

УДК 551.24

ЭНЕРГЕТИКА ВЗАИМОСВЯЗИ ОБЪЕМНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ

© 2024 г. Ю. О. Кузьмин*

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия***E-mail: kuzmin@ifz.ru*

Представлены результаты сопоставительного анализа современных объемных деформаций и сейсмичности в разломных зонах сейсмоактивных (Копетдаг, Камчатка) и слабосейсмичных (Юго-Восток Татарстана) регионов. Показано, что существует обратная взаимосвязь энергетических характеристик деформационных и сейсмологических процессов в пространстве и во времени. Сделан вывод о том, что наблюдаемое противофазное поведение энергетических характеристик обусловлено поочередной реализацией объемной и сдвиговой части накопленной потенциальной энергии среды. Высказано предположение, что наличие более интенсивных объемных деформаций разломных зон платформенных, слабосейсмичных регионов обусловлено снижением доли реализации сдвиговой компоненты деформационной энергии вследствие пониженной сейсмической активности в этих регионах.

Ключевые слова: объемные деформации разломных зон, сейсмичность, геодезические наблюдения, удельная мощность деформационных и сейсмических процессов, сейсмоактивные регионы, слабосейсмичные области.

Для цитирования: Кузьмин Ю.О. Энергетика взаимосвязи объемных деформаций и сейсмичности в зонах разломов // Динамические процессы в геосферах. Т. 16. № 3. С. 63–73. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_63

Введение

Прошло 45 лет со времени публикации М. А. Садовским знаковой работы [Садовский, 1979], в которой была предложена новая модель геофизической среды – блочно-иерархическая модель горной породы. Базовым элементом этой модели является система блоков (отдельностей) среды, которая находится в открытом энергообмене с окружающей средой [Садовский, Болховитинов, Писаренко, 1987]. Блоки горной породы в этой системе отделяются друг от друга прослойками более измельченной породы, но которые так же состоят из блоков разных размеров меньшего масштаба.

Иными словами, в рамках данных представлений, в извечном дуализме «блок-разлом» доминирующим модельным объектом является блок. Зоны разломов в этом подходе также представлены блоками, но с существенно пониженными прочностными характеристиками.

Несмотря на значительные успехи новых представлений, возникло известное противоречие между результатами, полученными специалистами в области механики очага землетрясений, разломной тектоники и современной геодинамики, с одной стороны, и последователями новой модели геофизической среды, с другой.

Одним из наиболее существенных противоречий, выявленных в те годы, было несоответствие новой модели среды многочисленным результатам повторных геодезических, геофизических и геохимических наблюдений, полученным на геодинамических полигонах, расположенных в регионах с различным уровнем сейсмотектонического потенциала. Из этих результатов следовало, что наиболее интенсивные аномалии напряженно-деформируемого состояния и вариаций геофизических и геохимических полей, связаны с собственной, локальной активностью разломных зон [Сидоров, Кузьмин, 1989а]. Блоки при этом оставались в относительно пассивном кинематическом состоянии.

Характерны два принципиальных суждения М. А. Садовского по поводу результатов натуральных геодезических наблюдений за современной динамикой разломных зон. Первое: «Это не сдвиговые перемещения блоков по разломам». Второе: «Результаты парадоксально идентичны для сейсмоактивных и асейсмичных регионов». После этого он, с присущей ему мудростью и научной прозорливостью, предложил переход от понятия «дискретная геофизическая среда» к понятию «дискретные свойства геофизической среды», что позволило в существенной мере снять имеющиеся противоречия.

Этот подход нашел свое отражение при подготовке широко известного сборника научных трудов «Дискретные свойства геофизической среды» [Дискретные..., 1989]. В предисловии к этой работе М. А. Садовский, в частности, написал, что: «Дискретные свойства среды проявляются и в сравнительно медленно протекающих процессах деформирования горных масс, что находит отражение в дискретных (в пространстве и во времени) характеристиках современных движений земной коры по разломам». Для данного сборника автором (совместно с В. А. Сидоровым), по предложению М. А. Садовского и В. Ф. Писаренко, была специально подготовлена обобщающая статья по современной геодинамике разломов [Сидоров, Кузьмин, 19896].

На протяжении всех этих лет эти два принципиальных суждения получили дальнейшее развитие. Так, в специальном выпуске журнала Физика Земли, посвященном 100-летию со дня рождения М. А. Садовского, автором [Кузьмин, 2004] была опубликована работа, посвященная выявлению типов вертикальных смещений по разломам и анализу энергетических соотношений между локальными деформационными и сейсмическими процессами в различных сейсмоактивных регионах мира.

В предлагаемой статье проведенные ранее результаты обобщены с использованием данных, полученных в слабосейсмичном, платформенном регионе Юго-Востока Татарстана.

