

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

© 2019 г. Ю. О. Кузьмин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: kuzmin@ifz.ru

Поступила в редакцию 22.01.2019 г.

Принята в печать 25.03.2019 г.

Представлены эмпирические данные по исследованию деформаций земной поверхности в разломных зонах, индуцированных экзогенными, эндогенными и техногенными воздействиями.

Предлагается для анализа индуцированных деформаций разломных зон, обусловленных различными воздействиями, использовать единый подход – представления о параметрическом возбуждении процессов. Рассмотрены два варианта (типа) формирования индуцированных явлений. Согласно первому варианту деформационная реакция разломов осуществляется линейным образом, когда воздействие напрямую вынуждают разлом деформироваться. Второй вариант – это нелинейный параметрический усилитель, когда деформационная реакция разломной зоны оказывается аномально высокой и индуцируется (возбуждается) малыми воздействиями.

В соответствии с этим подходом даны определения экзогенно-индуцированных, эндогенно-индуцированных и техногенно-индуцированных деформаций разломных зон. Приведены примеры, когда в пределах единой измерительной системы одновременно регистрируются оба варианта формирования процессов, например, экзогенные и экзогенно-индуцированные деформации земной поверхности.

Ключевые слова: индуцирование, техногенно-индуцированные деформации, техногенные землетрясения, разломная зона, параметрическое возбуждение.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019561-75>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время целенаправленные исследования индуцированных геодинамических процессов проводятся, в первую очередь, на основе детального анализа сейсмологической информации. Только за последнее десятилетие были опубликованы обобщающие работы по изучению индуцированной сейсмичности в районах интенсивной разработки месторождений полезных ископаемых, при заполнении крупных водохранилищ, эксплуатации гидротермальных источников [Адушкин, Турунтаев, 2015; Смирнов и др., 2018; Михайлов и др., 2018; Shapiro, 2015; Johnson et al., 2017; Wang, Manga, 2015; и др.].

Вместе с тем, целенаправленное исследование индуцированных деформаций, особенно в зонах разломов, в настоящее время практически не проводится. Исключение составляют работы по изучению оседаний земной поверхности в районах интенсивного освоения месторождений нефти и газа [Кузьмин и др., 2018;

Кузьмин, 2019; Marketos et al., 2015; Mahrabian et al., 2015; Ma Zobak, 2017; и др.]. Изучение индуцированных деформаций разломных зон, которые не связаны с сейсмическими процессами проводится крайне редко. Тем более, практически отсутствуют исследования, посвященные сравнительному анализу деформаций земной поверхности в зонах разломов, когда индуцирование (возбуждение) происходит под влиянием эндогенных, экзогенных или техногенных факторов.

Проведение такого анализа очень важно как для фундаментальных исследований индуцированных процессов, которые являются частью общего мира нелинейных физических явлений, так и для практических приложений результатов геодинамического мониторинга ответственных объектов.

Другой важный аспект этих исследований касается определения самого термина «индуцирование» и установления механизмов формирования этого явления. Очень часто синонимами

индуцированных явлений оказываются инициированные, триггерные и переходные процессы. Однако детальный анализ показывает, что эти определения могут характеризовать принципиально разные по физической природе явления.

В данной работе приводятся примеры индуцированных деформаций разломных зон, которые возбуждаются различными воздействиями, такими, например, как выпадение атмосферных осадков, подготовка тектонических землетрясений и эксплуатация подземных хранилищ газа, и обсуждаются механизмы формирования этих явлений. Принципиально важно, что различные типы индуцирования рассматриваются на основе результатов, полученных единичными системами измерений, когда одна и та же система наблюдений фиксирует разные варианты индуцированных деформаций одновременно.

ДВЕ ФОРМЫ ИНДУЦИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Индуцирование как явление можно понимать в виде двух форм проявления причинно-следственных связей между различными процессами. Любую, например, механическую систему, можно вывести из состояния равновесия двумя способами. В первом случае индуцирование — это вынуждение (*forced*), аналогично происхождению вынужденных колебаний (*forced oscillations*). Во втором случае — это наведенные процессы (*induced processes*), когда выведение из равновесия механических систем осуществляются малыми, иногда «неочевидными» воздействиями (*influences*). Во введении своей книги «Материя и движение» Дж. К. Максвелл писал «... бывают случаи, в которых небольшое начальное изменение может произвести очень большие изменения в конечном состоянии системы...» [Maxwell, 1888]. В этом смысле закон электромагнитной индукции, индуцированное излучение, индуцированные шумом фазовые переходы — это примеры таких воздействий.

Эти две формы индуцированных явлений можно детально продемонстрировать на примере формирования современных аномальных деформаций земной поверхности в зонах разломов. Современное геодинамическое (сейсмическое и деформационное) состояние недр обусловлено совокупностью природных и техногенных воздействий. В свою очередь, природные воздействия подразделяются по отношению к приповерхностному слою на эндогенные (внутренние) и экзогенные (внешние). Техногенные

(антропогенные) воздействия на недра распределены в достаточно узком слое среды, поэтому проводить их разделение на внутренние и внешние не представляется целесообразным. По масштабам проявления любые воздействия могут быть глобальными, региональными, зональными и локальными.

Кроме этого, важно отметить, что воздействие на любую физическую систему может происходить либо приложением сил, либо за счет изменения поля (теплового, магнитного, электрического), в которое помещена система. В современной геодинамике в результате силового воздействия, например, формируются аномальные деформации земной поверхности, возникающие из-за флуктуаций атмосферного давления. Полевое воздействие — это, к примеру, тепловые деформации, определяемые неравномерным распределением температуры земной поверхности.

Согласно феноменологическому подходу любая изолированная система находится в стационарном состоянии до тех пор, пока существует изоляция. Есть только единственная возможность вывести изолированную систему из состояния равновесия — снять изоляцию. Учитывая, что разломные зоны как области повышенной трещиноватости являются зонами «нарушения изоляции» между объектом наблюдения и окружающей средой, именно эти зоны обеспечивают режим наибольшего благоприятствования для любых воздействий при выводе системы из состояния равновесия.

