2006, 2008, 2010 гг.; международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина, 2011 г.; XVII Международной конференции «Проблемы сейсмотектоники», 2011 г.; конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», 2012 г.; на заседаниях кафедры динамической геологии в 2012 и 2013 гг.; на семинаре ИТПЗ РАН в 2013 г., на семинаре ИДГ РАН в 2013 г.

Публикации. Результаты исследований, а также основные защищаемые положения и выводы изложены в 57 публикациях. Среди них 2 коллективные монографии, 15 статей в журналах из списка ВАК, 3 статьи в других российских журналах, 23 статьи в сборниках и материалах конференций, 14 тезисов конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы – 281 страница, в ней содержится 187 рисунков, 9 таблиц, список литературы состоит из 479 наименований.

Благодарности

Автор посвящает эту работу памяти своего учителя и старшего друга, замечательного ученого и преподавателя Всеволода Николаевича Вадковского[†].

Автор глубоко благодарен профессору Н.В. Короновскому, при всесторонней поддержке которого выполнялась эта работа.

Автор весьма признателен сотрудникам кафедры динамической геологии и Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, без поддержки и помощи которых эта работа не могла быть выполнена: проф. Н.А. Божко, д.г.-м.н. М.А. Гончарову, проф. Е.П. Дубинину, проф. М.Г. Ломизе, проф. Н.В. Лубниной, доц. Г.В. Брянцевой, к.г.-м.н. Р.В. Веселовскому, к.г.-м.н. В.Ю. Водовозову, к.г.-м.н. В.А. Зайцеву, доц. Д.И. Панову, к.г.-м.н. Д.А. Симонову.

Автор очень благодарен к.г.-м.н. А.А. Наймарку и к.г.-м.н. А.И. Полетаеву за весьма ценные советы, замечания и редакторскую правку при написании работы.

Автор признателен коллегам проф. Ю.А. Морозову, проф. Е.А. Рогожину, к.г.-м.н. Л.И. Иогансон, к.г.-м.н. Ю.В. Нечаеву[†], к.ф.-м.н. В.Б. Смирнову, за содействие и помощь в исследованиях.

В работе над диссертацией использованы информационные ресурсы ГЦ РАН, которые были предоставлены автору директором МЦД по физике твердой Земли к.ф.-м.н. Н.А. Сергеевой, которая также помогала советами и редакторской правкой при написании текста, за что автор очень благодарен.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении изложены актуальность проблемы, цели и задачи исследований, обосновывается применение используемого подхода. Сформулированы основные защищаемые положения и определена общая структура диссертации.

ГЛАВА 1. Самоподобные свойства структур и процессов в литосфере: состояние проблемы и методы анализа

1.1 Дискретность и самоподобие делимости литосферы Земли

В соответствии с современной тектоникой плит [Хаин, Ломизе, 2005], литосфера разделена на ограниченное число плит, среди которых выделяются плиты трех порядков: крупные (мегаплиты), средние (мезоплиты) и малые (микроплиты). Мегаплит обычно выделяют 7, а вот количество, размеры, конфигурация и кинематика мезо- и особенно микроплит остается дискуссионным вопросом. Решение этих вопросов в значительной степени может быть получено посредством фрактального анализа структур литосферы, что является одной из целей настоящей работы.

Вывод о самоподобной иерархии блоковой делимости Земли был сделан в большом количестве работ [Гольдин, 2002; Горяинов, Иванюк, 2001; Красный, 1984; Шерман, 1977, 2012; Садовский, Писаренко, 1991; Turcotte, 1997; многие другие]. *Блоком* считается часть геологической структуры, ограниченная разрывами разного типа и масштаба. Делимость практически не зависит ни от физико-химических свойств породы, ни от способа образования и проявляется в широком диапазоне масштабов от зерен до плит. В общем виде закон делимости описывается степенным соотношением вида

$$N \sim L^{-\alpha}, \quad (2)$$

где N – количество блоков; L – их размер; α – параметр распределения.

Количественное описание самоподобия литосферы от плит до блоков, и континентальных структур от (супер)континентов до террейнов проводится в главе 2.

1.2 Применение данных GPS для определения конфигурации и относительных движений плит и блоков

Блоковая иерархическая структура литосферы и кинематика блоков определяются, в частности, на основании анализа данных Глобальной системы позиционирования (GPS). В результате применения особых технологий (режим DGPS, система WAAS), а также специальной обработки относительные координаты пунктов GPS определяются в настоящее время с точностью менее 1 см.

По данным GPS можно судить о конфигурации и кинематике микроплит и блоков земной коры меньшего размера в пределах плит, которые ранее

считались «жесткими». Стандартных методов тут не существует, поэтому их разработка и применение является актуальным направлением исследований. Обсуждение этой проблемы, предлагаемые нами методы, примеры их применения для выявления более детальной блоковой структуры и кинематики ряда регионов на меньшем масштабном уровне приводится в главе 3.

1.3 Понятие фрактала и фрактальной размерности

Поскольку литосфера – иерархическая, самоподобная, грубо дискретная среда, то для её исследования нами применяются подходы, которые разработаны в теории *фракталов* и теории *динамических систем* [Мандельброт, 2002; Шредер, 2001]. Появление этих подходов дает новое приближение для описания сложных объектов, позволяет ввести количественные характеристики для самоподобия, представление о котором на качественном уровне давно вошло в науки о Земле.

Фрактал – объект, который обладает *масштабной инвариантностью*, или *скейлингом* (*scaling*), каждая часть которого подобна целому. Количественной мерой является *фрактальная размерность* D – показатель в степенном законе

$$N \sim r^{-D}, \quad (3)$$

где r – масштаб рассмотрения, N – количество уменьшенных копий, необходимое для заполнения исходного объекта.

Фрактальная размерность характеризует самоподобие рассматриваемой иерархической совокупности объектов и степень сложности структуры. Однородный степенной закон указывает на то, что механизм процессов, формирующих данную структуру или объект, одинаков на разных масштабах. Кусочный степенной закон указывает на то, что возможна смена механизма.

В настоящей работе применение фрактального анализа для исследования характеристик сейсмичности, сетей активных разломов, террейнов дает количественную меру сопоставления взаимосвязанных объектов или процессов, как правило, имеющих неодинаковое время формирования и/или характеризующихся различными физическими величинами.

1.4 Самоподобие разломной сети

Самоподобие разломной сети выражается в степенных законах, связывающих различные характеристики разломных структур [Шерман, 2012; Turcotte, 1997; Wilson, 2001; многие другие]. Степенные законы распределения вида (2) установлены для длин разломов (и других разрывных нарушений), величин смещений по разломам, для ширины разломных зон и для среднего расстояния между разломами. Эти зависимости описывают разломно-блоковую делимость литосферы и установлены для разрывных нарушений разных типов, в различных регионах, различных геодинамических обстановках и в широком диапазоне масштабов.

1.5 Самоподобие сейсмического процесса

Сейсмический режим (*процесс*) – совокупность землетрясений, которые рассматриваются как точки в координатах пространство-время, снабженные параметром энергии [Касахара, 1985]. Самоподобные (фрактальные) свойства

сейсмического режима проявляются в его пространственно-временных характеристиках в виде степенных законов [Касахара, 1985; Turcotte, 1997].

Закон Гутенберга-Рихтера для распределения количества N землетрясений по *магнитудам* M имеет вид:

$$\lg N = -bM + a, \quad (4)$$

где a и b – эмпирические параметры. Поскольку магнитуда пропорциональна логарифму энергии E землетрясения, то распределение землетрясений по энергиям имеет степенной вид

$$N \sim E^{-k}. \quad (5)$$

Закон Омори описывает уменьшение количества афтершоков сильных землетрясений в единицу времени $n(t)$:

$$n(t) = \frac{K}{(c+t)^p}, \quad (6)$$

где p – параметр, характеризующий скорость спадания [Utsu et al., 1995]. Наблюдается также процесс степенного роста количества афтершоков перед сильным землетрясением [Рогожин и др., 2011; Scholz, 2002].

Пространственная структура поля очагов землетрясений имеет фрактальный характер, что установлено при анализе современных каталогов землетрясений для различных регионов [Кейлис-Борок и др., 1989; Садовский, Писаренко, 1991; Стаховский, 2007; Main, 1996; Molchan, Kronrod, 2009; многие другие].

Землетрясения – это не только события, происходящие в существующей структуре разломов, в значительной мере они сами эту структуру формируют. Поэтому актуальным и важным является изучение *сейсмотектонических систем*, под которыми понимаем геологические структуры (активные разломы, дизъюнктивные узлы, разрывные зоны, блоки земной коры), которые порождают связанные тектонические движения и сейсмический процесс. Динамику таких систем называем *сейсмотектоническим процессом*.

Единый характер сейсмотектонического процесса, выражается, в частности, в теоретической связи между величинами фрактальной размерности D сетей разломов и параметра b в (4), которая имеет вид [Aki, 1981]:

$$D = 2b. \quad (7)$$

В нашем исследовании на новом материале с использованием усовершенствованных методик рассматривается согласованность фрактальных характеристик сейсмотектонического процесса (глава 4).

1.6 Методы вычисления фрактальной размерности

В нашей работе используются следующие методы практического определения фрактальных характеристик: вычисление размерности покрытия, корреляционной размерности, размерности, определяемой по соотношению площади и периметра, определения характеристик самоподобия по степенным распределениям [Мандельброт, 2002; Федер, 1991; Шредер, 2001].

Степенное распределение вида (1)–(3) свидетельствует об отсутствии каких-либо выделенных, характерных размеров в совокупности объектов. Понятие *среднего* для таких распределений малоинформативно (а в некоторых

случаях и неприменимо). Не существует «среднего» землетрясения, разлома, блока, реки и т.д. – именно потому, что для них характерны степенные распределения.

1.7 Детерминированный хаос и его свойства

Сейсмотектоническая система является открытой (получает энергию извне) и диссипативной (растрчивает энергию). Для исследования сейсмотектонических процессов мы используем методы анализа, разработанные в теории *динамических систем* [Кузнецов, 2001; Шустер, 1988]. Для открытых диссипативных нелинейных систем установлен особый вид динамики – *детерминированный хаос*, когда хаотическое поведение проявляется без наличия случайного элемента, за счет нелинейного характера и механизма внутренних связей.