Современные объемные деформации разломных зон

Традиционно считается, что современные деформации разломных зон формируются сдвиговыми перемещениями. В зависимости от характера относительного смещения блоков и угла падения плоскости разломов они делятся на сбросы, взбросы, надвиги, сдвиги и переходные формы (сбросо-сдвиги, сдвиго-сбросы и т.п.). Согласно теории разломообразования Андерсона [Anderson, 1951] выделяются три основных типа разломов: сбросы (*normal faults*), сдвиги (*strike-slip faults*) и надвиги (*reverse faults*) [Turcotte, Shubert, 2002]. В соответствии с основами механики деформируемых сред все перечисленные типы разломов относятся к чисто сдвиговым перемещениям бортов.

Однако в механике разрушения существуют три основных механизма трещинообразования (моды разрушения): отрыв, продольный сдвиг и поперечный сдвиг (антиплоская деформация). Таким образом, существует всего два генетических типа разрушения: отрыв и сдвиг. Поэтому, в ряде работ по структурной геологии и геомеханике, кинематика движений по разломам описывается не только сдвигами, но и раздвигами (*tensile faults, joints*) [Гзовский, 1975; Шерман, 1977; Davis, 1983; Okada, 1985; Mandl, 2005; Peacock, 2016; Verma, Swaroop, Kumar, 2017].

Современные сдвиговые деформации разломных зон повсеместно регистрируются в виде косейсмических и постсейсмических движений в очаговых зонах сильных землетрясений [Кочарян, 2016; Scholz, 2019]. Современные деформации в зонах раздвиговых разломов (*tensile faults*) в форме локальных оседаний земной поверхности зафиксированы по результатам высокоточных нивелирных наблюдений в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах [Кузьмин, 1989; 1999; 2019; 2023]. Важно отметить, что большинство зарегистрированных аномалий относятся к флюидонасыщенным разломам, а кинематика вертикальных смещений представляет собой локальные, симметричные изгибы (вверх и вниз) в окрестности разломных зон.

Из основ механики деформируемой среды следует, что общая деформация состоит из двух составляющих: объемной и сдвиговой. В этом случае любые «не сдвиговые» деформации среды можно считать объемными. С этих позиций наблюдаемые симметричные, локальные оседания или поднятия земной поверхности являются проявлением объемных деформаций разломных зон.

Наличие флюидонасыщенных разломов в существенной мере определяет объемный тип деформирования разломных зон. В [Кузьмин, 2022] представлены результаты анализа ряда аномальных деформаций земной поверхности, которые основаны на представлениях о пороупругих включениях и неоднородностях, как модельных аналогов объемного деформирования разломных зон.

Наиболее полная информация о пространственно-временной структуре деформаций земной поверхности в зонах разломов получена на геодинамических полигонах, организованных в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах. Наблюдения на них проводятся в режиме повышенной пространственно-временной детальности, когда интервалы между повторными измерениями достигают 1 года и менее, а расстояния между пунктами измерений составляют длину 1.0 км и менее. Если использовать описанную выше типизацию разломов, то эти аномалии явным образом относятся к разломам, в которых активизируются локальные раздвиговые смещения [Кузьмин, 2019]. Аномалии вертикальных смещений земной поверхности типа S (вертикальные сдвиговые смещения), которые могли бы быть связаны с активизацией сбросовой, взбросовой или надвиговой компоненты смещений по разлому, наблюдаются крайне редко.

Повсеместный характер проявления аномалий γ типа (локальных оседаний) демонстрируется на рис. 1, где в одинаковом масштабе представлены примеры этих аномалий для различных регионов. Примечательно, что морфология и интенсивность аномалий практически идентичны как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных регионов. Более того, если сравнивать скорости относительных деформаций, то они окажутся даже несколько выше у асейсмичных разломов.