Поэтому две формы индуцированных процессов в разломах можно наглядно проиллюстрировать на примере феномена резкого усиления (на 2–3 порядка) среднегодовых скоростей локальных относительных деформаций в зонах платформенных разломов по сравнению с фоновыми скоростями.

На рис. 1 представлена принципиальная схема формирования современного геодинамического состояния недр.

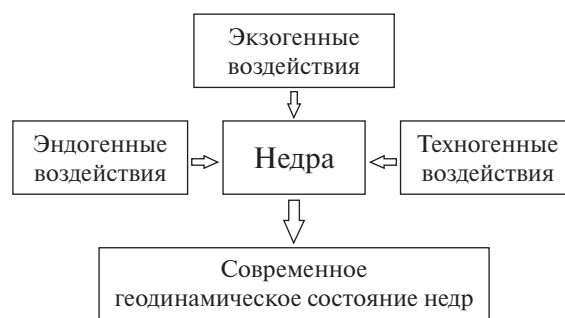


Рис. 1. Схема формирования современного геодинамического состояния недр.

Согласно традиционным представлениям динамика разломов обусловлена силовым воздействием меняющихся во времени глобальных и региональных тектонических напряжений (эндогенное воздействие), которое вызывает (forced) сдвиговые (или раздвиговые) перемещения смежных объемов (блоков) среды, локализованные в пределах разломных зон. В этом случае уровень приложенного воздействия (нагрузки) должен быть соизмерим с уровнем деформационного отклика вмещающей разлом среды.

В предыдущих работах автора [Кузьмин, 1996; 1999; 2002; 2004] был описан факт существования суперинтенсивных деформации в зонах платформенных разломов со среднегодовыми скоростями относительной деформации ($5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$)/год. Этот факт подтверждает известный «парадокс больших скоростей современных движений» [Буланже, Магницкий, 1974]. По существу, «парадокс больших скоростей» представляет собой инструментально установленный факт отклонения от унаследованного характера современных движений коры от движений прошлых геологических эпох [Кузьмин, 2009; 2013].

С другой стороны, анализ длительных (20–50 лет) рядов наблюдений за современными вертикальными и горизонтальными движениями земной поверхности в таких активных регионах как Камчатка, Калифорния и Копетдаг [Изюмов, Кузьмин, 2014; Кузьмин, 2013; 2014; 2017] показал, что среднегодовые региональные скорости (вне зон разломов) относительных деформаций по данным многолетних геодезических измерений соизмеримы с аналогичными параметрами в районах умеренной и слабой сейсмичности [Галаганов и др., 2016; 2017; Хисамов и др., 2012] и составляют величины $10^{-8} - 10^{-9}$ в год, что равно изменению в 2–3 амплитуды земноприливных деформаций и меньше! То есть в сейсмоактивных регионах обнаруживается «парадокс малых скоростей деформаций». Это означает, что локальные аномалии деформаций в разломных зонах формируются на фоне квазистатического регионального напряженно-деформированного состояния.

В этом случае возникает «разломно-блоковая» дилемма при интерпретации результатов наблюдений в современной геодинамике разломов. Либо активным элементом, создающим современные аномальные деформации, является блок, а разлом выступает в качестве «пассивного» элемента, либо зона разлома сама является источником аномальных движений, а блоки яв-

ляются пассивными элементами – вмещающей средой.

Принципиально важным при установлении механизма формирования деформационных процессов в зонах разломов является определение типа граничных условий. Как следует из основ физики деформируемых сред с дефектами, процесс нагружения деформируемой среды может быть осуществлен двумя путями: «мягким» и «жестким». В случае «мягкого» нагружения деформационные процессы развиваются в обстановке фиксированных, квазистатических нагрузок (напряжений). В опытах с образцами горных пород эта схема соответствует испытаниям на ползучесть. При реализации «жесткой» схемы фиксированными являются смещения (деформации). В этой схеме нагружения реализуется заданная программа фиксированных (ступенчатых) смещений нагружающих элементов пресса. В первой схеме нулевой является скорость изменения напряжений (нагрузок) ($\dot{\sigma} = 0$), а во второй – скорость деформаций ($\dot{\epsilon} = 0$).

Можно легко показать, что накопление энергии и концентрация напряженно-деформированного состояния в случае «мягкой» схемы нагружения происходит в пределах «мягких» включений – областей пониженной жесткости среды. В случае «жесткой» схемы накопление энергии происходит в пределах «жестких» включений – областей повышенной жесткости среды. Разломные зоны, в основном, являются «мягкими» включениями в более жесткую вмещающую среду. Тогда факт локализации деформаций в разломе отражает «мягкий» характер нагружения [Кузьмин, 2013; 2015; 2016; 2018a; б].

Из теории колебаний хорошо известно, что любую систему можно вывести из состояния равновесия (возбудить систему) двояким образом: либо посредством внешнего силового воздействия на систему в целом, либо путем возмущений внутренних параметров системы, предварительно нагруженной извне. Такой тип вывода системы из состояния равновесия назван в физике **параметрическим** возбуждением [Andronov, Chaikin, 1949].

В предыдущих работах автора (Кузьмин, 1996; 1999; 2004) показано, что аномальные деформационные процессы в зонах разломов, которые происходят в обстановке региональных квазистатических полей напряжений, обусловлены флуктуациями внутренних параметров среды (коэффициентов жесткости, трения и др.) внутри самих разломных зон, то есть являются

ся примером параметрического возбуждения (индуцирования).