В хаотическом режиме динамическая система порождает резкие разномасштабные изменения состояния (*катастрофы*). Для детерминированного хаоса характерны степенные законы распределений. Это означает, что механизм крупномасштабных событий (сильных землетрясений, гигантских оползней и т.п.) тот же, что и для событий той же природы но меньших масштабов. Степенные законы являются «флагом» детерминировано-хаотических систем, а значения их параметров позволяют выявлять свойства этих систем. Фундаментальным основанием для появления степенных законов являются *критические* (на грани стабильности) состояния. Существуют системы, которые поддерживают нахождение в критическом состоянии за счет самоорганизации. В этом случае говорят о *самоорганизованной критичности* (СОК) [Bak et al., 1987].

Нелинейность в диссипативных системах порождает хаотическое динамику. Именно в этом, по нашему мнению, а не в недостаточности наблюдательных данных, главная причина ненадежности, например, сейсмического прогнозирования [Короновский, Наймарк, 2009; Наймарк, Захаров, 2012]. Дело не в том, что механизм подготовки сейсмического события, оползня и т.п. недостаточно изучен; но сам механизм таков, что порождает хаотическое непредсказуемое поведение.

Поэтому особое внимание в нашей работе уделяется рассмотрению динамических характеристик сейсмотектонических систем на основании анализа порождаемых ими временных рядов для определения степени их хаотичности.

1.8 Методы анализа динамических и фрактальных свойств временных рядов

В работах, посвященных анализу временных рядов с позиции теории динамических систем (динамический анализ) убедительно показано, что в «шумовой» составляющей сигналов содержится весьма важная информация о том как сложно построенная нелинейная дискретная геологическая среда реагирует на внешние воздействия [Лукк и др., 1996; Любушин, 2007; Смирнов и др., 2005; Черепанцев, 2007; Gusev, 2010; многие другие].

Нами используются следующие методы анализа динамических и фрактальных свойств временных рядов [Федер, 1991; Шредер, 2001]:

1. Определение параметра самоподобия β спектра. Сигнал с $\beta \approx 1$ называют *фликкер-шумом* (*1/f-шум*). Чем больше величина показателя β , тем более детерминированной является система, генерирующая сигнал.

2. Определение *показателя Херста* (H). Временные ряды с $H > 0.5$ обладают устойчивой тенденцией (*персистентность*), с $H < 0.5$ – характеризуются отсутствием устойчивости (*антиперсистентность*).

3. Определение фрактальной размерности D ряда.

4. Восстановление размерности вложения на основании анализа корреляционной размерности D_c .

Все виды анализа, приведенные в данном разделе, применимы к исследованию, например, стратиграфических записей [Нургалиева, Нургалиев, 2008], и т.п.

1.9 Разработанные программные средства для реализации фрактального и динамического анализа

Для реализации фрактального и динамического анализа разработаны авторские программные средства: программы FrAnGeo для вычисления фрактальной размерности и параметра b и программа FraTiS для фрактального анализа временных рядов.

1.10 Выводы по главе 1

В геодинамике и сейсмо тектонике фрактальный анализ: дает новое приближение для описания сложных объектов на языке математики; позволяет количественно характеризовать понятия «иерархичность» и «самоподобие»; проводить сравнения характеристик сети разломов региона с характеристиками поля очагов землетрясений; использовать параметры степенных законов, характеризующих сейсмический процесс, для выявления изменения сейсмического режима и сопоставления режимов в различных регионах.

Анализ динамических характеристик геолого-геофизических временных рядов позволяет: различить стохастический, детерминированный динамический хаос и регулярное поведение; выявить степень хаотичности системы; исследовать возможности, перспективы и ограничения прогноза динамики сейсмо тектонических систем; на основании этого предложить возможные механизмы функционирования; проводить построение моделей процессов; сопоставлять динамические характеристики систем с сейсмо тектоническими и геодинамическими особенностями регионов.

ГЛАВА 2. Самоподобие структур литосферы от плит до блоков

2.1 Распределение литосферных плит по размерам

Литосферные плиты – тектонические структуры самого большого масштаба, но при этом размеры плит варьируются в широком диапазоне от «мегаплит» до «микроплит». Вопрос о характере распределения по размерам литосферных плит рассматривается в работе [Bird, 2003]. Кумулятивное распределение плит по площади в диапазоне 0.002–1 стерадиан подчиняется степенному закону вида

$$N \sim S^{-\gamma}, \quad (8)$$

где γ – параметр распределения, $\gamma=0.33$. Однако в области малых и больших размеров наблюдаются отклонения от однородного закона.

В работе [Sornette, Pisarenko, 2003] показано, что применение распределения с постоянной суммой позволяет в рамках единого обобщенного степенного закона описать наблюдаемое распределение плит по размерам. Единый степенной закон для распределения плит указывает на самоподобную иерархию плит от самых больших до самых маленьких размеров.

2.2 Аккреционная тектоника и фрактальные характеристики террейнов

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

В широком смысле *террейны* – геологические тела, отделенные выраженной тектонической границей от соседних тел и имеющие отличные от них литолого-стратиграфическое строение, генезис и историю [Moore, 1992; Nokleberg et al., 1994]. Некоторые из них представляют собой реликты океанической коры (офиолиты) и ее неоднородности (вулканические острова, поднятия), другие представлены континентальными структурами (микроконтиненты, осколки кратонов) или сформировались в процессе субдукции (аккреционные призмы, островные дуги) [Соколов, 1992, 2003]. В работе [Зоненшайн, Кузьмин, 1992] подчеркивается условность разграничения понятий «микроконтиненты» и «террейны», то есть, объективных критериев для такого разделения не существует. В известной мере, неопределенность термина «террейн» отражает сложность и разнообразие аккреционной тектоники и процесса формирования активных окраин.

Для анализа самоподобных свойств террейнов использовались ГИС-проекты, объединяющие геологические, геофизические и тектонические данные для северного обрамления Тихого океана (рис. 1) [Geographic..., 1999]. Для Аляски и северо-западной Канады приводятся также более детальные базы данных, которые в нашей работе анализируются отдельно.

В результате установлены степенные законы распределения по размерам и самоподобие форм террейнов в широком диапазоне размеров [Вадковский и др., 2003; Захаров, Вадковский, 2013]. На рис. 2а показано частотное распределение количества террейнов по величине площади в двойном логарифмическом масштабе. Это распределение существенно отличается от нормального и имеет степенной характер вида (8) в диапазоне более двух порядков по величине площади. Для периметра характер распределения аналогичный.

Такие характеристики распределения свидетельствуют об отсутствии каких-либо выделенных, характерных размеров в совокупности террейнов: образуются террейны всех размеров, и «среднего» террейна не существует.

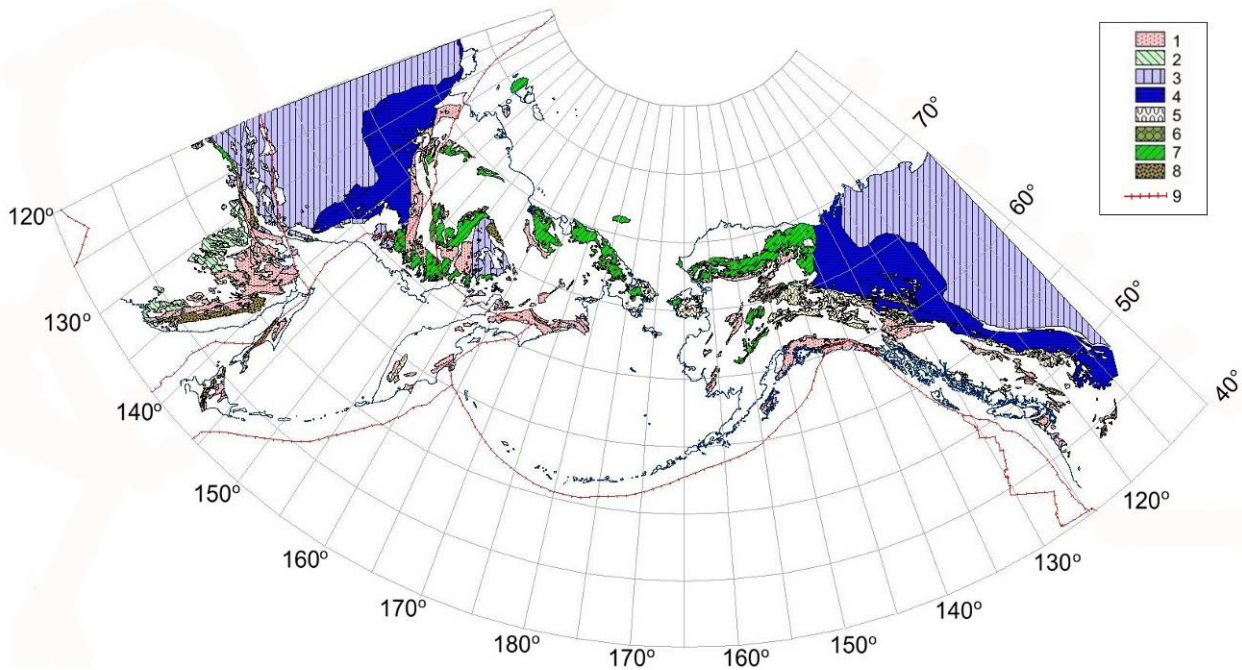


Рис. 1. Упрощенная схема террейнов северного обрамления Тихого океана, по [Geographic..., 1999]. 1–аккреционная призма; 2–окраинно-континентальный пояс; 3–кратон; 4–окраина кратона; 5–метаморфический комплекс; 6–океаническая кора, офиолиты, подводные горы; 7–пассивная континентальная окраина; 8–турбидитовый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

