

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Захарова Владимира Сергеевича

«Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа»,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

В настоящее время науки о Земле все активнее используют достижения, связанные с представлениями о нелинейности процессов, происходящих в окружающем мире, начиная от Вселенной в целом и кончая ее составными элементами. Ключевым понятием современных представлений о геологической среде и процессах является их фрактальность. Представленная работа В.С. Захарова является ярким примером использования фрактального и динамического анализа в приложении к сейсмотектонике на основе обширного фактического материала.

В первой главе, посвященной состоянию проблемы и методам анализа уточняется понятие фрактал, обладающий важным свойством – скейлингом, и характеризуется фрактальная размерность как показатель в степенном законе. Динамический и фрактальный анализ используется для исследования процессов для характеристик сейсмичности, сетей активных разломов, террейнов. Делаются важные выводы: 1) о возможности различать стохастический, детерминированный динамический хаос и регулярное поведение; 2) о выявлении степени хаотичности систем; 3) о перспективности и ограничениях прогноза динамики сейсмотектонических систем.

Соискателем выдвинуты на защиту 4 основных положения.

Первое защищаемое положение сформулировано следующим образом. «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».

Первое защищаемое положение раскрывается во второй главе, при этом рассматривается самоподобие структур литосферы от плит до блоков в степенных законах, определяются иерархия плит от больших до самых малых, фрактальные характеристики террейнов, а так же разломов и блоков.

Первое защищаемое положение обосновано вполне достаточно. Автор приходит к очень важному выводу: в результате установленных степенных законов распределения, отсутствуют какие-либо характерные выделенные размеры в совокупности террейнов, образуются террейны всех размеров, а понятия «среднего» террейна не существует. Мегасуперконтиненты, суперконтиненты вплоть до Пангеи в позднем палеозое, современные континенты представляют собой совокупность блоков и террейнов разного размера и возраста, происхождения, и истории. В целом с выводом можно согласиться, если рассматривать тектонику плит как ведущий механизм структурообразования в коре.

К главе имеются замечания: 1. При рассмотрении понятия «террейн» в тексте обсуждаются механизмы формирования аккреционных призм и активных окраин в целом. При этом «аккреционные призмы надвигаются на активную окраину», что является исключением, чем правилом, а основное надвигообразование осуществляется в сторону поддвигающейся плиты. То же касается и террейнов: коллаж, причленение – да, но не надвигообразование на активную окраину! 2. Можно ли выявленные степенные законы фрактальности переносить на структуры древних донеархейских кротонов, в частности на гранит-зеленокаменные области (например, Курская ГЗО), для которых часто выдерживается поперечная размерность блоков ~ 90-120 км? В этой связи возникают дополнительные вопросы: 1) была ли автором сделана попытка определить фрактальность таких древних блоков?, 2) следует ли это связывать с особенностями геодинамики палео- и мезоархей если да, то какой предполагается механизм их формирования?

Второе защищаемое положение. «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».

Положение обосновывается в третьей главе, при этом рассматривается блоковая структура земной коры и относительные движения блоков на основании данных GPS. Главное в этой главе – это создание моделей относительных движений блоков земной коры по данным GPS. Применяемые две группы методов для выделения блоков и выявления количественных характеристик их движений, как отмечает соискатель, страдают недостатками. В первой группе, где отдается предпочтение классическим представлениям о геологическом строении региона выделяемые блоки не соответствуют реальной современной «мгновенной» кинематике, измеряемой по данным GPS. Во второй группе методов выделения блоков как раз осуществляется на основании анализа кинематики. Однако, при этом, не учитывается сферичность Земли, что при переходе

анализа на большие регионы неизбежно должно привести к существенным ошибкам. Автор выходит из этого затруднительного положения, создав собственные методы анализа, которые должны исключить недостатки предыдущих двух групп методов. С этой целью соискатель сначала по набору GPS выделяет кинематически однородные кластеры, которые относятся к единому эйлерову полюсу P , а затем, применяя собственные методы, которые включают минимизацию некоторого функционала для нахождения наилучших параметров вращения. Свою методику соискатель применил для Эгейско-Анатолийского региона (7-блочная модель), для Южной Японии (9 блочная модель), для Южной Калифорнии (с выделением блоков, вытянутых в северо-западном направлении, в направлении разлома Сан-Андреас). Важно отметить, что автор выделяет наиболее напряженную часть разлома Сан-Андреас (где, следовательно, возможны сильные землетрясения). По главе 3 делаются выводы: 1) выделенные блоки совершают взаимные перемещения, обуславливающие многие геоморфологические, сейсмические и другие проявления; 2) данные GPS можно использовать не только для определения движения плит и микроплит, но главное – для выделения совсем небольших подвижных блоков, отражающих внутреннюю дифференциальную кинематику мелких внутренних структурных элементов; 3) предложенные в работе модели подтверждают разномасштабную иерархическую блочную структуру литосферы и модели процессов в литосфере. Второе защищаемое положение не вызывает сомнения, а вытекающие из него следствия имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение.

Третье защищаемое положение. «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)».