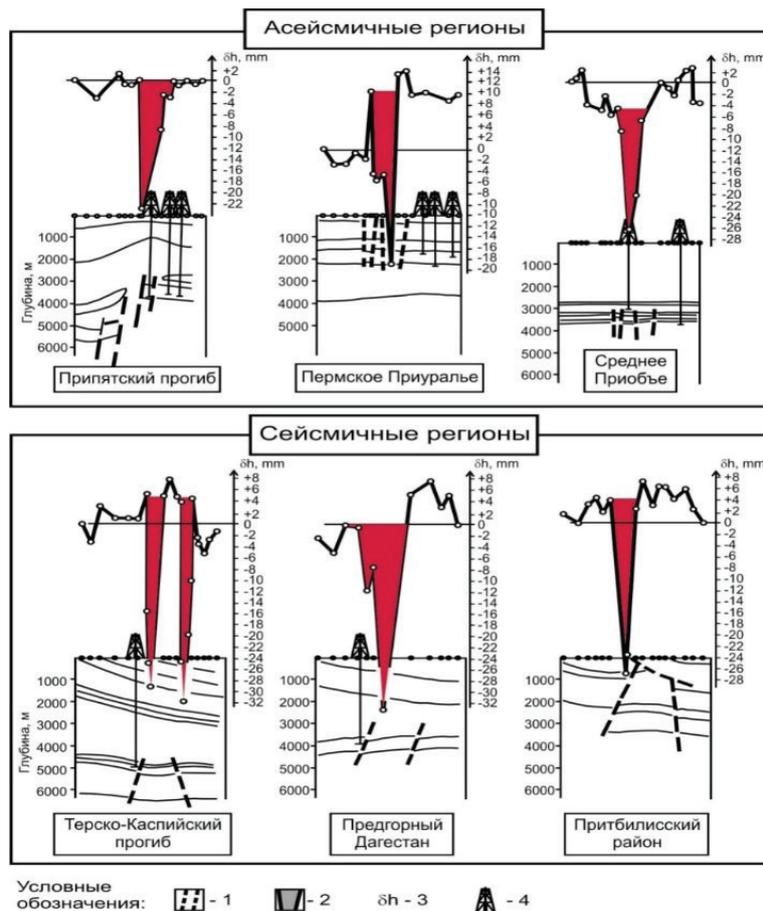


Рис. 1. Примеры локальных аномалий вертикальных движений γ типа для различных регионов: 1 – разломы, 2 – зоны аномальных смещений, 3 – амплитуды смещений, 4 – пробуренные скважины

При детальном рассмотрении видно, что некоторые аномалии, например, для Пермского Приуралья и Предгорного Дагестана обладают более сложной морфологией. Создается впечатление, что происходит эффект «смешивания» (наложения) двух соседних аномалий. Этот вопрос был детально рассмотрен в [Кузьмин, 2015], где введено понятие «смешанной» аномалии, которая обусловлена суперпозицией смещений от двух близко расположенных разломов.

Взаимосвязь деформационных и сейсмических процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе

Деформационные и сейсмические процессы являются двумя формами проявления современной геодинамической активности недр. Современные деформации, зачастую, определяют как «медленные» геодинамические процессы, в отличие от «быстрых» сейсмических.

Вместе с тем, нужно признать, что деформационные и сейсмические явления имеют существенные отличия. В особенности это касается массива исходных данных. Сейсмический каталог – это каталог конкретных событий (явлений). Каталог измеренных смещений – это каталог фрагментов деформационного явления, которое еще предстоит «собрать» и изучить. Например, каталог часовых измерений наклонов земной поверхности становится земным приливом только тогда, когда эти наблюдения будут проводиться в течение месяца с последующим проведением гармонического анализа. Дело здесь не в метрологии или статистической достоверности результатов, а в необходимости зарегистрировать и идентифицировать явление полностью. Тем не менее, между этими явлениями существует тесная взаимосвязь. Причем, это касается не только предсейсмических, косейсмических и постсейсмических процессов, где эта взаимосвязь очевидна. Ниже представлены результаты энергетического анализа взаимосвязи деформационных и сейсмических явлений на примере их реализации в конкретных разломных зонах Копетдагского сейсмоактивного региона.

Последовательное рассмотрение пространственно-временной структуры современных деформационных процессов на региональном, зональном и локальном уровнях показывает, что наиболее экстремальной формой является локальное проседание земной поверхности в зонах раздвиговых разломов. Эти аномальные движения (γ -аномалии) имеют чрезвычайно высокие скорости смещений (до $5 \div 7$ см/год) и относительных деформаций (до $5 \div 7 \cdot 10^{-5}$ /год). Именно поэтому они получили название суперинтенсивных деформаций (СД) земной поверхности [Кузьмин, 1999].

Однако наиболее парадоксальным фактом, как отмечал М. А. Садовский, явилось то, что аномальная деформационная активность разломных зон асейсмичных и слабосейсмичных областей выше, чем сейсмоактивных. Причем, это также относится и к зонам разломов, расположенных в сейсмоактивных регионах, но которые (разломы), либо не являются сейсмогенерирующими в принципе, либо находятся в данный момент в состоянии «сейсмического затишья» [Кузьмин, 1999; 2023].

Для более детального геодинамического анализа этих фактов ниже рассмотрены результаты специально поставленных многолетних исследований по изучению взаимосвязи между современными деформационными и сейсмическими процессами в пределах Предкопетдагского передового прогиба (сейсмоактивная зона) и южного склона Туранской плиты (слабосейсмичная зона) [Кузьмин, 1999]. На рис. 2А,Б представлен геодезический профиль (нивелирование), совмещенный с разрезом земной коры, который начинается на юге в горной части, затем пересекает прогиб и заканчивается на южном склоне Туранской платформы.