Оказалось, что возникновение anomalно высоких деформаций земной поверхности в зонах разломов индуцируются малыми внешними воздействиями [Кузьмин, 1999; 2002; 2019]. Энергетика возникновения этих процессов представляется следующим образом. Существующие в геологической среде длительное время региональные, квазистатические силы (напряжения) тектонического и гравитационного генезиса производят работу на локальных перемещениях (деформациях), обусловленными *малыми*, индуцированными воздействиями на внутренние параметры (жесткость, коэффициент трения, поровое давление и др.) среды разломных зон. Именно поэтому эти деформации названы параметрическими. Тогда современные суперинтенсивные деформации (СД) разломных зон – это параметрически индуцированные тектонические деформации [Кузьмин, 1999]. Из вышеизложенного следует, что существуют два варианта формирования явления резкого усиления локальных деформационных аномалий в зонах разломов (рис. 2):

Вариант I – зона разлома представляет собой ослабленный участок среды, вдоль которого происходят движения блоков, напрямую обусловленные вариациями во времени поля напряжений. Этот вариант представляет собой типичный линейный усилитель деформаций, когда внешние воздействия усиливаются за счет пониженной жесткости разломной зоны. Однако,

чтобы объяснить усиление на 2–3 порядка наблюдаемых скоростей деформаций в разломе, необходимо, чтобы коэффициент жесткости разломной зоны должен быть на 2–3 порядка меньше, чем в окружающей среде. Тогда, например, приливные деформации в зонах разломов должны достигать величин 10^{-5} – 10^{-6} . Подобные величины *никогда не выявлялись* по многочисленным и многолетним инструментальным наблюдениям земноприливных наклонов и деформаций.

В *варианте II* реализуется механизм параметрического возбуждения anomalных деформаций в зоне разлома. В этом случае региональное поле напряжений квазистационарно, а разломная зона – представляет собой параметрически возбудимую (малыми воздействиями) активную среду. Тогда разломная зона представляет собой нелинейный параметрический усилитель деформаций. Здесь важно отметить, что малые воздействия различной природы выводят из состояния равновесия (*индуцируют*) значительные глобальные и региональные силы, которые и производят эффект нелинейного усиления деформаций.

Очевидно, что локальные деформационные процессы, регистрируемые многократными детальными геодезическими наблюдениями в зонах разломов, обусловлены «внутренними» источниками (параметрическими деформациями), а региональные процессы обеспечивают квазистатический фон приложенных напряжений, характер которых определяет конкретную

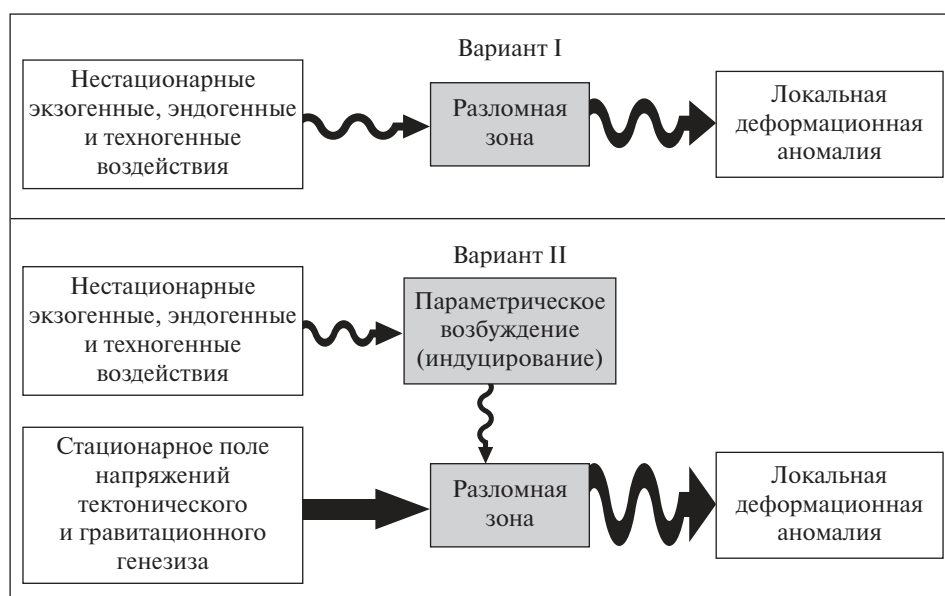


Рис. 2. Схема формирования параметрически индуцированных деформаций в зонах разломов.

морфологию аномалий. Очень важно отметить, что для возникновения наблюдаемых величин аномальных деформаций ($5 \cdot 10^{-5}/\text{год} - 10^{-4}/\text{год}$) достаточно создать условия для изменения во времени всего на **несколько первых процентов** жесткостных характеристик (упругих модулей) в локальных фрагментах изначально напряженных, разломных зон.

Ниже последовательно показана реализация предложенной схемы формирования индуцированных деформаций в разломных зонах под влиянием экзогенных, эндогенных и техногенных воздействий, соответственно.

ЭКЗОГЕННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

На рис. 3 приведены результаты многолетних деформационных наблюдений в зоне Передового разлома Копетдага (Ашхабадского разлома).

Это результаты высокоточных, прецизионных нивелирных наблюдений, которые проводились с повышенной пространственно-временной детальностью (расстояние между реперами 250–300 м, частота опроса – 1 раз в месяц). Профиль общей протяженностью 14 км пересекает разломную зону, которая выявлена по целому комплексу геолого-геофизических и гидрогеологических параметров и расположен вблизи г. Ашхабад.

Для детального анализа современных деформаций разломной зоны результаты нивелирования сопоставлялись с данными непрерывных наклономерных наблюдений, организованными в специальном шурфе глубиной 25 м, в котором расположены маятниковые наклонометры, имеющие чувствительность 10^{-3} ppm [Курбанов, Кузьмин, 1982].