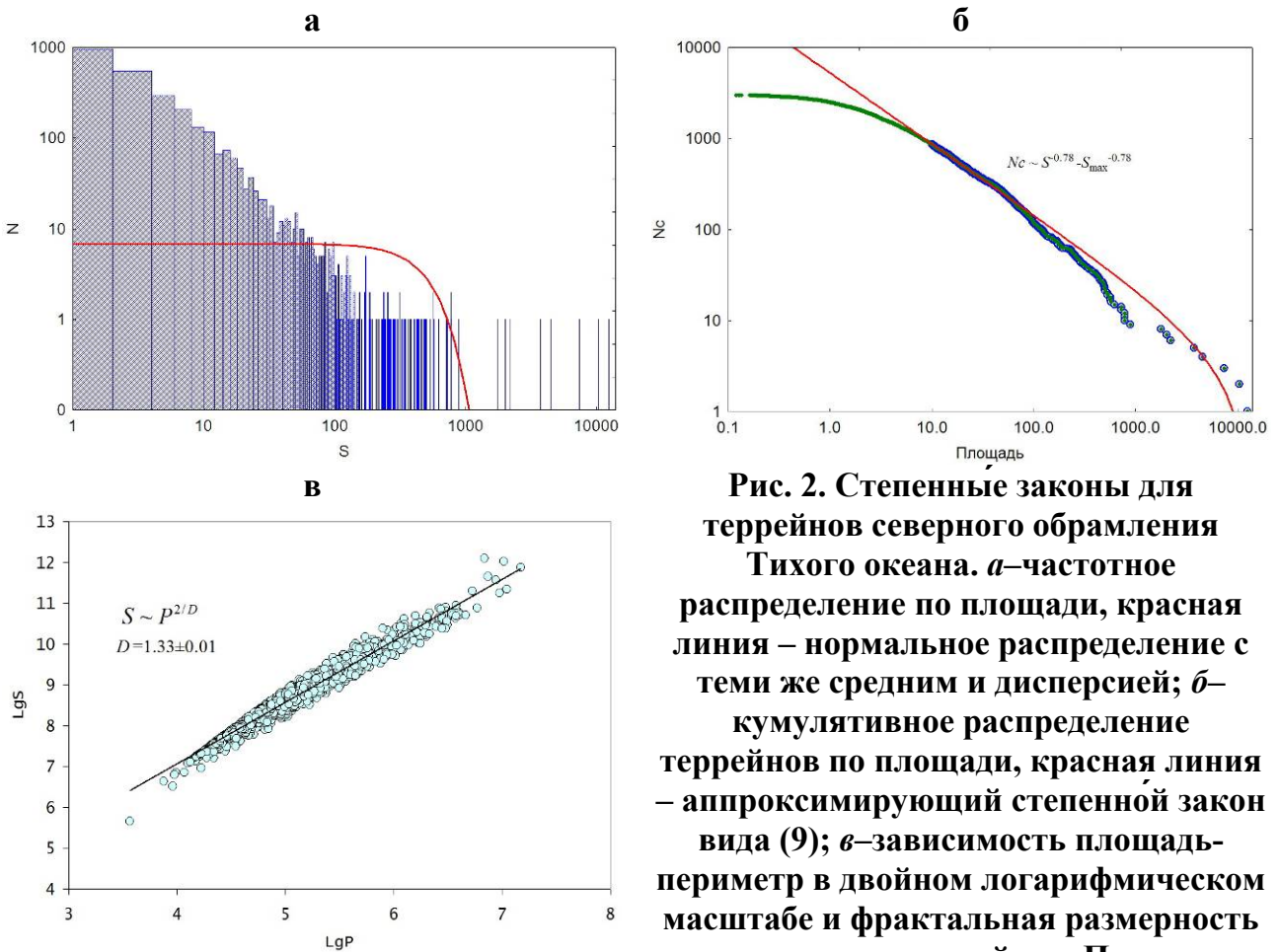


Рис. 2. Степенные законы для террейнов северного обрамления Тихого океана. а–частотное распределение по площади, красная линия – нормальное распределение с теми же средним и дисперсией; б–кумулятивное распределение террейнов по площади, красная линия – аппроксимирующий степенной закон вида (9); в–зависимость площадь-периметр в двойном логарифмическом масштабе и фрактальная размерность для множества террейнов. Площадь и периметр – в условных единицах.

Кумулятивное распределение террейнов по площади для исследуемых районов представлено на рис. 2б. Применение степенного распределения по площади с максимальным элементом S_{\max} позволяет описать исследуемую совокупность однородной степенной зависимостью

$$N_C \sim S^{-\alpha} - S_{\max}^{-\alpha}. \quad (9)$$

Это указывает на определенное единство процесса формирования и эволюции террейнов в широком диапазоне размеров [Захаров, Вадковский, 2013].

Параметр α в законе (9) 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 $\alpha = 0.69 \pm 0.01$.

Для характеристики сложности форм и изрезанности границ множества террейнов использовалась фрактальная размерность. Поскольку мы анализируем совокупность террейнов, плотно заполняющих поверхность, подобно фрактальной «плитке», то вычислялась размерность, определяемая по соотношению площади и периметра:

$$S \sim P^{2/D}, \quad (10)$$

Рассчитанная по соотношению (10) фрактальная размерность составляет для северного обрамления Тихого океана $D = 1.33 \pm 0.01$ (рис. 2в), для Аляски $D = 1.30 \pm 0.01$, для северо-западной Канады $D = 1.24 \pm 0.01$.

В ходе работы были определены вариации фрактальной размерности террейнов в зависимости от их типа и времени приращения к активной окраине. 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.

Установлено, что фрактальная размерность слабо изменяется в зависимости от времени приращения и выделяемые рубежи формирования активной окраины 145, 80–60, 43, 15 млн. лет [Соколов, 1997; Fujita et al., 1983; Maquyama et al., 1997] не проявляется в изменении фрактальной размерности множеств террейнов соответствующего возраста. Это отражает малую степень деформирования террейнов в процессе аккреции и свидетельствует об их малой деформируемости (*жесткости*) во всех диапазонах размеров.

Не только современные активные окраины, но и древние мега- и суперконтиненты представляют собой совокупность террейнов разного происхождения, размера и возраста. При палеогеодинамических и палеомагнитных реконструкциях древних суперконтинентов используются блоки и террейны различного возраста и происхождения. В частности, в работе [Evans et al., 2013] при реконструкции суперконтинента Нуна (Колумбия) использовано около 700 террейнов и блоков, выделяемых по геологическим и геофизическим данным.

Многие из этих блоков и террейнов, особенно крупные, в свою очередь, не являются целыми, а образовались из более мелких единиц путем их объединения. В ходе развития суперконтинентальных циклов происходило дробление суперконтинентов на блоки меньших размеров, которые

перемещались друг относительно от друга, а затем объединялись в иной конфигурации в новые мега- и суперконтиненты вплоть до Пангеи в позднем палеозое [Божко, 2009]. Современные континенты, таким образом, тоже представляют собой совокупность блоков и террейнов разного размера, возраста, происхождения и истории.

В результате нашего анализа установлено, что континенты и крупные ($S \geq 1000 \text{ км}^2$) острова также подчиняются единым степенным законам вида (8)–(10) и характеризуются близкими значениями фрактальной размерности $D = 1.20 \pm 0.03$.

Это указывает на отсутствие каких-либо выделенных характерных размеров, которые можно было бы использовать для классификации террейнов, супертеррейнов, микроконтинентов, континентов по размерам, а, кроме того, свидетельствует о едином механизме объединения тектонических единиц различных размеров и происхождения.

2.3 Проявления разломно-блоковой делимости литосферы

Иерархически самоподобное разломно-блоковое строение литосферы выявляется разными методами. На основании анализа различных геолого-геофизических данных: гравитационных и магнитных аномалий, скоростей сейсмических волн, распределения очагов землетрясений, плотностных моделей, космоснимков, геологических карт, рельефа, и т.д. [Горшков, 2011; Краснопевцева, Щукин, 1996; Нечаев, 2010; Петров, 2013; многие другие] показан разномасштабный (разнопорядковый, иерархический) характер делимости литосферы на блоки, которые контактируют и взаимодействуют по разнотипным подвижным зонам [Адушкин 2001; Гатинский и др., 2005; Гольдин 2002; Красный, 1984; Семинский, 2012; Уломов, 1999; многие другие].

Развиваемый нами подход состоит в следующем. Глобальная (плито)тектоническая динамика и взаимодействие плит вызывает возникновение внутриплитных напряжений. При превышении пределов прочности происходит разрушение среды по упруго-хрупкому механизму или вязко-пластическому механизму. Вследствие природы такого разрушения образующиеся структуры (блоки и разломы) обладают фрактальными свойствами [Макаров, 2004] в широком диапазоне масштабов.

2.4 Реологическая расслоенность литосферы и самоподобие блоковой структуры

Нижние границы блоков и глубина проникновения разломов определяются горизонтальными зонами расслоения литосферы [Садовский и др., 1987]. Поэтому важной физической основой развиваемой в работе модели строения и динамики литосферы является *реологическая расслоенность* (чередование упруго-хрупких и пластических слоев) [Ranalli, Murphy, 1987; другие]. Установлено наличие ослабленных слоев (астенослоев) в нижней коре и, возможно, в средней коре, которые могут проявляться по-разному в разных геодинамических условиях (сжатие или растяжение, скорости деформации, тепловой режим). Детальные геолого-геофизические исследования позволяют выявить еще более тонкую структуру расслоенности литосферы и (особенно)

земной коры [Левин и др., 2009; Павленкова, 1996; Шевченко, Каплун, 2007; другие].

Реологическая расслоенность литосферы является предпосылкой *тектонической расслоенности* (субгоризонтального движения слоев и пластин литосферы с различной скоростью) [Книппер, Руженцев, 1977; Леонов, 1997; Пейве и др., 1983]. Подобный подход использовался нами при построении моделей динамики двухъярусной литосферы при континентальной коллизии [Захаров, 1999, 2000; Лобковский и др., 1991].

Таких ярусов, которые могут совершать относительные движения по астенослоям (ослабленным слоям) разного масштаба и положения, может быть несколько в зависимости от конкретной тектонической и геодинамической обстановки: литосферные плиты – коровые пластины – верхнекоровые пластины –... Это, в свою очередь, обуславливает возможность самоподобной блоковой структуры и поведения в достаточно широких пространственно-временных масштабах. Для таких блоков–пластин обосновано применение подходов и описаний, принятых для плит, но в меньшем масштабе.

2.5 Выводы по главе 2

Обобщая, можно говорить о принципиальном иерархическом самоподобии структур литосферы от суперконтинентов до отдельных террейнов и мелких блоков земной коры. Такая упорядоченность является результатом самоорганизации при образовании, движениях и распаде континентов вследствие глобальной динамики плит.