Положение обосновывается в четвертой главе «фрактальные и динамические характеристики сейсмического процесса». В этой главе рассматриваются характеристики самоподобия сейсмичности и сетей активных разломов. Автору удалось это доказать. Самоподобие проявляется в диапазоне 2-3 порядков пространственных масштабов и распознается в единицах магнитуды. Установлено, что пространственная структура распределения гипоцентров землетрясений и иерархическая структура блоков подчиняются одинаковым соотношениям блоков. Сейсмический процесс рассматривается как совокупность землетрясений, которые, в свою очередь, рассматриваются как точки в

координатах пространства-времени, снабженные параметром энергии. Пространственная структура полей очагов землетрясений имеет фрактальный характер, что согласуется с ростом количества форшоков перед сильным землетрясением. В целом автору удалось рассмотреть согласованность фрактальных характеристик сейсмотектонического процесса и обосновать защищаемое положение. Делается два важных вывода: 1) согласованность распределения магнитуды (и энергии) землетрясений и фрактального распределения размеров разрывных нарушений является количественным свидетельством согласованного самоподобия и самоорганизации сейсмического процесса. 2) литосфера как открытая система в процессе своей эволюции неоднократно приходит в состояние самоорганизации, для которого характерна иерархическая самоподобная организация неоднородностей (фрактальность) и степенные законы распределения параметров.

Вывод по главе 4 вполне ожидаем: сейсмотектоническая система – это класс систем с самоорганизованной критичностью, где реализуется детерминировано-хаотическое поведение. Возможности прогноза таких сейсмотектонических систем (в т.ч. и землетрясений) фактически отсутствуют. Это класс непрогнозируемых событий.

Замечания по 4 главе. Значительная часть раздела посвящена «сейсмическим гвоздям», которые представляют собой субвертикальные скопления очагов землетрясений. Эти «гвозди» были установлены в различных пунктах тихоокеанского побережья (как на востоке, так и на западе), разъясняется происхождение «гвоздей», подчеркивается исключительная роль в их генерации воды (флюидов). Вызывает некоторое недоумение, что обширный материал (с. 172 – 198), посвященный «сейсмическим гвоздям» слабо отражен в выводах по главе и вовсе не упоминается в защищаемом положении, а фрактальность процессов, происходящих в этих структурах, звучит не очень внятно!

Четвертое защищаемое положение. «Доказано, что сейсмотектонические системы принадлежат 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 сейсмотектонического процесса».

Положение раскрывается в 5 и 6 главах. Пятая глава посвящена динамическим характеристикам временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS и их связи с сейсмотектоникой. Основная цель этой главы – согласовать смещения земной коры по данным GPS с сейсмотектонической системой, охарактеризованной в предыдущих главах. Можно сказать – это применение метода актуализма для анализа

сейсмотектонической системы. Установлена «шумовая» компонента в исследуемых рядах GPS, она несет важную информацию о сейсмотектонической системе, которая генерирует сложные блоковые движения. Анализируемые данные GPS относятся к классу фликкер-шумов. Система, генерирующая такие сигналы, является детерминировано-хаотичной с непредсказуемыми изменениями режима. Расчеты фрактальных характеристик компонентов смещения подтверждают установленные факты контрастных знакопеременных вертикальных движений и направленный характер горизонтальных движений, а также большую степень детерминизма временных рядов пунктов смещения в сейсмически активных районах по сравнению с более устойчивыми.

Замечание к главе. По мнению оппонента в диссертации следовало бы хотя бы попытаться увязать эти факты с возможными геодинамическими процессами, а не ограничиваться подтверждением установленных фактов!

Шестая глава, в которой приводятся блоковые модели сейсмотектонических систем с типичным законом трения, как и глава 5, направлена на обоснование четвертого защищаемого положения. В ней рассматриваются закономерности сухого трения, из которых также вытекает детерминировано-хаотическое распределение систем с самоорганизованной критичностью, что порождает катастрофы – землетрясения разных масштабов. Предложены модели, основаны на сухом трении. Следует заметить, что все модели теоретически, скорее всего, безупречны, однако практически они реализуются в той или иной степени в водной среде, начиная от присутствия свободной и кончая водой связанной, вплоть до конституционной. Все это дает основание рассматривать все предложенные модели трения как реализуемые в водно-флюидной среде (системе).

Рассматривая модель блоковой динамики для областей, примыкающих к горно-складчатым сооружениям, возникающим за счет коллизионного взаимодействия, соискатель предполагает «вязкое основание нижней коры» оговаривая ее природу как состояние «гранулированной среды». Масштабированность блоков с разной глубиной их заложения логично увязывается с моделью реологической расслоенности литосферы, однако в этом плане она дает лишь общие представления. По мнению оппонента, фрактальность разномасштабных блоков должна была бы увязана с фрактальностью реологической расслоенности на конкретном региональном примере.

Подходя к оценке работы в целом, укажем вначале ее недостатки:

1. Разработанная фрактальная система блоков никак не привязана к геологическому времени и поэтому не несет в себе эволюционный тренд. Всегда ли была такая система делимости литосферы от доархея, архея, протерозоя и фанерозоя, или эта система

делимости отражает больше новейшую сеймотектоническую систему (см. замечания к гл. 2).

2. Соискатель явно недооценивает роль воды в формировании планетарной системы блоков. Если привлечь данные сравнительной планетологии, то окажется, что на Марсе существует система соподчинения блоков, но, что показательно, активно она работала, пока вода на Марсе не была заморожена.