С целью дифференциации пространственной картины вертикальных движений земной поверхности нивелирные данные представлены на графике в виде двух участков («бортового» и «приразломного») единого профиля. Учитывая, что бортовой участок имеет длину порядка 4 км, а приразломный – 0.8 км, то данные вертикальных смещений реперов переведены в угловую меру и рассмотрены в режиме двух, расположенных друг за другом, наклономеров с большой базой измерений. Это позволяет в едином масштабе провести сопоставление с данными маятниковых наклономеров.

Таким образом, проводилось сопоставление данных, полученных по трем «наклономерам», два из которых расположены в бортовых частях

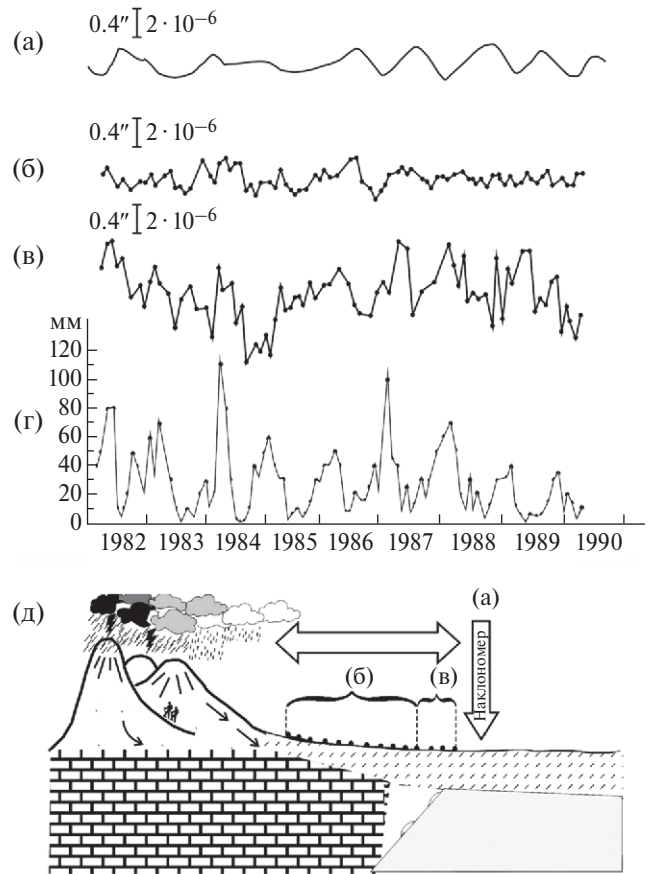


Рис. 3. Временной ход наклонов земной поверхности и выпадения атмосферных осадков в Копетдагской сейсмоактивной зоне: (а) – наклономерные данные; (б) – результаты нивелирования в пределах блока; (в) – результаты нивелирования в зоне разлома; (г) – величина выпадения атмосферных осадков; (д) – расположение измерительных систем на профиле.

(рис. 3а, 3б), а один непосредственно в окрестности разлома (рис. 3в). Как следует из рисунка результаты нивелирных и наклономерных наблюдений, полученные в бортовой части разломной зоны, хорошо согласуются между собой. Их трендовые изменения незначительны и за неполные 9 лет изменяются со скоростью $4.6 \cdot 10^{-8}$ в год. На фоне практического отсутствия тренда отчетливо прослеживаются сезонные (тепловые) наклоны земной поверхности. Отсюда следует, что в рассматриваемый промежуток времени (около 10 лет) не происходили существенные изменения регионального поля напряжений во времени, то есть эндогенное воздействие было минимально.

В то же время, как следует из рис. 4в, характер деформирования земной поверхности в разломной зоне имеет принципиальное отличие. Временной ход кривой имеет явно выраженный

неоднородный, автономный характер. Амплитуды аномальных изменений достигают величин 1.5–2.0 угловых секунд (порядка 10^{-5}), их временная структура содержит колебания с периодами от 3–4 лет до 2–2.5 лет. Очевидно, что имеет место «собственная», локальная динамика разломной зоны со своей временной структурой и аномально высоким уровнем деформаций.

Самое примечательное состоит в том, что временная структура деформационного процесса в зоне разлома сильно коррелирует ($r=0.93$) с ходом выпадения атмосферных осадков (рис. 3г), который построен по данным метеостанции «Гаудан», расположенной в Копетдаге на расстоянии порядка 40 км к югу от зоны разлома. В работе [Кузьмин, 1999] выполнен детальный анализ статистической достоверности выявленной связи параметров.

Очевидно, что прямое деформационное воздействие выпадения осадков на земную поверхность не может обеспечить наблюдаемый уровень деформационных аномалий, как минимум, по двум причинам:

1. Такое малое количество выпавших осадков (70–100 мм в год), не может вызвать деформацию величиной 10^{-5} . Как показывают оценки [Сидоров, Кузьмин, 1989] аномальные деформации, обусловленные таким уровнем атмосферных осадков, изменяются в диапазоне ($5 \cdot 10^{-8}$ – $2.5 \cdot 10^{-7}$);

2. Если бы атмосферные осадки вызывали столь значительные деформации земной поверхности, то они бы обязательно отразились на данных «бортового» нивелирного участка (рис. 3б), которые получены на одном и том же профиле в рамках единой методики измерений.

Анализ гидрогеологической обстановки показал, что областью питания приразломных, глубинных вод являются осадки, выпадающие в горах, где и расположена метеостанция. В этом случае периодическое увеличение и уменьшение уровня выпавших осадков в горах, которые инфильтруются в зону разлома, меняет величину порового давления флюида в разломной зоне, что приводит к деформациям разломной зоны. Однако амплитуды изменений порового давления явно малы и составляют величины не более 0.001 МПа. Эти нагрузки могут создавать вынужденные знакопеременные колебания деформаций с амплитудами не более, чем 10^{-7} , а наблюдения зафиксировали деформации на два порядка больше (10^{-5} и более). То есть имеет место возбуждение деформационных процессов крайне малыми по величине воздействиями.