Таким образом, геотектоника и геодинамика должны рассматривать динамическую модель, включающую создание, аккрецию, фрагментацию, распад и взаимодействие плит, блоков, континентальных структур, которые могут идти в широком диапазоне пространственно-временных масштабных уровней.

Фрактальность структур и самоорганизация являются фундаментальными свойствами тектоники плит, которые необходимо учитывать при изучении глобальных геодинамических и геотектонических процессов и суперконтинентальных циклов, в частности, при проведении палеогеодинамических реконструкций.

ГЛАВА 3. Блоковая структура земной коры и относительные движения блоков на основании анализа данных GPS

3.1 Модели относительных движений блоков земной коры по данным GPS

За последние годы получены представительные наборы данных GPS, достаточные не только для анализа глобальных движений плит и микроплит, но и для выявления относительных движений блоков меньшего масштаба. Подобный анализ проводится как в геодинамически активных зонах [McClusky et al., 2000; Ашурков, 2011; McCaffrey, 2005; Зубович и др., 2006; Мухамедиев и др., 2006], так и в пределах «стабильных» плит [Malservisi et al., 2013].

Методы, применяемые этими авторами для выделения блоков и определения количественных характеристик блоковых движений, можно

разделить на две группы. Первая отдает предпочтение сложившимся представлениям о геологическом строении региона, которые могут не соответствовать реальной современной, измеряемой по GPS («мгновенной») кинематике. Во второй группе методов выделение блоков проводится главным образом на основании анализа кинематики, однако не учитывает сферичности. Это допустимо при анализе небольших регионов, но при больших масштабах может приводить к значительным ошибкам.

3.2 Методы анализа

В связи с указанными недостатками обеих групп методов нами разработаны собственные методы анализа современных дискретных движений блоков по данным GPS с учетом сферичности Земли. Сначала по набору GPS данных выделяем *кинематически однородные* кластеры, которыми считаем наборы точек (пунктов GPS), по своим скоростям относящихся к единому эйлерову полюсу P , и имеющих одинаковую угловую скорость ω (в пределах заданных ошибок). Одни из разработанных нами методов основаны на переборе с вычислением средних параметров и с отбраковкой точек, не удовлетворяющих заданным критериям. Другие методы включают минимизацию некоторого функционала для нахождения наилучших параметров вращения. Критерием выделения кластеров являлась именно согласованность движения. В качестве жесткого блока такой кластер можно рассматривать после подтверждения (и, при необходимости, корректировки) его границ геолого-геофизическими данными. Для определения относительных движений блоков нами предложен ряд методик, которые можно применять в зависимости от решаемых задач и качества исходных данных.

3.3 Определение блоковой структуры и кинематики земной коры в областях новейшей тектоники

Методы применялись для анализа ряда регионов в областях новейшей тектоники, для которых собрано много данных GPS [Завьялов, Захаров, 2012; Захаров, Симонов, 2010; Захаров и др., 2010; Симонов и др., 2006, 2010].

Для Эгейско-Анатолийского региона анализировались данные GPS из работы [Nyst, Thatcher, 2004], где для описания современной динамики Эгейского региона этими авторами предложена модель с четырьмя микроплитами (рис. 3а). Результаты нашего анализа представлены на рис. 3а,в,г. Выделенные блоки совершают относительные движения (рис. 3б). Границы блоков подтверждаются данными по сейсмичности (рис. 3в) и гравитационным аномалиям региона (рис. 3г). Ряд выделенных нами границ блоков проявляется в вариациях мощности коры, данных сейсмической томографии, данных по электропроводности и другим. Поскольку точные границы блоков на основании анализа только скоростей GPS провести зачастую достаточно трудно, геофизические данные дают возможность уточнения этих границ.

Сопоставление полученной нами схемы блоковой динамики Эгейско-Анатолийского региона с работами предшественников показывает, что нами

выявлено более сложное блоковое строение данного региона на следующем масштабном уровне (рис. 3а).

Реологическая расслоенность литосферы региона [Viti et al., 1997] позволяет рассматривать верхнекоровые блоки как тонкие пластины, способные совершать горизонтальные движения по нижележащим пластичным слоям.

В результате анализа данных GPS для южной Японии (каталог GSI–Geographical Survey Institute) выделено 9 блоков. При уточнении границ блоков привлекалась дополнительная информация: разломы, сейсмичность, гравитационные и магнитные аномалии, а также данные сейсмической томографии. Из-за большого масштаба региона проведенный анализ дает довольно грубую блоковую структуру, которая нуждается в детализации и более тщательном исследовании.

В результате анализа данных для Южной Калифорнии удалось выделить ряд блоков, в основном линейно вытянутых в северо-западном направлении вдоль разлома Сан-Андреас. Кинематика выделенных блоков неплохо согласуется с данными по сейсмичности района. Транспрессионные границы выделенных блоков хорошо совпадают с областями, в которых распространены землетрясения со взбросовыми типами механизма очага. Отметим, что вдоль асейсмичной части разлома Сан-Андреас, на участке между разломами Гарлок и Сан-Джасинто, выделяется область шириной 10–20 км, в пределах которой движение пунктов GPS на обоих крыльях разлома является согласованным. С этой же областью связана значительная положительная гравитационная аномалия, которая указывает, что на данном участке разлом Сан-Андреас «заперт». Эти особенности свидетельствуют о накоплении напряжений на этой части разлома Сан-Андреас, и указывают на возможность здесь сильного землетрясения. Таким образом, результаты нашего анализа могут использоваться в качестве дополнительной информации при определении сейсмической опасности.

3.4 Выводы по главе 3

Предложены методы и разработан инструментарий для создания дискретных кинематических моделей отдельных регионов по данным GPS. Проведенный для ряда регионов анализ показал, что данные GPS можно использовать не только для определения движения плит и микроплит, но и для выявления небольших подвижных блоков, отражающих внутреннюю, дифференциальную кинематику более мелких структурных элементов. Границы блоков проявляются в геолого-геофизической информации (разрывные нарушения, рельеф, сейсмичность и плотность очагов землетрясений, гравитационные аномалии и др.). Эти результаты подтверждают предложенные в данной работе модели разномасштабной иерархической блоковой структуры и процессов в литосфере.

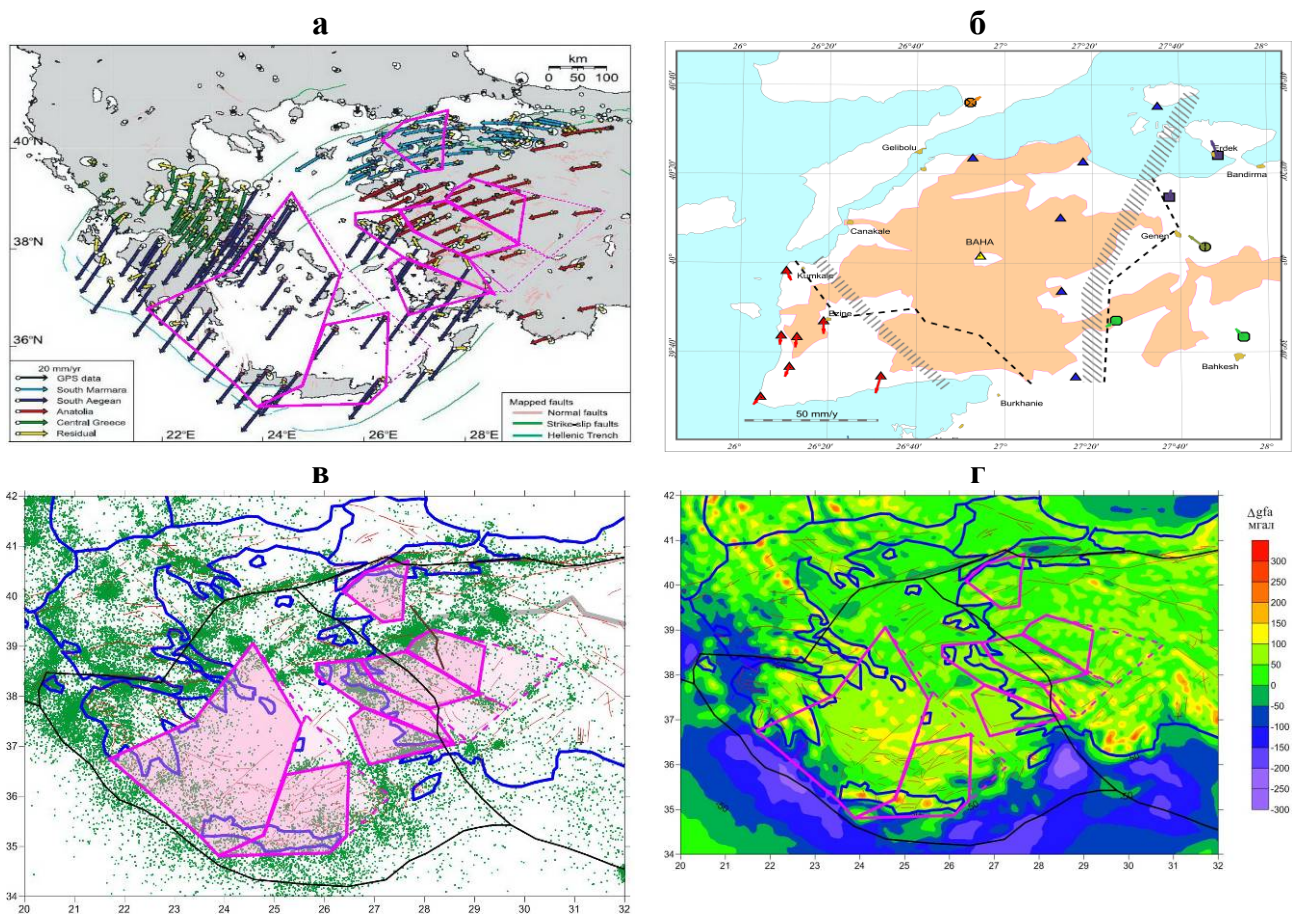


Рис. 3. Результаты анализа данных GPS Эгейско-Анатолийского региона. Сплошными малиновыми линиями показаны выделенные нами границы блоков, пунктиром – их возможные уточнения с учетом геолого-геофизической информации; а–горизонтальные скорости пунктов GPS относительно Евразийской плиты, по [Nyst, Thatcher, 2004]. Разным цветом показаны скорости точек, относящихся к различным микроплитам, выделенным этими авторами; б–границы блока Ваха в северо-западной Анатолии (пунктирные линии) с учетом геолого- геоморфологических данных и скорости относительно движения (стрелки); в–Сейсмичность региона по каталогу NEIC за 1973–2007 гг.; z– гравитационные аномалии в свободном воздухе.