3. Соискатель говорит обо всех процессах самоподобия в литосфере. Литосфера – это та упругая среда, где протекают все процессы и создаются системы, о которых говорит автор. Но каково ее строение, состав во временном аспекте? Литосфера с гранитным слоем (или его модификациями) или без него, есть ли у литосферных блоков астеносфера (единая или прерывистая, на какой глубине?), как это влияет на фрактальность блоков. Автор доказывает, что каждый блок океанической или континентальной или переходной литосферы представляет собой коллаж террейнов разного размера, возраста и, видимо, вертикального строения. Как ведет себя литосфера с мантийным слоем разной мощности, с базальтовым, андезитовым и т.д. слоями – это соискателя не интересует, главное, чтобы литосфера была и делилась по фрактальному принципу.

Не смотря на указанные общие и частные замечания, которые, в значительной степени, дискуссионны, впечатление о диссертационной работе весьма благоприятное. Несомненным достоинством работы является то, что проведены исследования, в результате которых получены новые фундаментальные знания о делимости литосферы и о процессах, происходящих в ней. Следствием могут быть совершенно новые подходы к «примирению» многих, с первого взгляда противоречивых, фактов и представлений, например о «жесткости» литосферы и ее тектонической расслоенности с различной реологией, о многоярусности проявления «гранулированных» сред и многих других фундаментально значимых категорий.

В работе рассматриваются многие аспекты, которые, заинтересованный в области нелинейной геодинамики, читатель может взять на вооружение для моделирования на примере разномасштабных региональных структур. В этом плане работа может рассматриваться как важный вклад в развитие нового направления в фундаментальной геологии – нелинейной геодинамики.

Актуальность диссертации не вызывает сомнения, т.к. по мнению многих ведущих ученых за внедрением теории нелинейных систем и процессов в практику геологических исследований большое будущее. Степень обоснованности защищаемых положений, выводов и рекомендаций вполне достаточна, а достоверность и новизна выводов базируется на солидном фактурном фундаменте. При написании работы, обобщен и

проработан огромный опубликованный материал (479 наименований). Работа прошла широкую апробацию, а основные защищаемые положения изложены в 57 публикациях, в том числе в 2-х монографиях и в 15 статьях в журналах из списка ВАК. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Работа в целом отвечает необходимым критериям и положениям пункта 9, предъявленным к докторским диссертациям, а сам соискатель достоин присвоения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

28.03.2014 г.

Официальный оппонент

Декан геологического факультета

ФГБОУ ВПО «ВГУ»

Доктор геолого-минералогических наук,
профессор



В.М. Ненахов

г. Воронеж, Университетская пл. 1

Тел. 8-920-212-83-46

Тел. 8-(473)-220-89-89

viktor.nenahov@mail.ru



Одобрено государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Воронежский государственный университет»
(ФГБОУ ВПО «ВГУ»)
Ненахов В.М.
Вед. документа
В.С. Сивков 25.03.14
подпись, расш. [illegible]

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Владимира Сергеевича Захарова

«Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа»,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

В последние десятилетия идеи и подходы, разработанные ранее в теории динамических систем, в теории фракталов, теории катастроф и в новой и пока еще не вполне четко структурированной области знания – синергетике – активно внедряются в науках о Земле. Эти подходы позволяют по-новому взглянуть на проблемы упорядоченности и хаоса, стационарности и катастрофичности, на проблему прогнозируемости геофизических явлений. Многими авторами было показано, что важнейшей особенностью геологической среды (литосферы в частности) является самоподобие проявляющееся в степенных законах распределений и во фрактальности (иерархичности) многих структур и процессов. Эти свойства геофизической среды во многом определяют и принципиальные ограничения на возможную точность и полноту прогноза состояния и динамики геологических систем. Диссертация В.С.Захарова лежит в русле этого нового направления исследований и уже потому является весьма актуальной. Отметим, что отдельных статей по указанной тематике не мало опубликовано и в отечественной литературе. Обобщающие работы, представлены интересными монографиями школы П.М.Горяинова нацеленными, однако, более на исследование проблем рудной геологии и книгой А.А.Лукка с соавторами, посвященной главным образом анализу временных рядов. Эти исследования не охватывают многие важные аспекты данной проблемы.

Работа В.С. Захарова посвящена, с одной стороны, выявлению многочисленных случаев самоподобия и расчету фрактальных характеристик структур литосферы и происходящих в ней процессов, таких как сейсмичность, современные движения, тектонические движения и связи их количественных характеристик с геодинамикой, тектоникой и особенностями сейсмического режима. Это направление работ важно, но уже достаточно традиционно. Другим направлением работ диссертанта является разработка на основе полученных данных представлений о возможных механизмах сеймотектонических и геологических процессов. Данное направление является фактически новым и направлено на получение нового знания о характере геолого-

геофизических процессов в литосфере на основе использования указанного выше нового аппарата исследований

В первой главе дается обзор проявлений иерархических самоподобных свойств структур и процессов в литосфере и в земной коре и методов получения таких данных. Дается понятие фрактала и фрактальной размерности, приводятся методики анализа самоподобия на основе расчетов параметров описывающих эмпирические данные степенных законов. Приводятся методы анализа характеризующих поведение динамических систем временных рядов. В главе убедительно обосновывается применение методов фрактального анализа и анализа временных рядов к исследованию разломно-блоковой структуры литосферы, распределений очагов землетрясений и характера сейсмотектонического процесса. Приводится также описание программных средств, созданных автором для проведения такого анализа.