Оказалось, что по мере удаления от гор к платформе интенсивность деформационных процессов в зонах разломов увеличивается от $3 \cdot 10^{-6}$ /год до $3 \cdot 10^{-5}$ /год. Сейсмичность, напротив, имеет максимальное проявление в горной части и исчезает практически полностью за Северо-Ашхабадским разломом.

Для количественной оценки отмеченной взаимосвязи использовалась величина линейной мощности процессов N_L , которая вычисляется как отношение выделенной удельной энергии процессов к

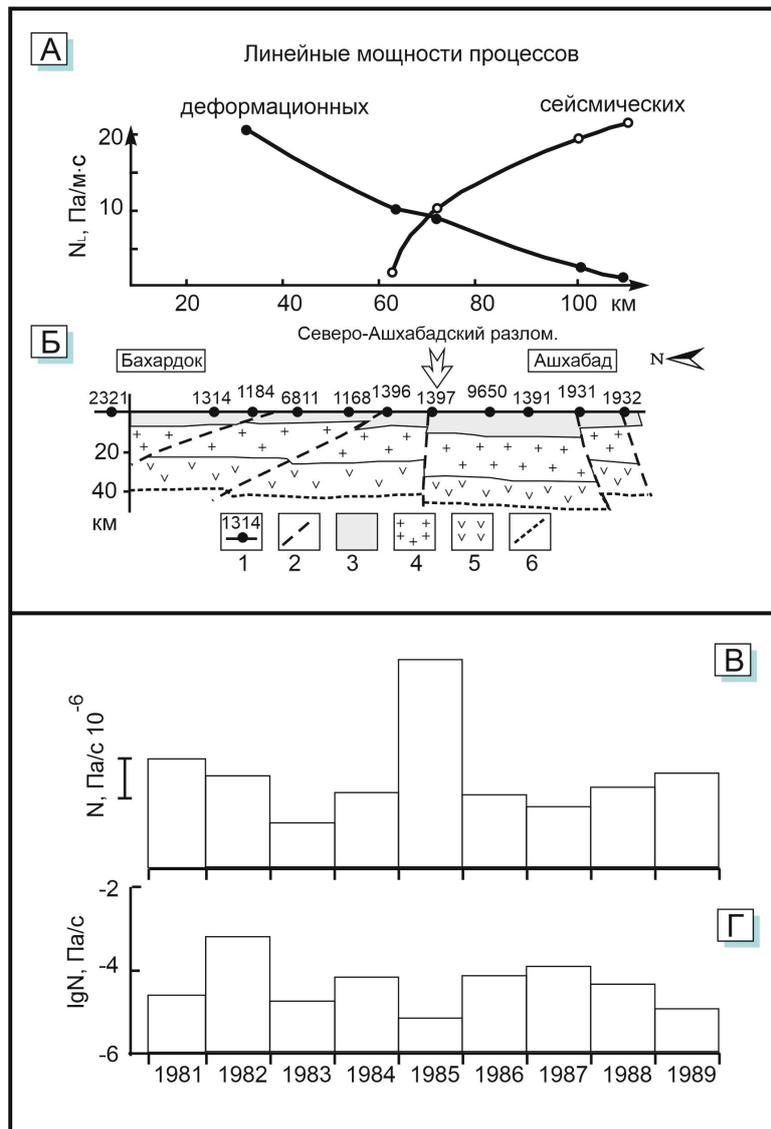


Рис. 2. Сопоставление энергетических характеристик современных деформационных и сейсмических процессов (А) по профилю Ашхабад – Бахардок (Б), графики удельной объёмной мощности деформационных (В) и сейсмических процессов (Г). Условные обозначения: 1 – номера пунктов нивелирования в аномальных зонах, 2 – глубинные разломы, 3 – осадочный чехол, 4 – граниты, 5 – базальты, 6 – граница Мохоровичича

выбранному интервалу времени (1 год) и фиксированной «полосе» профиля (50 км). Удельная потенциальная энергия деформационных процессов определяется как произведение половины приложенного регионального напряжения на изменение деформации в единице объема среды. Ее размерность выражается в Па. Тогда размерность удельной линейной мощности деформационных процессов определяется как [Па/м·с]. Аналогичным образом определяется и удельная линейная мощность сейсмических процессов. Более того, эта процедура была реализована именно потому, что распределение сейсмичности носит более распределенный (диффузный) характер, поле аномальных деформаций, в основном, локализовано в окрестности разломных зон. Но для того, чтобы адекватно сопоставлять энергетику этих процессов, методика оценки удельных мощностей была идентичной.