ГЛАВА 4. Фрактальные и динамические характеристики сейсмического процесса

4.1 Характеристики самоподобия сейсмичности и сетей активных разломов

В главе 1 приводится теоретическое соотношение (7), связывающее параметр b в законе Гутенберга-Рихтера (4) с фрактальной размерностью (3) системы разломов D_f . В настоящем разделе соотношение между этими характеристиками, а также фрактальной размерностью пространственного распределения эпицентров D_e рассмотрено на новом материале (на примере Евразии и северной Калифорнии) с использованием новых методик [Захаров, 2008а, 2008в, 2008д, 2011б; Захаров, Савчук, 2008].

В результате нашего исследования получены количественные характеристики самоподобия сейсмического процесса и сетей активных

разломов, с которыми связано его проявление. Это самоподобие проявляется в диапазоне 2–3 порядков пространственных масштабов и единиц магнитуды.

Отметим, прежде всего, близость полученных значений фрактальной размерности сети разломов D_f и эпицентрального поля D_e : $(D_f/D_e)_{cp} \approx 1$ (рис. 4а). Иерархическая структура блоков геологической среды и пространственная структура распределения гипоцентров землетрясений подчиняются одинаковым соотношениям самоподобия. Эти результаты являются количественным свидетельством общей согласованности сейсмического процесса и разломообразования. Фрактальное строение разломных сетей определяет особенности фрактальной пространственно-временной динамики землетрясений и наоборот. Это обстоятельство позволяет изучать структуру среды по свойствам происходящего в ней сейсмического процесса, а именно, оценить некоторые топологические характеристики системы разломов и трещин, которые недоступны непосредственному изучению, по аналогичным характеристикам поля очагов землетрясений.

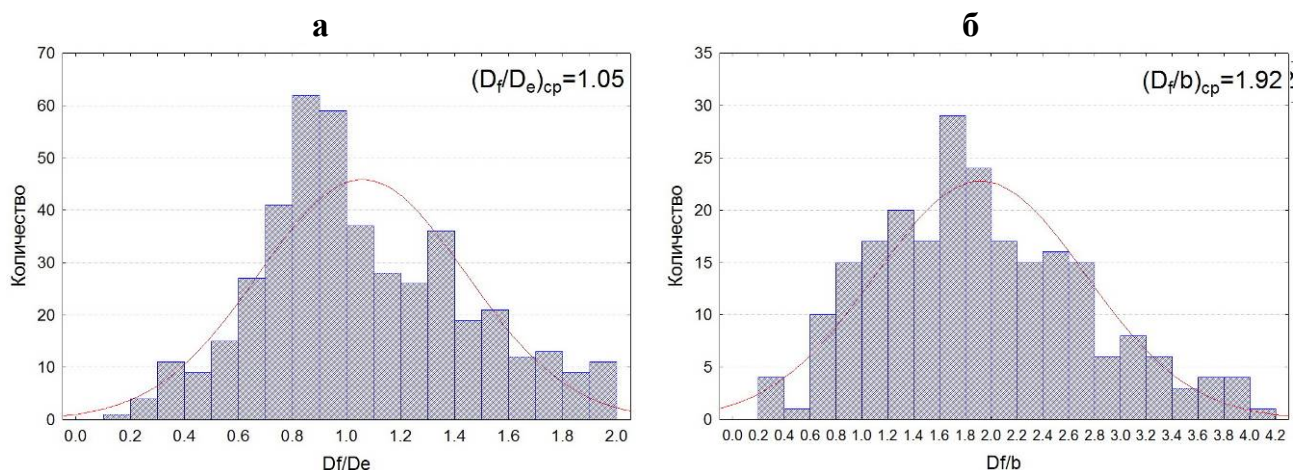


Рис. 4. Соотношение фрактальной размерности сети разломов D_f и эпицентрального поля D_e и параметра b для Евразии: а–гистограмма D_f/D_e , б–гистограмма D_f/b .

Полученные нами соотношения b , D_f и D_e показывают, что приближенно зависимость (7) выполняется (рис. 4б), хотя наблюдаются довольно значительные отклонения. Коэффициент, связывающий D и b варьируется в диапазоне 1.5–2.3, при этом средние значения $(D_f/b)_{cp} = 1.9$, $(D_e/b)_{cp} = 2.04$.

Согласованность распределения магнитуды (и, следовательно, энергии) землетрясений и фрактального распределения размеров разрывных нарушений является количественным свидетельством согласованного самоподобия и самоорганизации сеймотектонического процесса.

Литосфера, как открытая система, в процессе эволюции приходит к состоянию самоорганизованной критичности, для которого характерна иерархическая самоподобная организация неоднородностей (фрактальность) и степенные законы распределения параметров [Садовский, Писаренко, 1991; Turcotte, 1997].

4.2 Динамические и фрактальные характеристики временных рядов выделения сейсмической энергии

Для определения динамических и фрактальных характеристик сейсмотектонической системы нами проведен анализ временных последовательностей выделения сейсмической энергии (на примере каталога JMA за 1992–96 гг.) Для каждого землетрясения осуществлялся пересчет магнитуды в энергию E_s (на основании соотношений для каталога JMA [Kanamori, 2004]), для всех землетрясений, происходивших в течение календарных суток, энергия суммировалась, и таким образом получены временные ряды суточного выделения сейсмической энергии.

В результате проведенного анализа [Захаров, 2008б, 2010а] выявлено, что исследуемые временные ряды проявляют самоподобные свойства в диапазоне более одного порядка по частоте и времени. Установлено, что ряды для малых и средних магнитуд относятся к классу фликкер-шума ($\beta=0.5-1$, $H=0.7-1.1$). Анализ корреляционной размерности D_c также позволил выявить определенную степень детерминизма в исследуемом процессе для средней части диапазона магнитуд. В то же время включение в рассмотрение сильных землетрясений показывает, что такие временные ряды обладают стохастическими свойствами ($\beta \approx 0$, $H \approx 0.5$).

Возможно, это связано с тем, что магнитуды в диапазоне $M=4-5$ определяются с наибольшей точностью, а также с относительно небольшой длиной рассматриваемых рядов. Другое объяснение состоит в том, что при сильном землетрясении происходит коренная перестройка сейсмотектонической системы, при которой она практически «забывает» предыдущие состояния и разрушаются имеющиеся детерминированные связи.

Таким образом, проведенный динамический анализ временных рядов выделения сейсмической энергии позволяет отнести сейсмотектоническую систему, генерирующую землетрясения, к типу детерминировано-хаотических. Динамика таких систем предполагает, что на фоне относительно небольших изменений происходят значительные (на один или несколько порядков больше) скачки, при этом величина этих скачков и промежутки времени, их разделяющие, нерегулярны.

4.3 Анализ афтершоковых последовательностей сильных землетрясений

Нами получены количественные характеристики самоподобия афтершоковой последовательности землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. [Захаров, 2012]: параметр p в законе Омори (6), $p=1.06$, параметр b в законе Гутенберга-Рихтера (4), $b=0.61$ и фрактальную размерность D эпицентрального поля, $D=1.52$. Самоподобие проявляется в диапазоне 2 порядков временных и пространственных масштабов и 4 единиц магнитуды. Получены пространственные вариации параметров b и p . Устойчивость во времени значений параметра p для землетрясения Тохоку указывает на единую афтершоковую последовательность в течение 03–10.2011.

В целом ряде работ [Смирнов, Пономарев, 2004] отмечается, что начальная стадия афтершокового процесса характеризуется пониженными значениями параметра b . Для прояснения этого вопроса нами были проанализированы афтершоки 8 сильных ($M > 8$) землетрясений в различных районах мира (Перу 23.06.2001, $M=8.4$; о.Хоккайдо 25.09.2003, $M=8.3$; Суматра 26.12.2004, $M=9.1$; Суматра 28.03.2005, $M=8.6$; Суматра 12.09.2007, $M=8.5$; о-ва Самоа 29.09.2009, $M=8.1$; Чили 27.02.2010, $M=8.8$; Тохоку 11.03.2011, $M=9.0$).

Анализ выявил пониженное относительно соседних областей значение параметра b в зонах эпицентров сильных землетрясений, которое сохраняется длительное время (до года после события) для 6 из 8 афтершоковых последовательностей. При этом наблюдается также тенденция к постепенному повышению величины b с течением времени.

Такая изменчивость свидетельствует о том, что при релаксации сеймотектонической системы после сильных событий не только уменьшается сейсмическая активность, но и происходит перераспределение процесса разрушения по масштабам. Сразу после главного события процесс разрушения в значительной мере затрагивает относительно большие масштабы, что выражается в сильных событиях. По мере релаксации разрушение постепенно переходит на меньшие масштабы, что выражается в увеличении доли относительно слабых событий и в увеличении параметра b .

4.4 Особенности и механизмы генерации субвертикальных кластеров очагов землетрясений (сейсмических «гвоздей»)

При исследовании В.Н. Вадковским [Вадковский, 1996, 2012] пространственного распределения гипоцентров землетрясений в районе Японских островов были обнаружены почти вертикальные, изометричные в плане скопления гипоцентров землетрясений, которые были им названы сейсмическими «гвоздями». Сходные сейсмофокальные структуры описаны в работе [Шевченко и др., 2011]. При анализе данных различных каталогов землетрясений нами выявлены сейсмические «гвозди» в различных районах мира (тихоокеанское побережье Северной Америки, Камчатка, Японские острова, о. Сулавеси) [Захаров, 2013б; Захаров, Карпенко, 2012; Захаров и др., 2013].

Очаг землетрясения считали точкой с определенными координатами и магнитудой, что оправдано, поскольку сейсмические «гвозди» состоят, главным образом, из слабых землетрясений, размер очагов которых незначителен. Точность анализируемых каталогов, особенно JMA, SCEDC и NCEDC достаточна для нашего анализа.