Отметим, что по стилю написания главы виден немалый опыт автора как преподавателя, а сама глава носит во многом учебный характер. Однако это не является недостатком, так как, среди прочего, облегчает восприятие следующих глав диссертации и выявлению обоснованности (или дискуссионности) полученных автором выводов. Напрашивается также использование этой главы после незначительной переработки в качестве учебного пособия.

На защиту автором вынесено 4 защищаемых положения, которые обосновываются в главах 2–6.

Первое защищаемое положение раскрыто в главе 2, где рассмотрены проявления иерархичности (самоподобия) структур литосферы и коры в широком диапазоне масштабов от десятков до тысяч километров, и определены фрактальные характеристики размерности плит, блоков, террейнов, а также морфологических структур лика Земли: континентов, островов. Установлено, что распределение террейнов по размерам в диапазоне 2.5–3 порядков размеров описывается общим степенным законом, что указывает на единство иерархической структуры литосферы от масштаба отдельных блоков до крупных литосферных плит. Расчеты автора показали, что фрактальная размерность множества террейнов лишь слабо варьирует в зависимости от их размеров, времени приращения (возраста) и иных свойств. Этот результат интерпретируется автором как свидетельство малой деформируемости (жесткости) блоков различного масштаба. Аналогично рассматриваются проявления иерархической разломно-блоковой делимости литосферы по иным геолого-геофизическим данным. Физической основой развиваемой в работе модели строения и динамики литосферы является реологическая расслоенность литосферы. Автором сделан важный вывод о принципиальном

иерархическом самоподобии структур литосферы от суперконтинентов до отдельных террейнов и мелких блоков земной коры. Можно согласиться с выводом автора, что указанные свойства установлены достаточно определенное и должны учитывать при глобальных геодинамических и геотектонических построениях, в частности, при проведении палеогеодинамических реконструкций. Первое защищаемое положение обосновано достаточно убедительно.

В качестве замечаний по первой главе отметим, что некоторые вопросы остались без ответа. Так, не вполне понятно, как при сохранении жесткости террейнов образуется сплошная мозаика террейнов – между ними вроде бы должны были оставаться некие промежутки. Не вполне понятно также, каким образом сохраняется единый коэффициент самоподобия при различии масштабов от размера тектонических плит до отдельных блоков. Представляется, что мощность (толщина) плит и блоков существенно различны (об этом пишет и автор, касаясь проблемы реологической расслоенности литосферы). Отсюда несколько странно столь хорошее постоянство коэффициентов степенного подобия.

Второе защищаемое положение раскрывается в главе 3, где проявления блоковой структуры литосферы (и, более детально, земной коры) и относительные движения блоков на разных масштабных уровнях выявляются на основании анализа данным GPS. В главе описаны разработанные В.С. Захаровым (в соавторстве с коллегами) методы построения моделей относительного движения блоков и обосновывается преимущество этих методов перед иными аналогичными подходами. Разработанные методы в работе применяются для анализа GPS-данных в областях новейшей тектоники (Эгейско-Анатолийский регион, Калифорния, Япония), что позволило построить модели относительных блоковых движений анализируемых регионов. В результате выявлено более сложное (по сравнению с работами предшественников) блоковое строение анализируемых регионов. Подтверждено, что границы блоков проявляются в различных геолого-геофизических данных, согласуются с реологической расслоенностью литосферы и отвечают моделям блоковой динамики, которые рассматриваются автором в главе 6. Отметим, что результаты выделения блоков земной коры по данным GPS могут иметь прикладное значение – они могут использоваться при определении сейсмической опасности. Второе защищаемое положение хорошо обосновано.

Отметим, однако, что выделение блоков по данным анализа GPS данных, исходно неоднозначно – при реальной плотности точек GPS наблюдений часто выявляются только ядра блоков, а их границы должны быть определяемы на основе иных данных.

Обоснованию третьего защищаемого положения посвящены главы 4 и 5. В главе 4 проводится анализ самоподобных характеристик сейсмического процесса. Это самоподобие выражается в выполнении классических степенных законов (Гутенберга–Рихтера, Омори, наличии форшокового каскада, фрактальных распределениях очагов землетрясений и разломов) и в динамических характеристиках временных рядов. Количественно характеристики описываются фрактальной размерностью D , показателем Херста H , скейлинговым спектральным параметром β . Все эти подходы используются автором. В результате на разнообразном фактическом материале с применением усовершенствованных методик автором показана согласованность между собой различных иерархических характеристик сеймотектонического процесса (фрактальной размерности эпицентров землетрясений, активных разломов, параметра b в законе Гутенберга-Рихтера). Отметим, что помимо указанных выше «статических» характеристик, рассмотрены зависящие от времени аспекты сейсмического режима. Проведенный анализ временных рядов выделенной сейсмической энергии (также на базе методов, разработанных в теории динамических систем и фракталов) позволил установить, что эти ряды относятся к классу фликкер-шума. Проведен также анализ афтершоковых последовательностей сильных землетрясений.

В этой же главе рассмотрены пространственно-временные особенности и возможные механизмы формирования короткоживущих субвертикальных кластеров очагов землетрясений (сейсмических «гвоздей») в различных регионах. На основании анализа закономерностей формирования «гвоздя» во времени делается вывод, что наиболее вероятным механизмом генерации сейсмических «гвоздей» является активизация сейсмичности под действием флюидов.