Так, например, скорости деформации $3 \cdot 10^{-5}$ /год соответствует линейная мощность в 20 Па/м·с. Этой величине соответствует сейсмическая энергия в 10^{13} Дж. Из рис. 2А следует, что в зоне Северо-Ашхабадского разлома уровни выделенной линейной мощности совпадают для обоих процессов. В зонах других разломов наблюдается попеременное превалирование одного параметра над другим.

Создается впечатление, что накопленный запас потенциальной энергии реализуется в зоне разлома в виде двух форм: «сейсмичности» и «деформаций». Причем существует общий для обеих форм реализации единый энергетический эквивалент.

Для проверки данного утверждения было проанализировано соотношение между деформационным и сейсмическим процессами в пределах одной разломной зоны – Северо-Ашхабадской (рис. 2В,Г), в течение достаточно продолжительного интервала времени. Учитывая, что в данном случае имеет место изолированный объект, в качестве обобщенной энергетической характеристики процессов использовалась величина среднегодовой удельной объемной мощности N , измеряемая в Па/с.

Эта величина в случае деформационных процессов равна половине произведения величины регионального напряжения на скорость деформирования земной поверхности. Для сейсмичности N определяется как отношение выделившейся сейсмической энергии к интервалу времени и среднему объему сейсмического излучения. Как видно и в этом случае происходит противофазное поведение сопоставляемых параметров.

Среднее значение годовой реализации удельной объемной мощности по обоим параметрам за весь период наблюдений составляет величину порядка 10^{-5} Па/с, что вновь соответствует полученной ранее оценке по профильным данным.

Взаимосвязь деформационных и сейсмических процессов в Камчатском сейсмоактивном регионе

Аналогичные результаты были получены на локальном нивелирном профиле длиной 2.6 км. Расположен он в пределах Камчатского сейсмоактивного региона, где были проведены прецизионные, многократные (1–2 повторения в неделю в течение почти 3-х лет) и детальные (расстояние между пунктами наблюдений $80 \div 100$ м) нивелирные наблюдения [Churikov, Kuzmin 1998].

На рис. 3 представлены результаты сопоставления выделившейся сейсмической энергии со значениями среднемесячных скоростей вертикальных смещений земной поверхности. Необходимо отметить, что в данном случае учитывалось то обстоятельство, что при сопоставлении параметров сейсмического режима с данными относительных (в пространстве) измерений возникает проблема совмещения информации на временных графиках.

Дело в том, что наиболее часто используемые параметры сейсмического режима (энергетика и количество сейсмических событий) занимают, по определению, положительную часть оси ординат. Кривые же вертикальных и горизонтальных смещений, деформаций и наклонов могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. В связи с этим, для сопоставления с временным ходом энергии сейсмических процессов использовались среднемесячные значения скорости деформаций, взятые по абсолютной величине. В эту процедуру вкладывался и определенный физический смысл. Суть в том, что при поднятиях и опусканиях земной поверхности (при сжатиях и растяжениях, наклонах на север и юг и т.д.) в равной мере происходит реализация накопленной потенциальной энергии в виде деформаций любого знака.

Сопоставление скоростей деформаций для отдельных станций (секций профиля), расположенных в зонах разрывных нарушений, и для станций, находящихся вне разрывных нарушений с сейсмическим режимом, показывает (рис. 3):

1. Для секций нивелирного профиля, расположенных в зонах разрывных нарушений (рис. 3а,б), характерно противофазное поведение сопоставляемых параметров. Увеличению скорости деформаций соответствуют минимумы сейсмической активности (сейсмические затишья) и наоборот;

2. Имеет место синфазное поведение параметров в период с ноября 1991 по май 1992 г., которые отождествляются с предвестником землетрясения, произошедшего 2 марта 1992 г. с $M = 7.1$ на расстоянии 100 км от нивелирного профиля на глубине 20 км. Амплитуда предвестниковой аномалии достигает величины от $5 \div 6$ до $10 \div 13$ см на различных участках профиля;

3. Интервал слабоамплитудных аномалий на блоковых участках профиля (рис. 3в,г) характеризуется только одной аномальной ситуацией, которая приурочена к землетрясению 2 марта 1992 г. ($M = 7.0$).