В таком случае остается единственная возможность объяснения выявленной взаимосвязи. Флуктуации эффективного порового давления в трещиноватой флюидонасыщенной среде разлома приводят к изменению степени трещиноватости (меняются жесткостные характеристики) в разломной зоне, которые формируют усиление деформаций в данной зоне способом параметрического возбуждения.

Таким образом, рис. 3 отражает обе формы формирования деформаций земной поверхности под влиянием экзогенных воздействий. Тепловые наклоны поверхности – это пример экзогенных деформаций, вынуждаемых (forced) периодическим (сезонным) нагревом и охлаждением земной поверхности. Локальные периодические флуктуации деформаций в зоне разлома соответствуют II варианту схемы формирования аномалий (рис. 2) и являются *экзогенно-индуцированными*.

ЭНДОГЕННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

Другой пример большого деформационного отклика на малые воздействия представлен на рис. 4, где показаны временные изменения вертикальных движений земной поверхности по различным секциям (частям) нивелирного профиля, организованного в Камчатском сейсмоактивном регионе. Для исследования детальной структуры современной геодинамики разломных зон в районе г. Петропавловск-Камчатский были организованы нивелирные наблюдения с повышенной пространственно-временной детальностью. На локальном нивелирном профиле длиной 2.6 км были проведены прецизионные (с точностью до 0.3 мм/км), многократные (1–2 повторения в неделю в течение 3-х лет) и детальные (расстояние между пунктами наблюдений 50–80 м) наблюдения [Churikov, Kuzmin, 1998; Kuzmin, Churikov, 1999].

Из графика следует, что имеет место резкое различие между характером временного хода и амплитудами аномальных деформаций для «приразломной» секции (рис. 4а) и «бортовых» секций (рис. 4б). Отсюда следует, что в пределах секции, расположенной в зоне разлома, отмечены аномальные смещения порядка 10 см, а на секции, которые находятся в бортовой части (вне разломной зоны), смещения достигают величин на 1.5–2 порядка меньше.

Особенно характерен аномальный период, который предварял Камчатское землетрясение

02.03.1992 г. ($M = 7.1$). Принципиально важно, что процесс подготовки этого землетрясения, которое произошло на расстоянии 100 км от нивелирного профиля, проявился в разломной зоне с амплитудой на 1.5–2 порядка интенсивней, чем в бортовой части. Интерес вызывает различие в длительности предвестниковой аномалии. Аномалия, которая зарегистрирована в пределах секции, которая полностью расположена в блоке (черные кружки) имеет амплитуду около 3 мм и длительность 2 месяца. В пределах секции, которая находится ближе к разлому (белые кружки) длительность аномалии составляет 3 месяца, а амплитуда 10 мм. Для секции,

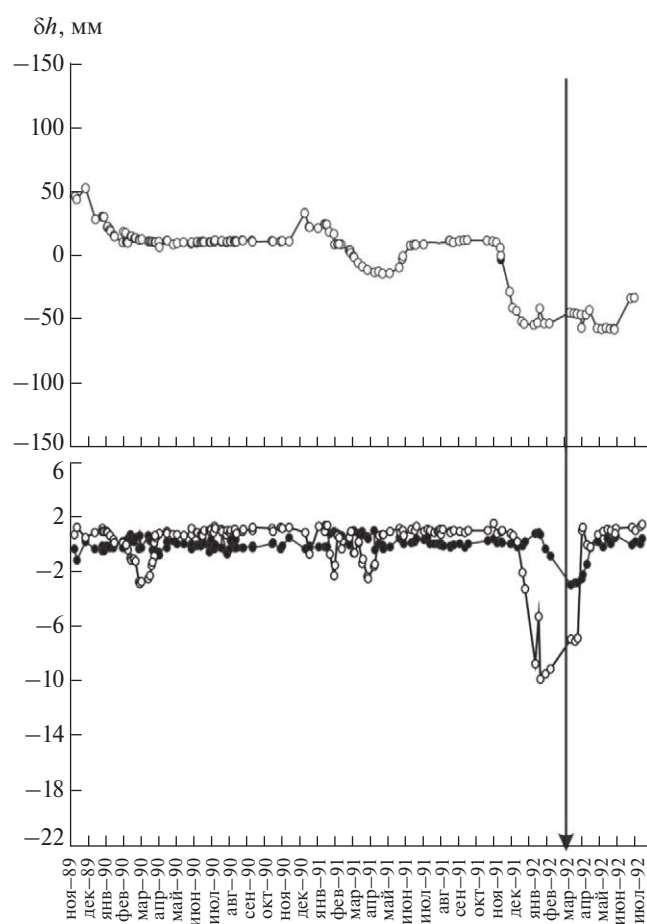


Рис. 4. Вертикальные смещения земной поверхности, измеренные на различных секциях нивелирного профиля: (а) — результаты наблюдений на секции, расположенной непосредственно в разломе; (б) — секции, расположенные в блоке (черные кружки) и около разломной зоны (светлые кружки). На горизонтальной оси показано время измерений, левая вертикальная ось соответствует изменению превышения в миллиметрах, а вертикальная стрелка указывает момент Камчатского землетрясения 2 марта 1992 г.

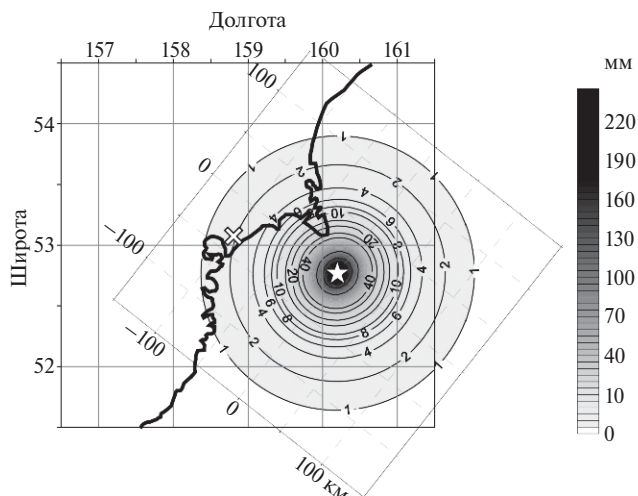


Рис. 5. Расчетное распределение вертикальных смещений в период подготовки Камчатского землетрясения 02.03.1992 г.