По результатам главы делается важный и обоснованный вывод, что сеймотектоническая система относится к классу систем с самоорганизованной критичностью, в которой реализуется детерминировано-хаотическое непрогнозируемое поведение.

К недостаткам можно отнести отсутствие анализа, в какой мере появление гвоздей может быть артефактом зачастую много худшей точности определения глубины события, по сравнению с параметрами эпицентра. Рецензенту представляется, что один этот фактор не может породить «эффект сейсмических гвоздей», но рассмотрение такого вопроса продемонстрировало бы большее внимание автора к деталям области исследования. Не представляется вполне убедительным и рассуждение автора в пользу выполнения соотношения $D=2b$. По самому смыслу и средним значениям этих параметров это

соотношение примерно выполняется, но указывать на новое подтверждение этого соотношения, по-видимому, было бы вполне оправданно только если бы наблюдалась положительная корреляция между парами значений D и b для различных областей. Такого сопоставление автором не приводится.

Пятая глава посвящена рассмотрению и анализу мелкомасштабных современных движений в литосфере на основании изучения временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS. В работе установлено, что исследуемые временные ряды GPS (также как ряды эмиссии сейсмической энергии) проявляют фрактальные свойства в диапазоне более одного порядка по частоте и относятся к классу фликкер-шума (шума перемежаемости), что может быть объяснено детерминировано-хаотическим характером и самоорганизованной критичностью сеймотектонических систем. Выявлена закономерная связь фрактальных характеристик исследуемых рядов с сеймотектоническими особенностями районов (уровнем сейсмичности и жесткостью блоков). Это хорошо согласуется с результатами, полученными в предыдущих главах диссертации и несомненно является новым интересным результатом.

В качестве замечания можно отметить определенную неполноту картины. Не очевидно, что указанный фликкер-шум связан именно с тектоникой или даже микро тектоникой, а не с иными факторами (грунтовыми, погодными или ионосферными воздействиями).

Третье защищаемое положение также хорошо обосновано.

Четвертое защищаемое положение обосновывается в 5 и 6 главах.

В шестой главе рассматриваются блоковые модели сеймотектонических систем с типичным (нелинейным) законом трения, порождающие сложную детерминировано-хаотическую динамику, в которой возможны и дифференциальные движения отдельных элементов и согласованное коллективное движение временно возникающих, и затем распадающихся агломератов отдельных элементов системы. Автором предложены новые варианты подобных моделей. Эти модели порождают степенные распределения и фликкер-шумовое поведение временных рядов. В работе показано, что для таких временных рядов динамические характеристики близки к таковым для рассмотренных в пятой главе рядов GPS. На основании такого подхода формулируется обобщенная модель взаимодействия разномасштабных блоков в литосфере с учетом ее реологической и тектонической расслоенности. Использование автором данных по нелинейному поведению коэффициента трения и полученные из этого следствия показали рецензенту

наиболее оригинальными и ценными. Определенная абстрактность модели при этом несущественно снижает ее ценность.

Четвертое защищаемое положение вполне обосновано, и не только главами 5 и 6, а всей совокупностью проведенных диссертантом исследований

Общие недостатки работы: для всей работы характерна определенная разбросанность, отчасти даже эклектичность. Правда, такая эклектичность имеет то важное основание, что разные системы объединяются общими методами исследования. Демонстрация такой общности интересна уже сама по себе. И хотя в целом, диссертация автора написана вполне строго, автору не удалось вовсе избежать модных и не вполне строгих сентенций. Так встречается модное утверждение, что в работе «подтверждено понимание сейсмического процесса как фундаментального следствия эволюции сейсмотектонической системы к состоянию самоорганизованной критичности, в котором невозможен реальный прогноз динамики и катастроф». При этом нет внятных пояснений, как такая эволюция реализуется, а утверждение о невозможности реального прогноза не вполне точно.

Несмотря на указанные недостатки, представленная работа В.С. Захарова заслуживает высокой оценки. Особенно хочется отметить, что анализ проводился автором на самом современном методическом уровне, с использованием различных подходов, на богатом и разнообразном фактическом материале, на геофизическом уровне строгости. Этим работы автора выгодно отличаются от многих работ по этой – довольно «модной» тематике, когда часто употребляются общие слова, без детальных вычислений, а иногда и без полного научного и методического понимания вопроса.

Работа представляет собой законченное фундаментальное исследование и выполнена на высоком профессиональном уровне. Применение методов фрактального анализа и анализа динамических характеристик временных рядов обосновано, сам анализ проведен квалифицировано, интерпретация результатов в большинстве случаев вполне убедительна. Важным шагом данной работы вперед, по сравнению с большим числом исследований того же направления, является комплексность применения разных методов анализа и то, что увязываются и совместно интерпретируются различные по природе стороны иерархического самоподобия исследуемых структур и процессов. Особенно важно, что свойство самоподобия не просто фиксируется (как в большинстве работ данного направления), но его количественные характеристики используются для объяснения особенностей сейсмотектоники и геодинамики, в качестве основы для

развития моделей порождающих природных механизмов и процессов. Оппонент полагает особую ценность данной работы не в грамотном расчете соответствующих фрактальных характеристик, а именно в предпринятой автором серьезной попытке использовать новые методы исследования для содержательной интерпретации и понимания сути физических механизмов, лежащих за теми или иными исследуемыми явлениями или процессами.