В результате нами установлено, что вертикальная протяженность сейсмических «гвоздей» составляет 10–50 км, глубины до 90 км, большинство землетрясений в них слабые, их магнитуды не превышают 4.5–5. Общим для всех обнаруженных сейсмических «гвоздей» является небольшое время формирования (10 дней–2 месяца). Формирование «гвоздя» происходит сразу во всем интервале глубин и не наблюдается предпочтительного направления его развития – вверх или вниз. Для некоторых «гвоздей» сильное ($M > 5$) землетрясение может быть инициатором, в других случаях такие землетрясения

происходят в ходе его формирования. Выявлено, что часть таких сейсмофокальных структур связана с извержениями вулканов (предшествуют и следуют за ними), а также с гидротермальной деятельностью. Для ряда сейсмических гвоздей не выявлена явная приуроченность положения сейсмических «гвоздей» к разломным зонам и другим тектоническим структурам.

На основании вычисления показателя Херста H нами установлено, что порядковая последовательность глубин гипоцентров, составляющих «гвоздь», не случайна, а обладает определенной степенью детерминизма. Такие характеристики согласуются с моделями самоорганизации с положительной обратной связью при взаимодействии флюидных потоков и тектонических деформаций, используемыми для объяснения механизма генерации землетрясений [Киссин, 2009]. Особенности изменения числа землетрясений в день при формировании сейсмических «гвоздей» (наличие промежуточных максимумов) согласуются с динамикой инициированной водой акустической эмиссии по результатам длительных экспериментов [Соболев и др., 2010].

Таким образом, наиболее вероятным механизмом генерации сейсмических «гвоздей», не связанных с сильными землетрясениями, является активизация сейсмичности под действием флюидов.

4.5 Выводы по главе 4

Нами рассмотрены проявления сейсмического процесса различных пространственно-временных масштабов. Во всех случаях, проявляется самоподобие сейсмического процесса, выражающееся в степенных законах, его характеризующих. Наше исследование показывает, что анализ динамики сеймотектонических и геодинамических систем (землетрясения, сильные движения и т.д.) должен осуществляться адекватными методами, которые разрабатываются в теории динамических систем и фракталов. Применение этих методов позволяет не просто констатировать, что сеймотектонические процессы «сложные», но и дает количественную оценку (меру) этой сложности.

Полученные характеристики указывают, что сеймотектоническая система относится к классу систем с самоорганизованной критичностью, в которой реализуется детерминировано-хаотическое поведение. Поэтому возможности прогноза поведения сеймотектонических систем сильно ограничены или совсем отсутствуют.

ГЛАВА 5. Динамические характеристики временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS и их связь с сеймотектоникой

5.1 Временные ряды смещений пунктов GPS

Данные GPS в геодинамике позволяют определить «мгновенные» скорости смещений литосферных плит и блоков, которые вычисляются по трендам во временных рядах измерений GPS. Из записей этих временных рядов можно получить также информацию о динамических свойствах сеймотектонической системы. Для этого проводился динамический анализ короткопериодного «дрожания» (шума), наложенного на тренд и сезонные колебания [Захаров, 2004, 2013a].

Исходными данными являются ряды ежедневных смещений GPS в 19 пунктах, выбор которых определялся, во-первых, наибольшей длиной рядов, а во-вторых, желанием проанализировать ряды, относящиеся к разным геодинамическим обстановкам (принадлежность пунктов наблюдения к сейсмическим или асейсмическим регионам, близость к границам плит и т.д.) Все исследуемые временные ряды имеют схожий характер – в них, кроме общего тренда, присутствует значительная хаотическая компонента (рис.5а).

5.2 Динамические и фрактальные характеристики временных рядов смещений пунктов GPS

В результате динамического анализа установлено, что исследуемые временные ряды GPS проявляют фрактальные свойства в диапазоне более чем один порядок по частоте (рис. 5б). Количественные характеристики самоподобия ($\beta=0.5-1.4$, $H=0.7-0.9$) указывают на то, что эти ряды относятся к классу фликкер-шума. Это означает, что система, генерирующая такие сигналы, не является полностью случайной (стохастической), а характеризуется определенной степенью детерминизма. В то же время, в таких системах возможны непредсказуемые значительные (на один или несколько порядков) скачкообразные изменения режима (катастрофы).

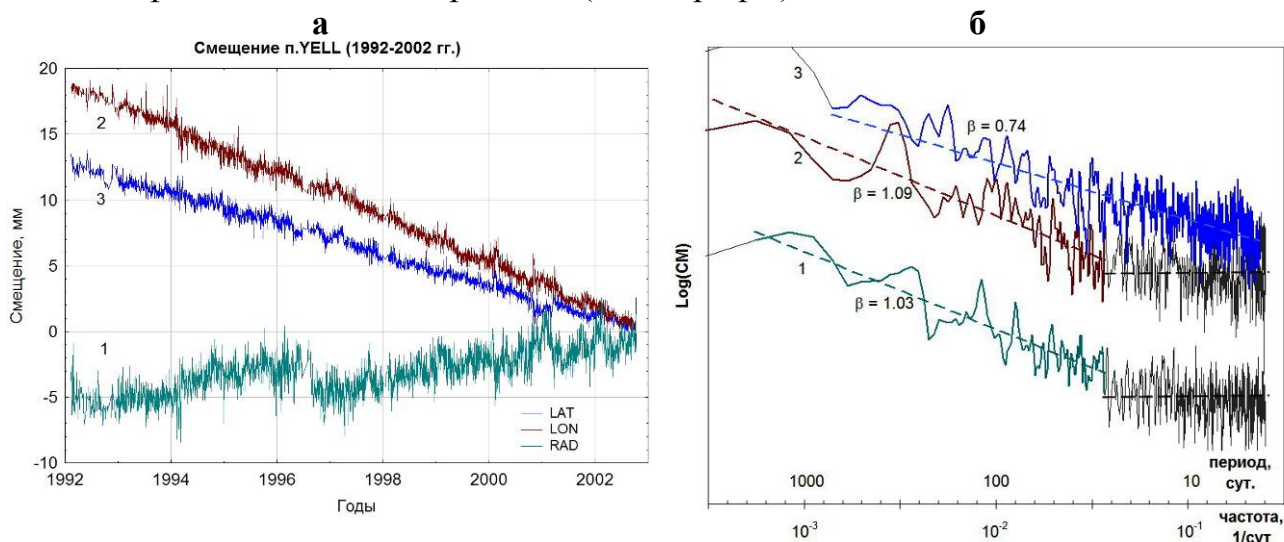


Рис. 5. а–ряды ежедневных смещений земной поверхности по данным GPS для пункта YELL (С.Америка), 1–вертикальная, 2–долготная и 3–широтная компоненты; **б**–зависимость спектральной мощности (СМ) от частоты в двойном логарифмическом масштабе для этих рядов. Области скейлинга аппроксимированы линейной зависимостью, рядом приведены значения β .

Важно отметить, что размах и динамические характеристики хаотического компонента колебаний для вертикальной и горизонтальных компонент смещения близки между собой. Контрастный знакопеременный характер вертикальных движений значительной интенсивности выявлен достаточно давно по «обычным» (повторные нивелировки и др.) геодезическим измерениям [Сидоров, Кузьмин, 1989], а для горизонтальных движений обычно отмечается именно их направленный характер [Хаин, Ломизе, 2005]. Однако анализ рядов GPS, проведенный в нашей работе, показывает, что контрастность

и осциллирующий характер движений проявляется также и для горизонтальной компоненты.

Поскольку значения β , D и H , как при анализе рядов GPS, так и рядов выделения сейсмической энергии, рассчитаны в данном исследовании независимо, они позволяют, в пределах ошибок, подтвердить обоснованность применения теоретических соотношений, связывающих эти параметры, при оценке фрактальных характеристик природных временных рядов.

5.3 Связь динамических характеристик рядов смещений пунктов GPS с сеймотектоническими особенностями регионов их расположения

Проведено сопоставление динамических и фрактальных характеристик исследуемых рядов и сеймотектонических особенностей, в качестве которых мы использовали сейсмическую активность района, в котором расположен пункт GPS, а также принадлежность его к так называемым «жестким» (название условное) блокам. «Жесткими» здесь, вслед за [Sella et al., 2002], считаются блоки, которые принадлежат к «стабильным» областям плит, так что расположенные на них наборы пунктов GPS двигаются наиболее согласованным образом и поэтому используются для наилучшего определения эйлеровых параметров вращения плит. Сходное определение использовано нами в главе 3 при определении блоковой структуры по данным GPS. Соответственно, пункты, не принадлежащие к «жестким» блокам, относятся к зонам границ плит или к областям развития внутренних деформаций. Отнесение анализируемых пунктов GPS к сейсмически активным районам проводилось нами на основе вычисления поверхностной плотности эпицентров землетрясений по каталогу NEIC PDE, принято пороговое значение 1 событие на 10^4 км².

В результате анализа выявлена закономерная связь фрактальных характеристик исследуемых рядов (фрактальная размерность ряда D , показатель Херста H , скейлинговый спектральный параметр β) с сеймотектоническими особенностями районов (сейсмичность и «жесткость» блоков). Для пунктов GPS, принадлежащих к несейсмичным районам (и, одновременно, «жестким» блокам) выявлена меньшая степень детерминизма, чем для пунктов, принадлежащих к сейсмичным районам (и, одновременно, «нежестким» блокам).

Предлагается следующее объяснение полученной закономерности. Пункты GPS, принадлежащие к «жестким» блокам, участвуют в достаточно согласованном совместном движении. Поскольку мы анализируем временные ряды со «снятым» трендом, то эта общая, наиболее детерминированная, компонента из нашего рассмотрения исключена. Оставшаяся компонента содержит, кроме случайного, детерминировано-хаотический сигнал, что и отражается в значениях фрактальных характеристик. Для пунктов, принадлежащих к «нежестким» блокам, нет такой значительной общей компоненты, которая «снимается» вместе с трендом. Однако в таких районах возможна динамика блоков меньшего масштаба (см. в главу 3). Такие сложные внутриблоковые движения порождают сейсмичность и также обладают

детерминировано-хаотическими свойствами, что и выявлено нами по значениям фрактальных характеристик. Возможные модели таких процессов и их свойства рассмотрены нами в главе 6.