расположенной непосредственно в разломе, характерно еще большая амплитуда (55 мм) и длительность (4 месяца). При этом видно, что так же, как и в Копетдагской сейсмоактивной зоне, временной ход «бортовой» секции не имеет ярко выраженного тренда.

На рис. 5 показаны распределения вертикальных смещений, построенные по результатам моделирования процесса формирования аномальных деформаций в период подготовки Камчатского землетрясения с $M = 7.1$, которое произошло 02.03.1992 г. [Kuzmin, Churikov, 1999]. Из рисунка следует, что в зоне расположения нивелирного профиля (отмечено крестом) вертикальные смещения соответствуют зарегистрированным (порядка первых мм) смещениям в блоковой части профиля. То есть внешнее эндогенное воздействие (процесс подготовки землетрясений), которое, затухая от очага, имеет в районе профиля деформации на уровне 10^{-6} , в зоне разлома формирует аномальные деформации с амплитудой относительных деформаций 10^{-4} и более.

И вновь обнаруживается, что в пределах единой системы измерений наблюдаются два типа формирования аномальных деформаций земной поверхности — вынужденный и индуцированный. Наличие резкого усиления амплитуды предвестниковых деформаций на разломе доказывает существование *эндогенно-индуцированных* деформаций разломных зон.

ТЕХНОГЕННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

В последние годы, наряду с эколого-экономическими факторами длительного освоения месторождений углеводородов активное внимание специалистов стали привлекать геодинамические последствия, такие как аномальные деформации (просадки) земной поверхности и проявление сейсмической активности. Хорошо известны случаи аномальных (более метра) просадок земной поверхности на длительно разрабатываемых нефтяных и газовых месторождениях в США, Венесуэле, на Северном море и в других регионах, что связывается со снижением пластового давления. Зарегистрированы случаи проявления землетрясений, в том числе сильных, в районах освоения месторождений углеводородов в США, Канаде, Франции, России, Туркменистане, Узбекистане и других регионах. Установлена связь процессов подготовки этих событий с процессами разработки месторождений нефти и газа [Сидоров и др., 2000; Адушкин, Турунтаев, 2015; Chan, Zobak, 2007].

Несмотря на многочисленные случаи аномальных техногенных деформаций и индуцированной сейсмичности в районах интенсивной антропогенной деятельности человека, изучение причин возникновения природно-техногенных катастроф до сих пор остается крайне актуальной проблемой.

Представленная на рис. 6 схема формирования геодинамических последствий разработки месторождений жидких УВ базируется на том, что существуют две группы последствий: техногенная и техногенно-индуцированная. В ней представлены 4 основные формы геодинамических последствий длительной разработки месторождений: обширные просадки территории месторождения, техногенная и техногенно-индуцированная сейсмичность, активизация разломных зон, расположенных в пределах месторождения [Кузьмин, 1999].

Главный эмпирический факт, который использован в предложенной схеме иллюстрируется на примере деформационных процессов. Если разработка месторождений не проводится, то и формирование обширных оседаний земной поверхности над месторождением не происходит. Это пример однозначной техногенной деформации. С другой стороны, разломные зоны, расположенные в пределах месторождения, которое не разрабатывается, могут активизироваться, например, по экзогенным или эндогенным причинам. В этом случае, деформации

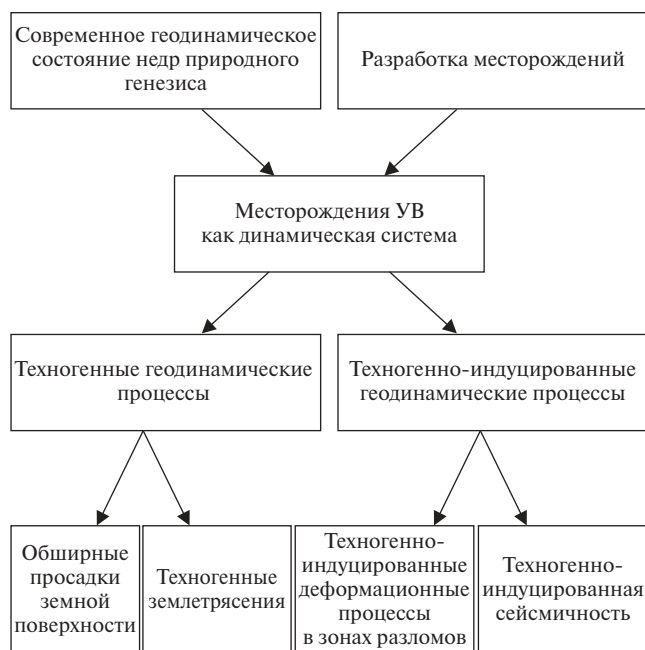


Рис. 6. Схема формирования геодинамических последствий разработки месторождений нефти и газа.

разломных зон не будут связаны с техногенными воздействиями. Но если процесс разработки возбуждает их деформационную активность, то эти деформации разломных зон можно определить как техногенно-индуцированные.

Эти представления хорошо иллюстрировать на примере деформаций земной поверхности, которые возникают в пределах эксплуатируемых подземных хранилищ газа.

На рис. 7 показаны результаты повторных нивелирных наблюдений вдоль одного из профилей на Степновском подземном хранилище газа, расположенным в Европейской части России [Кузьмин, 2016].