Подводя итог следует еще раз подчеркнуть актуальность работы. Автором обобщен огромный литературный материал, проанализирован большой объем разнообразных геолого-геофизических данных. Защищаемые положения и сделанные в работе выводы достойно обоснованы. Результаты вычислений и выводы (интерпретации) автора представлены в публикациях по теме диссертации, среди которых 15 статей в журналах ВАК, 2 монографиях и в других научных работах (всего 57 публикаций). Автореферат соответствует содержанию диссертации. Работа прошла широкую апробацию на научных конференциях и семинарах. В целом работа отвечает необходимым критериям и положениям пункта 9, предъявленным к докторским диссертациям, а ее автор, В.С. Захаров, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

07.04.2014 г.

Главный научный сотрудник ИТПЗ РАН (институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН)
д.ф.-м.н. М.В.Родкин

Москва, 117997, Профсоюзная ул. 84/32
Раб. телефон 8 495 3333401
E-mail: rodkin@mitp.ru

Подпись гнс ИТПЗ
д.ф.-м.н. М.В.Родкина



удостоверяю,
Зам. директора ИТПЗ РАН,
к.ф.-м.н. И.В. Кузнецов



Отзыв
официального оппонента
на диссертацию Захарова Владимира Сергеевича
«Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам
фрактального и динамического анализа»,
представленной на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Работа Захарова Владимира Сергеевича направлена на выявление самоподобных свойств литосферы и процессов, происходящих в ней, на основе фрактального и динамического анализа для решения проблемы возможного прогноза состояния и динамики геологических систем.

Понятие фрактала ввел в геометрию французский ученый Бенуа Мандельброт для обозначения нерегулярных, но самоподобных фигур. Понятие фрактала включает такое представление о природе, в котором явления различных масштабов от микроскопических до гигантских повторяют друг друга в своих главных чертах. Фрактал образован повторением одной конфигурации в разных масштабах, так что его вид подобен самому себе вне зависимости от масштаба рассмотрения. **Но важное отличие природных фракталов от математических фракталов – это то, что самоподобие в них не абсолютно строгое.** Фрактальный подход, а также подход, основанный на теории динамических систем, оказался весьма плодотворным в различных областях знания, в том числе и в науках о Земле.

В.С. Захаров применил фрактальный анализ для изучения проявлений самоподобия структур литосферы, таких как континенты, плиты, террейны, отдельные массивы и блоки. Для анализа были разработаны различные методики построения дискретных кинематических моделей относительного движения отдельных блоков литосферы, для чего используются данные GPS, а возникающая при этом сейсмичность рассматривается как мгновенное проявление тектонических процессов, выражающееся в параметрах степенных законов.

Следует отметить, что В.С. Захаров является одним из ведущих специалистов в разработке методик построения дискретных кинематических моделей и выделения жестких блоков коры по данным GPS и их применении для изучения блоковой структуры ряда регионов, в анализе механизмов формирования близвертикальных сейсмофокальных структур – сейсмических «гвоздей»; он принимал активное участие в изучении самоподобия форм и размеров континентальных структур от суперконтинентов до террейнов. В.С. Захаровым проведен фрактальный и динамический анализ для исследования характеристик сейсмичности и сетей активных разломов, а также, что является новым, динамических характеристик временных рядов выделения сейсмической энергии и рядов GPS. Во всех исследованиях автор являлся инициатором их постановки или принимал в них активное участие, а также интерпретировал полученные результаты.

Перейдем к содержанию диссертации.

В главе 1 рассматриваются предмет исследования, состояние проблемы и методы анализа самоподобных свойства структур и процессов. В.С. Захаров рассматривает дискретность и самоподобие делимости литосферы Земли. Вывод автора о самоподобной иерархии блоковой делимости Земли основывается на фундаментальных исследованиях отечественных и зарубежных ученых (М.А.Садовского, Д.Тёркотта и других), определявших, что делимость горных пород обладает способностью образовывать иерархическую последовательность, связанную с автомодельностью процессов образования вещества литосферы в результате самоорганизации структур тектоносферы. Применяет автор диссертации и данные глобальной системы позиционирования (GPS) для выделения блоковых структур литосферы и изучения их кинематики, а также вычисления, по совокупности собранной информации по сети станций, их относительных движений и определения конфигурации и кинематики микроплит земной коры меньшего размера в пределах «жестких» плит.

Автор детально рассматривает понятия фрактала и фрактальной размерности, обосновывая применения фрактального анализа для исследования структур и динамики литосферы. Появление этого подхода, по мнению диссертанта, дает новое приближение для описания сложных объектов на языке математики, позволяет ввести количественные характеристики для самоподобия, представление о котором на качественном уровне вошло в разные области знания, в том числе и в науки о Земле. **В главе очень детально дан обзор направлений исследования недр Земли с применением математических методов анализа геодинамики литосферы. Это является обоснованием применения используемых в работе методов и последующей интерпретации результатов анализа.** Для реализации фрактального и динамического анализа Захаровым разработаны программы для вычисления фрактальной размерности и для фрактального анализа временных рядов.

В диссертации на защиту выносятся 4 защищаемые положения.