Выявленная корреляция между динамическими параметрами исследуемых рядов смещений и геотектоническими и геодинамическими характеристиками районов (жесткость блоков и сейсмоактивность) указывает на то, что детерминировано-хаотический процесс (наряду со случайным) вносит свой вклад в наблюдаемые временные ряды смещений.

5.4 Выводы по главе 5

Таким образом, установлено, что «шумовая» компонента в исследуемых рядах GPS несёт ценную информацию о характеристиках сейсмотектонической системы, генерирующей сложные блоковые движения. Исследуемые ряды относятся к классу фликкер-шума. Система, генерирующая такие сигналы, является детерминировано-хаотической, в ее динамике возможны резкие непредсказуемые изменения режима. Динамические характеристики рядов смещений пунктов GPS закономерно связаны с сейсмотектоническими особенностями регионов, где расположены пункты, и согласуются с предлагаемыми в работе подходами и моделями.

ГЛАВА 6. Блоковые модели сейсмотектонических систем с типичным законом трения

6.1 Особенности сухого трения

Горные породы представляют собой кулоновскую среду, т. е. являются хрупкой средой с внутренним *сухим* трением (трением твердых тел без смазки) [Кочарян и др., 2006; Райс, 1982; Ребецкий, 2003]. Эмпирический закон устанавливает зависимость сухого трения от ряда параметров: скорости относительного движения трущихся поверхностей, времени существования («возраста») контакта, масштаба неоднородностей трущихся поверхностей [Dieterich, 1979; Rice, Ruina, 1983]. Поверхности физических тел (в частности, границы блоков) имеют сложное неоднородное строение, причем эта неоднородность носит иерархический самоподобный характер, и описываются степенными законами.

Вследствие этих особенностей трение представляет собой элемент положительной обратной связи – по скорости, времени и масштабу движений. Уменьшение трения при росте относительной скорости приводит к самоускорению начавшегося движения. Увеличение коэффициента трения от времени контакта приводит к тому, что чем дольше существует стабильный контакт, тем он прочнее. Уменьшение трения при увеличении масштаба неоднородностей приводит к тому, что при переходе движений на большие масштабы оно самоускоряется.

6.2 Блоковые модели в сейсмотектонике и особенности их динамики

Для объяснения особенностей сейсмического процесса предлагаются автоколебательные модели систем блоков с нелинейным трением – модели Барриджа и Кнопова [Burrige, Knopoff, 1967] (рис.6, вверху). Такие модели демонстрируют детерминировано-хаотическое поведение с

самоорганизованной критичностью [Bak, Tang, 1989], порождающее катастрофы («землетрясения») разных масштабов, а также степенные законы распределений характеристик модельной «сейсмичности» в пространстве, во времени и по энергии с параметрами, близкими к таковым у природной сейсмичности [Burr ridge, 2006; Turcotte, 1997].

Нами предложены модели блоковой динамики для большего пространственно-временного масштаба. Такая возможность основывается на универсальности законов трения на разных масштабных уровнях. Рассматривалась модель взаимодействующих дисков (рис. 6, вверху справа) для описания вращательной динамики блоков земной коры, модель блоковой динамики в предгорных зонах [Захаров, 2001, 2010б, 2011а; Короновский, Захаров, 2000].

Установлено, что в некотором диапазоне управляющих параметров (силы трения, скорость и т.д.) в рассмотренных системах осуществляется режим детерминировано-хаотических колебаний, при этом происходят резкие перескоки (модели катастрофических событий – землетрясений и т. п.) между различными положениями, разделенные различными промежутками времени. Система демонстрирует сложное коллективное поведение. Возможны временные объединения части блоков в агломерации, которые разрушаются через некоторое, неизвестное заранее время. Динамика системы генерирует степенные распределения характеристик по модельному пространству, энергии и времени. Рассмотрение подобных моделей делает более понятным источник сложностей, с которыми сталкиваются исследователи при прогнозе землетрясений и других катастрофических событий. Ограниченность (или невозможность) прогноза в таких системах заложена в самой их природе. Подчеркнем, что ключевую роль в хаотическом характере поведения рассмотренных систем играет именно нелинейное (сухое) трение. Модели, учитывающие нелинейные особенности трения, использованы нами для описания особенностей сейсмогенного оползнеобразования при выполнении работ по госконтракту № 02.515.11.5093.

6.3 Модель взаимодействия разномасштабных блоков в литосфере

На основании изложенных в работе свидетельств иерархически самоподобной разломно-блоковой делимости и реологической расслоенности литосферы, нами предлагается следующая модель взаимодействия разномасштабных блоков (рис. 6), которая развивает подход предшественников [Keilis-Borok et al., 1997; Соловьев, 2011; Уломов, 1998; Шерман, 2012].

Тектонические силы вызывают сложную динамику относительно жестких крупных блоков, которые контактируют и взаимодействуют по разнотипным подвижным зонам. Эти крупные блоки, а также зоны между ними, в свою очередь, не являются однородными, а обладают собственной, также иерархической, структурой и состоят из блоков меньшего масштаба, которые также могут совершать дифференциальные движения. Реологическая расслоенность литосферы контролирует глубину проникновения отдельных подвижных зон (и тем самым иерархию блоков) и обеспечивает возможность их перемещений друг относительно друга. Это проявляется во взаимных

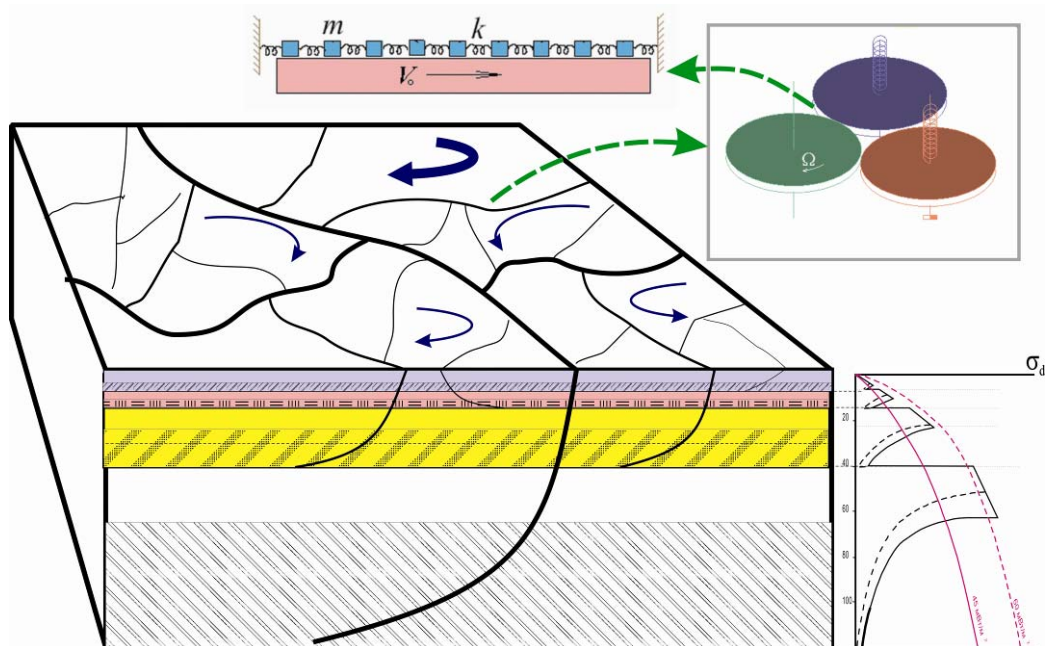


Рис. 6. Модель взаимодействия разномасштабных блоков. Штриховкой показаны реологически ослабленные слои в соответствии с кривой прочности.

движениях, фиксируемых геологическими и геодезическими (GPS) методами. Взаимодействие блоков по границам проявляется, в частности, в сейсмичности, которая обладает самоподобными (фрактальными) свойствами в пространстве, времени и по энергии.

С учетом того, что расслоение литосферы (количество и мощности ослабленных слоев) зависит от конкретных условий, оно (расслоение) может меняться при их изменении. То же происходит и с блоками: в зависимости от условий они могут то объединяться в агломерации, действующие согласованно, то распадаться на более мелкие составляющие. Разломные зоны могут временно «залечиваться», а затем снова активизироваться.

Рассмотренная система из взаимодействующих блоков моделирует сложное поведение *гранулированной среды* [Jaeger, Nagel, 1992] – совокупности большого числа дискретных твердых частиц, пространство между которыми заполнено другим веществом. Важно отметить, что механическое поведение гранулированной среды несет в себе черты поведения одновременно и твердого тела, и жидкости, в зависимости от условий воздействия и пространственно-временного масштаба рассмотрения [Jaeger et al., 1996]. Например, «пластическое поведение» на одном масштабе может реализовываться как сложная поступательно-вращательная динамика множества «жестких» зерен и их объединений («блоков»).

6.4 Выводы по главе 6

Таким образом, блоковые модели динамики сейсмотектонических систем, учитывающие типичный закон трения, весьма полезны для понимания особенности и сложности сейсмотектонического процесса, и для наук о Земле в целом. Разломно-блоковая структура литосферы должна рассматриваться как динамическая характеристика, которая зависит как от свойств среды, так и от характера воздействия на нее, и меняется с течением времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

– На основании фрактального анализа выявлено иерархическое самоподобие структур литосферы от плит до блоков, и континентальных структур от (супер)континентов до террейнов, которое является результатом самоорганизации при образовании, движениях и распаде континентов вследствие глобальной динамики плит. Это означает, что геотектоника и геодинамика должны учитывать (в частности, при палеогеодинамических реконструкциях) динамическую модель, включающую создание, аккрецию, фрагментацию, распад и взаимодействие плит, блоков, континентальных структур, которые идут в широком диапазоне масштабных уровней.

– Блоковая структура литосферы на разных масштабных уровнях выявляется на основании анализа современных космогеодезических данных. Разработаны методы и инструментарий для создания блоковых моделей регионов по данным GPS. Выделенные на основании анализа блоки в областях новейшей тектоники совершают относительные движения. Границы блоков находят свое выражение в геолого-геофизических данных (разрывные нарушения, рельеф, сейсмичность и плотность очагов землетрясений, гравитационные аномалии и другие геофизические поля). В результате выявлено более сложное блоковое строение исследуемых регионов на следующем масштабном уровне, что согласуется с предложенными моделями иерархической блоковой динамики.