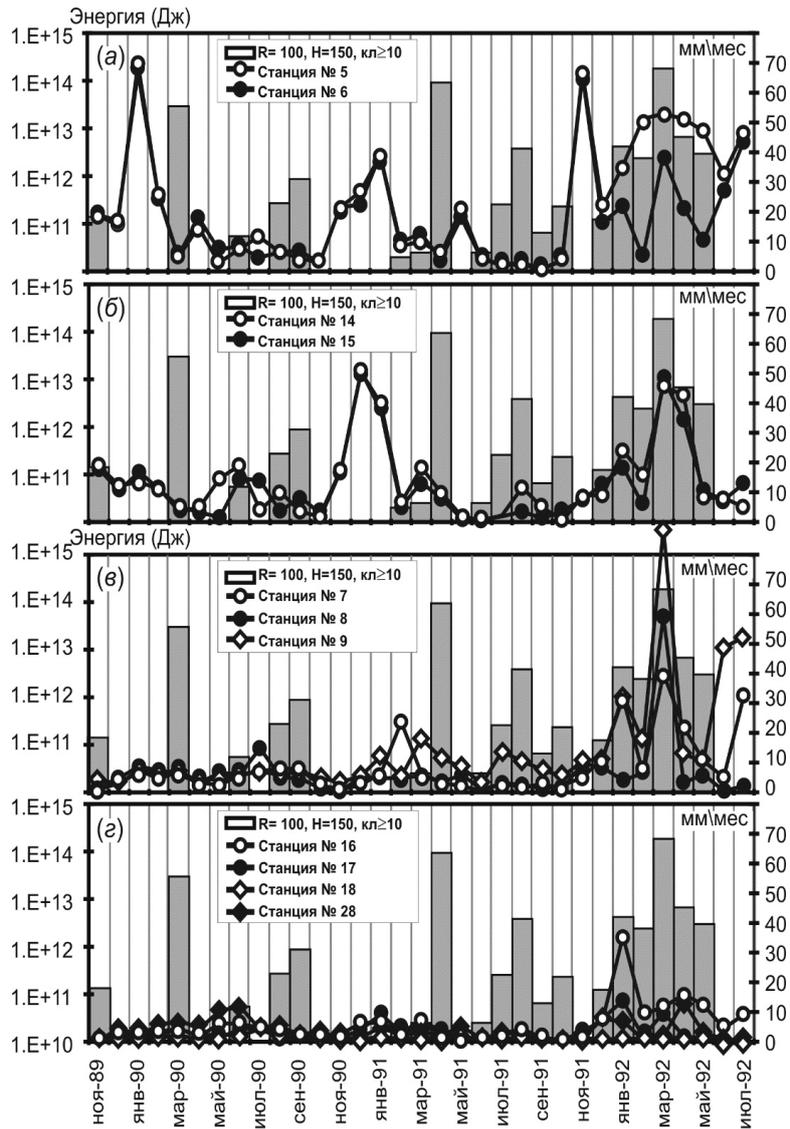


Рис. 3. Сопоставление выделившейся сейсмической энергии и скорости вертикальных смещений, осредненных по месяцам (обозначения приведены в тексте)

Таким образом, наблюдаемые «перетоки» одной формы реализации накопленной потенциальной энергии (объемные деформации) в другую (сейсмичность) представляют собой поочередную или преимущественную реализацию объемной или сдвиговой составляющей общего потенциального энергетического запаса среды в зонах активных разломов.

Взаимосвязь деформационных и сейсмических процессов в нефтедобывающих районах юго-востока Татарстана

Аналогичная закономерность взаимосвязи деформационных и сейсмических процессов была обнаружена по результатам геодинимического мониторинга объектов нефтегазового комплекса на Юго-Востоке Татарстана. Развитая сейсмологическая и геодезическая сети комплексного геодинимического полигона, организованного ПАО «Татнефть», позволили изучить детальное пространственное распределение зон деформационной активности разломов и областей локализации очагов местных землетрясений [Хисамов и др., 2012; Кузьмин, 2021; Рахматуллин и др., 2024].

На рис. 4 представлена схема распределения областей проявления деформационной и сейсмической активности в пределах гигантского Ромашкинского и Ново-Елховского месторождений нефти.