Здесь показаны результаты четырех циклов нивелирных наблюдений, которые были проведены вдоль профиля пересекающего подземное хранилище газа, расположенное в Европейской части России. Это подземное хранилище организовано в отработанном пласте газового месторождения. Глубина залегания пласта около 2 км. В процессе эксплуатации газохранилища два раза в год производится циклическое воздействие на пласт (закачка и отбор газа). Изменение давления на глубине в период выполненных геодезических измерений составляет 0.8 МПа (отбор) до 1.1 МПа (закачка).

Нивелирные наблюдения повторяются в среднем через 0.5 года. Интервал между 2 и 1 наблюдением соответствует отбору газа. Поэтому

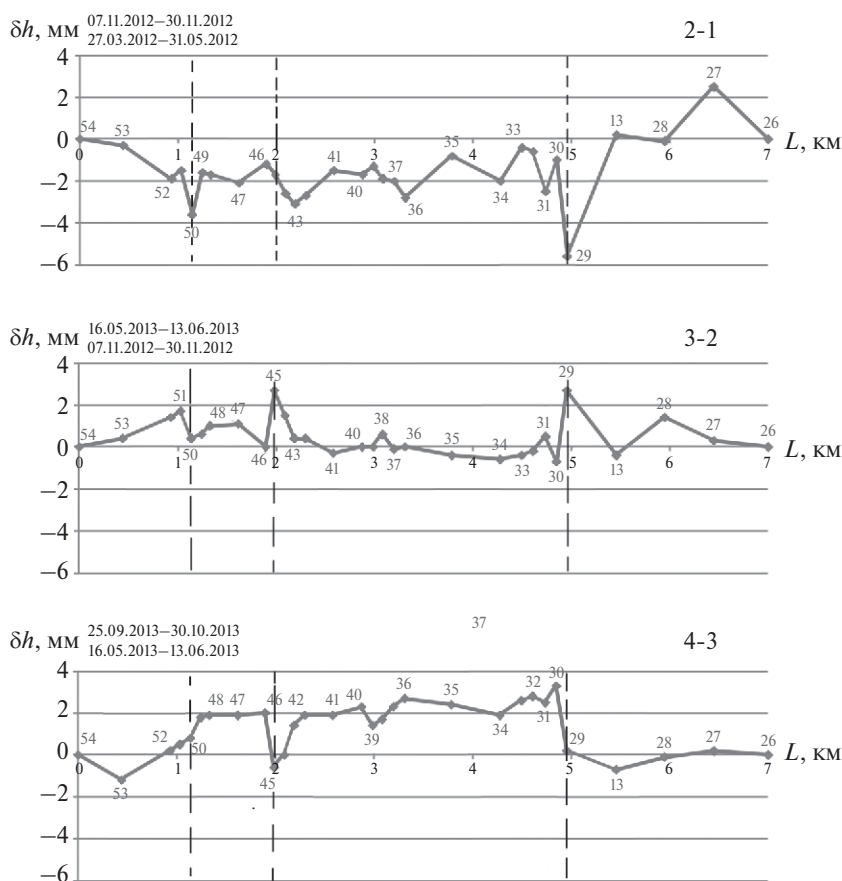


Рис. 7. Вертикальные смещения земной поверхности вдоль нивелирного профиля на подземном хранилище газа. Вертикальные пунктирные линии – местоположение осевой части зон разломов, выявленных по геолого-геофизическим данным.

общий ход кривой показывает просадку в центральной части газохранилища. Период между 3 и 2 наблюдением соответствует нейтральному периоду, когда отбор завершился, а интенсивная закачка еще не началась. В этот период среднее значение смещений по профилю стремится к нулевым значениям. И, наконец, в период между 4 и 3 наблюдением происходит закачка газа, что приводит к подъему земной поверхности в центральной части профиля.

Оценка относительных деформаций вдоль всего профиля («фоновая» компонента) показывает, что знакопеременные вертикальные смещения земной поверхности равны $1.3 \cdot 10^{-6}$ как в период отбора, так и в период закачки. Величина относительных деформаций в зонах разломов (репера №№ 50, 45 и 29) изменяется в интервале от $2 \cdot 10^{-5}$ до $8.7 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, разломные зоны усиливают циклические деформации при эксплуатации подземного газохранилища почти на 1.5 порядка.

Если обозначить разломы по номерам слева направо, то из рисунка видно, что локальные

аномалии, приуроченные к разлому № 1, характеризуются локальным оседанием в период отбора газа, которое продолжается в нейтральный период и исчезает во время закачки. Разлом № 2 не проявляет себя во время отбора, но отмечается локальным поднятием в нейтральный период и локальным оседанием в период закачки. Локальные смещения в окрестности разлома № 3 ведут себя аналогичным образом. Во время отбора отмечается оседание. В нейтральный период происходит поднятие, а в процессе закачки вновь репер, приуроченный к разлому, оседает.

Это означает, что деформационная реакция разломов на циклические нагрузки является нелинейной не только по амплитуде деформаций, но и по знаку аномальных смещений. На всех трех разломах наблюдаются локальные оседания в тот период, когда происходит либо закачка газа, либо изменение пластового давления отсутствует (нейтральный период). Полученные данные естественным образом объясняются, если считать, что разломная зона является нелинейным

параметрическим усилителем и преобразователем циклических деформаций (рис. 2).

Таким образом, циклические техногенные воздействия индуцируют аномально высокие деформации разломных зон, которые существенно отклоняются от знака возбуждающей нагрузки. Поэтому их следует определить как *техногенно-индуцированные* деформации разломных зон.