Первое защищаемое положение обосновывается во второй главе «**Самоподобие структур литосферы и коры от плит до блоков**». В этой главе В.С. Захаров применил фрактальный анализ для изучения проявлений самоподобия структур литосферы северного обрамления Тихого океана, включающих аккреционные призмы, континентальные окраины, кратоны, метаморфические комплексы, глубоководные впадины окраинных морей, офиолитовые пояса и островные дуги, разнородные террейны. Рассмотрены закономерности, описывающие иерархию структур коры и литосферы в широком диапазоне масштабов от тысяч до десятков километров. Для анализа самоподобных свойств террейнов использовались ГИС-проекты, объединяющие геологические, геофизические и тектонические данные. Установлено, что рассматриваемые террейны северного обрамления Тихого океана, крупные и мелкие, также подчиняются единым степенным законам и характеризуются близким значением фрактальной размерности. Делается вывод о принципиальном иерархическом самоподобии структур верхней геосферы Земли от суперконтинентов до отдельных террейнов и мелких блоков земной коры. Такая упорядоченность, по мнению В.С. Захарова, является результатом самоорганизации при образовании, движениях и распаде континентов вследствие глобальной динамики плит. **В целом первое**

защищаемое положение достаточно хорошо обосновано. Но, учитывая тот факт, что природные фракталы отличаются от математических, а самоподобие в них не абсолютно строгое, желательно уловить эти отличия на примере изучения геологических структур рассматриваемых регионов. Кроме того, было бы полезно сравнить результаты применения фрактального анализа для динамически различных регионов Охотского и Берингова морей, что дало бы возможность уточнить методику исследования.

Второе защищаемое положение раскрывается в главе 3 «Блоковая структура земной коры и модели относительных движений на основании анализа данных GPS». В этой главе автор применил разработанную им (совместно с Д.А.Симоновым) методику построения дискретных кинематических моделей по данным GPS для выделения блоков земной коры и определения их дифференциального движения в ряде регионов. Методика основана на анализе современных дискретных движений блоков геодинамически активных областей по данным GPS с учетом сферичности Земли. Методика опробовалась на примере детально изученных регионов, таких как Эгейско-Анатолийский регион, Калифорния и Япония, где В.С. Захаровым установлено более сложное блоковое строение регионов, выделены сейсмоопасные участки. Одним из наиболее интересных результатов является то, что в зоне асейсмичной части разлома Сан-Андреас выделена кинематически стабильная область, которая по данным GPS зажата с двух сторон согласованными движениями блоков земной коры, что может свидетельствовать о накоплении напряжений и возможности катастрофического землетрясения. Невозможность совершать горизонтальные движения в этой зоне разлома приводит к возникновению вертикальных движений, что фиксируется положительными гравитационными аномалиями. Второе защищаемое положение обосновано. Разработанная В.С. Захаровым методика изучения относительных движений по данным GPS с учетом сферичности Земли очень важна для исследования сейсмоопасных регионов, с ее помощью наиболее детально устанавливается блоковое строение изучаемых районов, определяются направления движения отдельных структур, а с применением других геологических и геофизических данных выделяются зоны повышенной сейсмичности.

Третье защищаемое положение раскрывается в главе 4 «Фрактальные и динамические характеристики сейсмического процесса», являющаяся продолжением предыдущей главы, посвящена рассмотрению проявлений самоподобия (фрактальности) сейсмического режима для различных регионов. Дана характеристика самоподобия сейсмичности и сетей активных разломов, прослежены особенности и механизмы генерации субвертикальных кластеров очагов землетрясений: во всех случаях, как считает В.С.Захаров, проявляется самоподобие сейсмического процесса, выражающееся в степенных законах, его характеризующих. Это указывает, что сейсмотектоническая система относится к классу систем с самоорганизованной критичностью, в которой реализуется детерминировано-хаотическое поведение. В результате исследований делается вывод, что степенной закон указывает на то, что катастрофические

землетрясения случаются редко, но для них не нужно искать специальный механизм — он тот же самый, что и для событий меньших масштабов.

В сейсмологии известен эмпирический закон Гуттенберга-Рихтера. Он связывает число и силу толчков степенным соотношением: при увеличении энергии землетрясений в 1000 раз (на 2 единицы магнитуды) количество событий такого масштаба уменьшается примерно в 100 раз. Отсюда вывод: большая часть всей выделяемой в литосфере сейсмической энергии приходится на небольшое число сильнейших событий. Именно они причиняют наибольший ущерб. Такой закон распределения встречается не только в сейсмологии, он действует в других областях: в физике и в обществе, что привело к понятию самоорганизованной критичности. Представляется, что сложные динамические системы, в частности земная кора, самопроизвольно эволюционируют в направлении критического состояния, в котором могут развиваться события самого разного масштаба. **Но на Земле есть и асейсмичные районы, вряд ли литосфера здесь находится в критическом состоянии. Следовательно, бывают разные степени критичности?**

Во многих сейсмоопасных регионах Земли В.С. Захаров, вслед за В.Н. Вадковским, выделил почти вертикальные, изометричные в плане, короткоживущие скопления гипоцентров землетрясений, которые были названы В.Н. Вадковским «сейсмическими «гвоздями». В результате исследований, как считает диссертант, установлено, что вертикальная протяженность сейсмических «гвоздей» составляет от 10 до 50 км, глубины до 90 км, большинство землетрясений в них слабые, их магнитуды не превышают 4.5–5. Формирование «гвоздя» происходит сразу во всем интервале глубин. Для некоторых «гвоздей» сильное ($M > 5$) землетрясение может выступать инициатором формирования. Выявлено, что часть таких сейсмофокальных структур связана с извержениями вулканов, а также с гидротермальной деятельностью. Для ряда сейсмических гвоздей не выявлена явная приуроченность положения сейсмических «гвоздей» к разломным зонам и другим тектоническим структурам.