– На основании фрактального и динамического анализа сеймотектонических систем на разных пространственно-временных масштабах (тысячи километров и десятки лет при анализе сейсмичности и разломов, сотни–первые тысячи километров и годы при анализе рядов выделения сейсмической энергии, сотни километров и месяцы для афтершоковых процессов, десятки километров и десятки дней для сейсмических «гвоздей») установлено согласованное самоподобие сеймотектонического процесса по времени, в пространстве и по энергии, выражающееся в степенных законах, его характеризующих. Это указывает, что сеймотектоническая система относится к классу детерминировано-хаотических систем с самоорганизованной критичностью, в которой реализуется хаотическое поведение.

– На основании рассмотрения закономерностей формирования сейсмических «гвоздей» во времени установлено, что наиболее вероятным механизмом их генерации является активизация сейсмичности под действием флюидов.

– Сеймотектонические особенности районов (сейсмичность и жесткость блоков) закономерно проявляются в динамических характеристиках временных рядов GPS, которые несут информацию о мелкомасштабных современных движениях земной коры. Эта связь объясняется предложенными моделями блоковой динамики и сейсмичности.

– Разломно-блоковая структура литосферы, с учетом ее реологической расслоенности и свойств предложенных блоковых моделей с типичным законом трения, зависит от условий и характера внешнего воздействия, и должна рассматриваться не только как иерархическая, но и как динамическая характеристика.

Подводя общий итог, заключаем, что в диссертации выявлены самоподобные (фрактальные) свойства структуры литосферы и происходящих в ней процессов (сейсмичность, современные движения) в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Показано, что это самоподобие является следствием самоорганизации в ходе эволюции литосферы. Выявлена связь количественных характеристик самоподобия с геодинамикой, тектоникой и особенностями сейсмического режима, а также предложены возможные механизмы и модели для объяснения этих особенностей.

Таким образом, установлено, что рассмотренные в работе системы относятся к классу детерминировано-хаотических, в которых ограничение реального прогноза состояний и динамики имеет принципиальный характер.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. **Захаров В.С.** Тепловой режим и динамика коллизионной зоны: результаты моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 1999. – № 2. – С. 18–23.
2. **Захаров В.С.** Модель деформации реологически расслоенной коры при континентальной коллизии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4 Геология. – 2000. – № 6. – С. 17–22.
3. **Захаров В.С.** Анализ динамических характеристик временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – № 5. – С. 13–20.
4. **Захаров В.С.** Динамические и фрактальные характеристики временных рядов выделения сейсмической энергии // Нелинейный мир. – 2010а. – № 4. – С. 234–242.
5. **Захаров В.С.** Модели сейсмотектонических систем с сухим трением // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2011а. – № 1. – С. 22–28.
6. **Захаров В.С.** Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2011б. – № 6. – С. 10–17.
7. **Захаров В.С.** Предварительный анализ самоподобия афтершоковой последовательности японского землетрясения 11 марта 2011 г. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2012. – № 2. – С. 52–56.
8. **Захаров В.С.** Динамические характеристики временных рядов GPS и их связь с сейсмотектоническими особенностями региона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2013а. – № 3. – С. 29–37.
9. **Захаров В.С.** О механизме генерации сейсмических «гвоздей» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2013б. – № 5. – С. 18–24.

10. **Захаров В.С.**, Вадковский В.Н. Аккреционная тектоника и фрактальные характеристики террейнов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2013. – № 1. – Вып. 21. – С. 122–131.
11. **Захаров В.С.**, Карпенко А.И., Завьялов С.П. Особенности сейсмических «гвоздей» в различных геодинамических обстановках // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2013. – № 1. – С. 11–18.
12. **Захаров В.С.**, Симонов Д.А. Анализ современных дискретных движений блоков земной коры геодинамически активных областей по данным GPS // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. – 2010. – № 3. – С. 25–31.
13. Лаврусевич А.А., **Захаров В.С.**, Хоменко В.П. Особенности фрактального анализа лессового псевдокарста (на примере Яванской долины, Таджикистан) // Инженерная геология. – 2013. – № 2. – С. 72–78.
14. Лобковский Л.И., Каракин А.В., **Захаров В.С.** Модель горообразования в рамках концепции двухъярусной тектоники плит // Геология и геофизика. – 1991. – № 7. – С. 3–8.
15. Наймарк А.А., **Захаров В.С.** О соотношениях направленности, цикличности и нелинейности в геологических процессах // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2012. – № 1. – Вып. 19. – С. 181–190.

Монографии

16. **Захаров В.С.** Современные вертикальные движения земной коры // Монография «Современные глобальные изменения природной среды». Т. 1, раздел 8.3. – М.: Научный мир. – 2006. – С. 626–643.
17. Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д., **Захаров В.С.**, Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсяченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза. – М.: Светоч Плюс. – 2011. – 368 с.

Некоторые другие публикации

18. 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, 2003а. – С. 232–235.
19. 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.
20. Завьялов С.П., **Захаров В.С.** Блоковая структура земной коры по данным GPS // Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы. Материалы XVIII международной научно-практической конференции 24–29 сентября 2012 года. – Воронеж: Научная книга. 2012. – С. 126–130.
21. **Захаров В.С.** Модель блоковой динамики в предгорных зонах // Современные процессы геотектоники. – М.: Научный мир, 2001. – С. 106–109.

22. **Захаров В.С.** Поиск детерминизма в наблюдаемых геолого-геофизических данных: анализ корреляционной размерности временных рядов // Современные процессы геологии. – М.: Научный мир, 2002. – С. 184–187.
23. **Захаров В.С.** Анализ фрактальных характеристик временных рядов GPS // Современные процессы геологии. – М.: Научный мир, 2003а. – С. 147–151.
24. **Захаров В.С.** Фрактальные характеристики временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS // Труды международного междисциплинарного симпозиума "Фракталы и прикладная синергетика" ФиПС-03. – М.: МГОУ, 2003б. – С. 229–232.
25. **Захаров В.С.** Характеристики самоподобия сейсмичности и сетей активных разломов Евразии // Электронное научное издание «ГЕОразрез». – 2008а. – вып. 2008.01 (01). – http://georazrez.uni-dubna.ru/download/2008/01/001-Zakharov-Kharakteristiki_samopodobiya_seysmichnosti.pdf.
26. **Захаров В.С.** Анализ фрактальных свойств временных рядов выделения сейсмической энергии (на примере Японии) // Материалы междисциплинарного симпозиума ФиПС-08 «Прикладная синергетика в нанотехнологиях». – М.: МАТИ, 2008б. – С. 434–438.
27. **Захаров В.С.** Фрактальные характеристики сейсмичности и систем активных разломов // Материалы междисциплинарного симпозиума ФиПС-08 «Прикладная синергетика в нанотехнологиях». – М.: МАТИ, 2008в. – С. 438–442.
28. **Захаров В.С.** Блочные модели с сухим трением в сейсмотектонике // Электронное научное издание «ГЕОразрез». – 2010б. – Вып. 2010.02 (07). – http://georazrez.uni-dubna.ru/download/2010/07/Zakharov-Blokmodeli_s_sukhim_treniem.pdf.
29. **Захаров В.С.** Иерархическая структура литосферы: тектонические и геофизические проявления // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция «Геология». – М.: МГУ, 2013. – http://geo.web.ru/pubd//2013/09/18/0001187172/pdf/zaharov_2013.pdf.
30. **Захаров В.С.,** Карпенко А.И. Сейсмические «гвозди» в различных геодинамических обстановках // Геологическая среда, минерагенические и сейсмотектонические процессы. Материалы XVIII международной научно-практической конференции 24–29 сентября 2012 года. – Воронеж: Научная книга, 2012а. – С. 130–135.
31. **Захаров В.С.,** Савчук О.В. Самоподобные свойства сети активных разломов и сейсмичности // Материалы XLI тектонического совещания. Т.1. – М.: ГЕОС, 2008. – С.324-329.
32. **Захаров В.С.,** Симонов Д.А., Марков В.В. Определение кинематики блоков земной коры по данным GPS // Электронное научное издание «ГЕОразрез». – 2010. – Вып. 2010.01 (06). – http://georazrez.uni-dubna.ru/download/2010/07/Zakharov-Blokmodeli_s_sukhim_treniem.pdf.
33. Короновский Н.В., **Захаров В.С.** Колебания блоков земной коры южного края Скифской плиты (северное Предкавказье), в связи с образованием передовых прогибов // Материалы XXXIII тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 232–235.

34. Симонов Д.А., **Захаров В.С.** Методика анализа современных дискретных движений блоков земной коры по данным GPS // Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция «Геология». – М.: МГУ, 2010. – <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1183766&uri=10.html>.
35. Симонов Д.А., **Захаров В.С.**, Гайдаленок О.В., Маловичко Е.А. Применение методики расчета дискретных движений блоков земной коры активных областей по данным GPS на примере Южной Калифорнии // Материалы XLIII тектонического совещания. Т. 2. – М.:ГЕОС, 2010. – С. 250–254.
36. Симонов Д.А., **Захаров В.С.**, Лю С. Методики анализа современных дискретных движений блоков геодинамически активных областей по данным GPS (на примере Эгейско-Анатолийского региона) // Материалы XXXIX тектонического совещания. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 215–219.
37. Koronovsky N.V., **Zakharov V.S.** Forming of the foredeeps of Northern Caucasus caused by strike sleep-displacements movements of the southern edge of the Scyphian plate // 25th General Assembly of the EGS, April 25-29, 2000. – Nice, 2000.
38. Vadkovsky V., **Zakharov V.** Dynamic processes in geology: Introduction to nonlinear systems // WISTCIS Outlook Conference “Information Society Priorities: New Prospects for European CIS Countries”. Conference abstracts. – Moscow. 2003. – P. 66.
39. Zavialov S., **Zakharov V.** Calculation of Tectonic Block Rotation Parameters from GPS Data // Geophysical Research Abstracts. Vol. 14, EGU2012-PREVIEW, 2012. EGU General Assembly 2012. – <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2012/EGU2012-12519.pdf>.