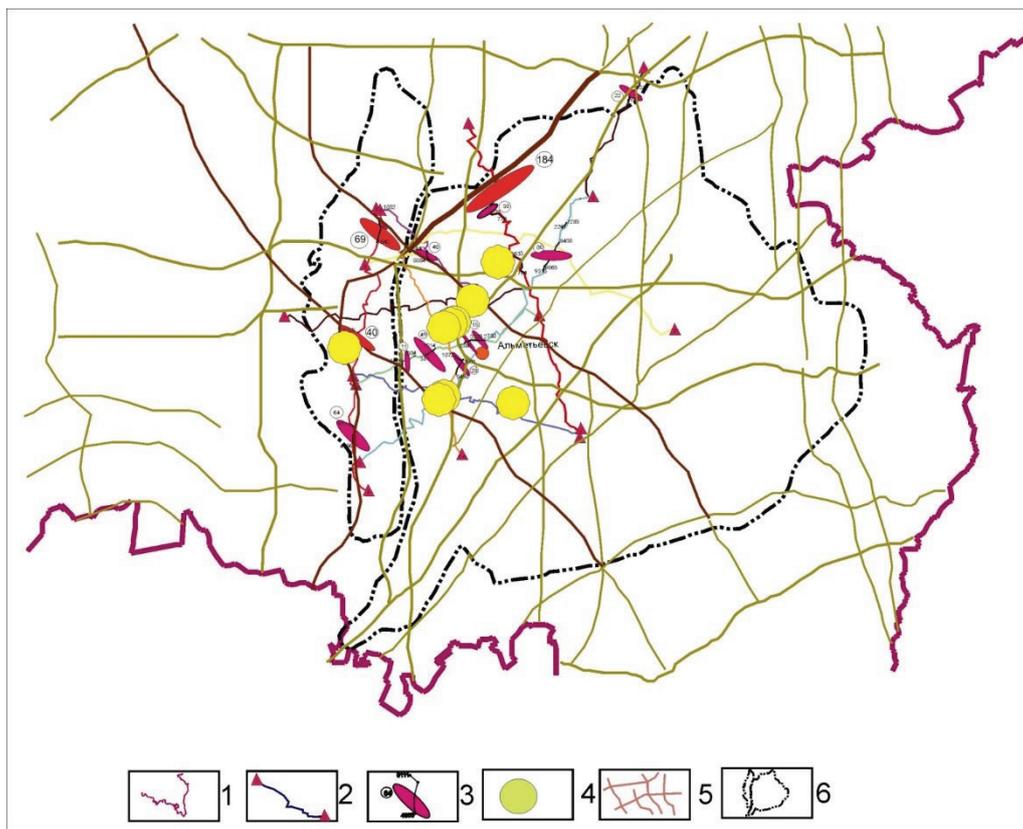


Рис. 4. Схема распределения областей повышенной деформационной и сейсмической активизации недр на Юго-Востоке Татарстана. Условные обозначения: 1 – граница Республики Татарстан; 2 – расположение нивелирных профилей; 3 – области проявления аномальных деформаций (типа γ); 4 – зоны локализации сейсмических очагов; 5 – разломы фундамента; 6 – границы Ромашкинского и Ново-Елховского месторождений

Как следует из представленной схемы области аномальной деформационной активности не совпадают по местоположению с зонами локализации сейсмичности. Создается впечатление, что деформационные и сейсмические процессы «избегают» друг друга. В тех местах, где энергия разряжается в форме деформаций очагов землетрясений не наблюдается и наоборот. Здесь вновь проявляется поочередная реализация различных форм накопленной энергии, но очередность происходит пространственным образом. Действительно, если рассматривать схему сверху вниз, то видно, как сначала проявляется деформационная активность, затем сейсмическая и так далее.

Таким образом, механизм поочередной реализации объемной и сдвиговой части общей накопленной потенциальной энергии проявляется во всех формах пространственно-временной организации современных геодинамических процессов.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показывают, что в период снижения сейсмической активности в регионе начинают активизироваться деформационные процессы в зонах разрывных нарушений и наоборот. А в период подготовки сильнейшего, за период наблюдений, сейсмического события, например, в Камчатском регионе, сопоставляемые параметры меняются одновременно [Кузьмин 1999].

В этой связи есть достаточно оснований полагать, что наличие более мощных деформационных процессов в зонах платформенных, асейсмичных разломов обусловлено отсутствием там диссипирующего (рассеивающего) сейсмического фактора, который в сейсмоактивных разломах осуществляет «переток» части общего энергетического эквивалента в форму сейсмичности, уменьшая тем самым ту часть потенциальной энергии, которая реализуется в форме деформаций.

Данное утверждение допускает естественное физическое толкование, если учесть, что общая потенциальная энергия деформируемой среды U состоит из энергии чисто объемной деформации U_v и чисто сдвиговой U_s [Sokolnikoff, 1956]:

$$U = U_v + U_s. \quad (1)$$

Так как сейсмический процесс происходит путем реализации существенно сдвиговых деформаций, то в сейсмоактивных разломах $U_s > U_v$. В асейсмичных разломных зонах накопленный запас потенциальной энергии реализуется в основном за счет деформационных аномалий, которые являются отражением локальных объемных деформаций, и в этом случае $U_s < U_v$.

Прямым экспериментальным подтверждением этих соображений является крайне малое число зарегистрированных S -аномалий (особенно в платформенных, асейсмичных регионах), которые формируются путем локальных сдвиговых подвижек по разлому.