Следует отметить важность открытия таких структур в литосфере Земли. В сейсмоопасных регионах образуются вертикальные структуры (трещины) в земной коре, которые используются магматическими и водными флюидами. **Но, по-видимому, эти структуры формируются, в основном, при субдукционном столкновении плит. Как следует из законов механики, при скоростном ударе в зоне контакта возникают значительные растягивающие напряжения, определяющие образование трещин, которые могут быть использованы флюидами для проникновения на поверхность. В целом обоснованность третьего защищаемого положения не вызывает сомнений.**

Четвертое защищаемое положение раскрывается в главах 5 и 6. В главе 5 «Динамические характеристики временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS и их связь с сейсмотектоникой» рассмотрены свойства сейсмотектонических систем на основании динамического анализа временных рядов смещений земной поверхности по данным GPS. Из записей временных рядов получена информация о динамических свойствах сейсмотектонической системы. При этом особо обращено внимание на короткопериодное «дрожание» (шум), наложенное на общий тренд. Все эти действия дали возможность рассмотреть «тонкую структуру» современных движений в литосфере. Выделенная шумовая компонента, по мнению В.С. Захарова, несёт

ценную информацию о характеристиках системы земной коры, генерирующей сложные блоковые движения. Важным результатом представляется установленная в работе закономерная связь динамических характеристик проанализированных рядов с сеймотектоническими особенностями районов. **Но не совсем ясно, как в таких исследованиях временных рядов GPS удаляется компонента не связанная с геодинамикой литосферных плит и отдельных блоков, а обусловленная разными другими факторами, например, экзогенными явлениями. Не учитывая этого фактора, исследования могут привести к неверным результатам.**

В заключительной главе 6 рассматриваются некоторые модели сейсмического режима и блоковой динамики, основанные на колебательной системе с нелинейным типичным законом трения, которые объясняют основные особенности сеймотектонических процессов. Делается вывод, что литосферные плиты, а также структурные зоны между ними, в свою очередь, не являются однородными, а обладают собственной, также иерархической, структурой, состоят из блоков меньшего масштаба, которые также могут совершать дифференциальные движения. Реологическая расслоенность литосферы контролирует глубину проникновения отдельных подвижных зон и обеспечивает возможность их перемещений друг относительно друга по ослабленным слоям. Это проявляется во взаимных движениях, фиксируемых геологическими и геодезическими (GPS) методами. Для объяснения особенностей сейсмического процесса используются сеймотектонические модели с нелинейным трением и их применения для блоковой динамики. В результате получается сложное взаимодействие блоков земной коры разного масштабного уровня. Эти геодинамические характеристики, по мнению В.С. Захарова, необходимо принимать во внимание при исследовании механизмов природных процессов в геологической среде, в частности, при составлении карт сейсмического районирования и сейсмической опасности, а также при моделировании геотектонических структур и процессов. Таким образом, четвертое защищаемое положение, которое подводит итог работы, хорошо обосновано.

Работа В.С. Захарова выполнена на высоком научном уровне. Тема диссертации актуальна, результаты характеризуются новизной и фундаментальностью. Детально разработано научное направление в исследовании недр Земли с применением математических методов анализа. **Использование математических методов является важным для совершенствования анализа геодинамики литосферы Земли, ее тектонического строения.** Показано, что самоподобные (фрактальные) свойства структуры литосферы является следствием самоорганизации в ходе ее эволюции. Выявлена связь количественных характеристик самоподобия с геодинамикой, тектоникой и особенностями сейсмического режима, а также предложены возможные механизмы и модели для объяснения этих особенностей. В.С. Захаров является одним из ведущих специалистов в применении методов фрактального и динамического анализа для исследования литосферы и происходящих в ней процессов. Выводы, рекомендации и защищаемые положения обоснованы детальными исследованиями и апробированы на международных и отечественных конференциях, а также изложены в 15 статьях в журналах из списка ВАК, 2 монографиях и других публикациях.

Теоретические разработки и фактические данные, изложенные в работе, включены в учебные курсы «Динамические системы и фракталы в геологии», «Геодинамика и математическое моделирование», «Компьютерное моделирование в геодинамике», которые В.С. Захаров читает на Геологическом факультете МГУ. Это представляется важным в свете внедрения новых методов исследований и анализа, в том числе количественных, в геологическое образование. Научная работа В.С. Захарова соответствует всем критериям, предъявляемым к докторским диссертациям (пункт 9 положения).

В.С.Захаров заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.03 – геотектоника и геодинамика.

02.04.2014

Доктор геолого-минералогических наук
Главный научный сотрудник Геофизического
центра Российской академии наук
119296, Москва, ул. Молодежная, д.3.
Тел. (495) 930-56-49
E-mail: rodnikov@wdcb.ru



Родников А.Г.