Таким образом, механизм поочередной реализации объемной и сдвиговой части общей накопленной потенциальной энергии проявляется во всех формах пространственно-временной организации современных геодинамических процессов.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что естественное физическое предположение – наличие объемных деформаций в зонах разломов и проявление сдвиговых деформаций в сейсмических процессах, которые являются отражением двух форм реализации накопленной потенциальной энергии среды, находит свое подтверждение в целом ряде натуральных измерений современных геодинамических процессов, проведенных в регионах с принципиально различным уровнем сеймотектонической активности. В этой связи, можно еще раз констатировать, что незаурядная проницательность М. А. Садовского в очередной раз способствовала развитию новых представлений о динамике геофизической среды, которые представлены в данной работе.

Финансирование

*Работа выполнена в рамках государственного задания
Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.*

Список литературы

- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. : Наука. 1975. – 536 с.
- Дискретные свойства геофизической среды / Под ред. М. А. Садовского. М. : Наука. 1989. – 174 с.
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 432 с. <https://elibrary.ru/yvwlrw>
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений // Прогноз землетрясений. № 11 . М.; Душанбе : Дониш. 1989. С. 52–60. <https://elibrary.ru/wgaavz>
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М. : Агентство Экономических Новостей. 1999. – 220 с. <https://elibrary.ru/wfpmkp>
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон // Физика Земли. 2004. № 10. С. 95–112. <https://elibrary.ru/oxkdcr>
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. 2015. № 4. С. 25–30. <https://doi.org/10.7868/S0002333715040055>
- Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019. № 5. С. 61–75. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019561-75>
- Кузьмин Ю.О. Деформационные последствия разработки месторождений нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 4. С. 103–121. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.4-7>
- Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. № 4. С. 3–18. <https://doi.org/10.31857/S0002333722040068>

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика индуцированных разломов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 3. С. 5–65. <https://doi.org/10.21455/GPB2023.3-1>

Рахматуллин М.Х., Сахаутдинов Р.В., Кузьмин Ю.О. Организация сейсмического мониторинга в нефтедобывающих районах Республики Татарстан // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23. № 2. С. 40–55. <https://doi.org/10.21455/GPB2024.2-4>

Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М. : Наука. 1987. – 101 с.

Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М. : Наука. 1989а. – 183 с.

Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Пространственно-временные характеристики динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей. Дискретные свойства геофизической среды / Под ред. М. А Садовского. М.: Наука. 1989б. С. 33–17.

Хисамов Р.С, Гатиятуллин Н.С., Кузьмин Ю.О. и др. Современная геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана / Под редакцией Р. С. Хисамова, Ю. О. Кузьмина. Казань : «Фэн». 2012. – 240 с.

Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск : Наука 1977. – 102 с.

Anderson E.M. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. Oliver and Boyd. 1951. 2nd Edition, 133147. Edinburg.

Churikov V.A., Kuzmin Yu.O. Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia // Geophysical. Journal. Intern. 1998. Vol. 133. P. 607–614. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00511.x>

Davis, P.M. Surface deformation associated with a dipping hydrofracture // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88. P. 5826–5834. <https://doi.org/10.1029/JB088IB07P05826>

Mandl G. Rock Joints. The Mechanical Genesis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2005. <https://doi.org/10.1007/b137623>

Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismol. Soc. Am. 1985. Vol. 75. P. 1135–1154. <https://www.doi.org/10.1785/BSSA0750041135>

Peacock D.C.P. et al. Glossary of fault and other fracture networks // Journal of Structural Geology. 2016. Vol. 92. P. 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.008>

Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge Univ. Press. 2019. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511818516>

Sokolnikoff S. Mathematical Theory of Elasticity. McGraw-Hill. 1956. 2nd Edition. New York.

Turcotte D.L., Shubert G. Geodynamics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807442>

Verma H., Swaroop R., Kumar V. Deformation of poroelastic half-space due to tensile dislocation // Int. J. Eng. Sciences & Res. Technology. 2017. Vol. 6 (12). P. 115–124. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.2410>

ENERGY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN VOLUMETRIC DEFORMATIONS AND SEISMICITY IN FAULT ZONES

© 2024 Yu. O. Kuzmin*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kuzmin@ifz.ru*

The results of comparative analysis of modern volumetric deformations and seismicity in fault zones of seismically active (Kopetdag, Kamchatka) and weakly seismic (South-East of Tatarstan) regions are presented. It is shown that there is an inverse relationship between the energy characteristics of deformation and seismological processes in space and time. It is concluded that the observed antiphase behavior of energy characteristics is due to the alternate realization of the volumetric and shear parts of the accumulated potential energy of the medium. It is suggested that the presence of more intense volumetric deformations of fault zones of platform, weakly seismic regions is due to a decrease in the share of realization of the shear component of deformation energy due to reduced seismic activity in these regions.

Keywords: volumetric deformations of fault zones, seismicity, geodetic observations, specific power of deformation and seismic processes, seismically active regions, weakly seismic areas.