Важно отметить, что, как и в предыдущих примерах, в пределах единой системы наблюдений регистрируются два типа индуцированных деформационных процессов. Техногенные, когда циклические нагрузки (отбор и закачка газа) приводят к адекватным оседаниям и поднятиям земной поверхности, и техногенно-индуцированные, когда техногенное воздействие приводит к нелинейной реакции разломных зон и формирует техногенно-индуцированные деформации в этих зонах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для всех приведенные примеры техногенных деформаций разломных зон, независимо от природы воздействий, существует общая закономерность. Все зарегистрированные аномалии относятся к флюидонасыщенным разломам, а кинематика вертикальных смещений представляет собой локальные, симметричные изгибы

в окрестности разломных зон. Эти аномалии обнаружены практически повсеместно. Главное условие для их идентификации — это наличие сети наблюдений с расстояниями между реперами не более 1 км. В подавляющем большинстве случаев они представлены локальными оседаниями. Это доказывает, что все они деформируются как разломы раздвигового типа (tensile fault).

В работах [Кузьмин, 2018; а; в] подробно описан механизм формирования локальных аномалий деформаций в зонах разломов и показано, что морфологический тип выявленных аномалий не может быть описан ни блоковой моделью [Григорьев и др., 1987], ни дислокационной [Davis, 1983; Yang, Davis, 1986; Okada, 1985].

Для демонстрации этого факта на рис. 8 представлен набор моделей раздвига и показана морфология вертикальных и горизонтальных смещений для каждой из них.

На рис. 8 кривые смещений построены для идентичных параметров разломов и величин смещений (деформаций), задаваемых на разломе. Моделью, которая в максимальной степени соответствует наблюдаемым данным, является модель параметрически-индуцированных деформаций разломных зон. Учитывая, что подавляющее большинство аномальных деформаций в зонах разломов получены высокоточным нивелированием с повышенной пространственной

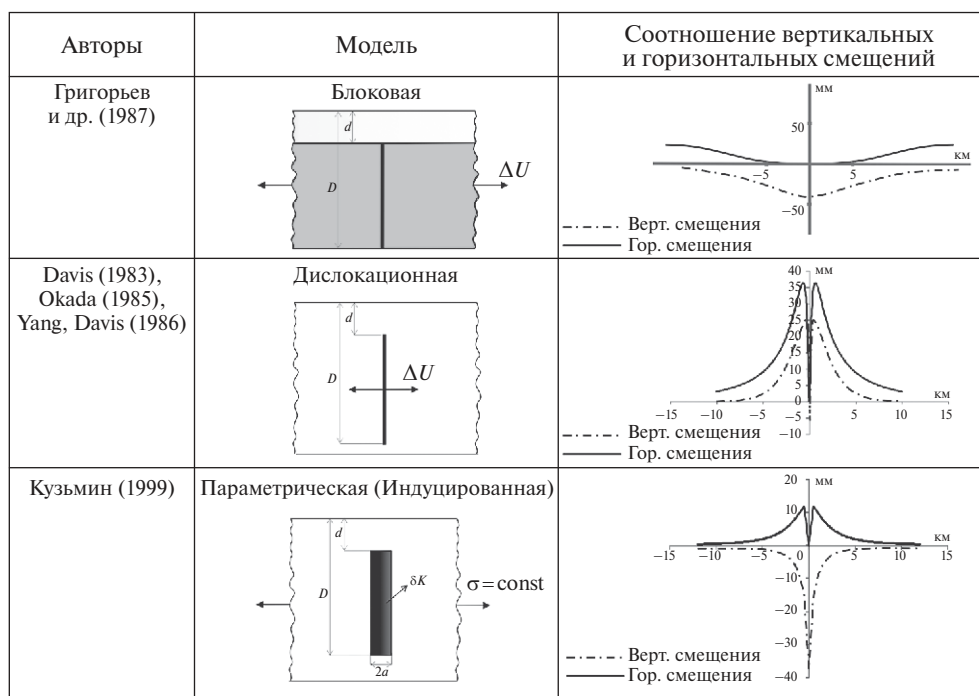


Рис. 8. Сопоставление аналитических моделей раздвиговых разломов.

детальностью, то сравнение моделей проводится на основе данных по вертикальным смещениям земной поверхности.

Блоковая модель, где задается горизонтальный раздвиг блоков фундамента и происходит оседание поверхности слоя осадочных пород, не удовлетворяет двум эмпирическим фактам. Она не формирует локальные аномалии. Ширина аномалий зависит от соотношения размеров блоков фундамента и толщины осадочного слоя. Но самое главное – это необходимость, чтобы вариации во времени горизонтальных перемещений блоков соответствовали временному ходу развития локальных приразломных оседаний, а их амплитуды были соизмеримы с амплитудами смещений блоков. А это не наблюдается в результатах измерений.

Дислокационная модель достаточно хорошо описывает локальный характер приразломных смещений поверхности. Задаваемые, например, раздвиговые скачки смещений в разломе оказываются вполне соизмеримыми с наблюдаемыми величинами. Однако существенным недостатком дислокационных моделей является отсутствие у них ширины разлома. Это обстоятельство практически лишает возможности использовать данные модели при описании взаимосвязи локальных деформаций и вариаций различных геофизических и геохимических параметров. Кроме этого, морфология и амплитуда аномальных смещений земной поверхности в разломной зоне в дислокационной модели не зависит от характера и интенсивности «региональных» (внешних) условий, в обстановке которых развивается локальная аномалия. Характерной особенностью распределения вертикальных смещений является то, что оседание имеет амплитуду соизмеримую с амплитудой поднятия. Подобные явления никогда не наблюдались в реальных данных.

Количественной основой параметрически-индуцированной модели служит теория деформационных ядер (включений), расположенных во внутренних участках твердого тела, которая была разработана для решения задач физики неоднородных сред и механики композиционных материалов. Наиболее обобщающей работой в этом направлении является работа [Mindlin, Cheng, 1950].

В работе [Кузьмин, 1999] на основании теории взаимности [Sokolnikoff, 1983] для среды с дисторсией и с использованием аппарата функций Грина удалось получить выражение (1) для смещений упругого полупространства $U_r(\xi)$, где

в качестве источника локальных аномалий могут быть вариации жесткости, скачки смещения, изменения пороупругих параметров и др.:

$$U_r(\xi) = \varepsilon_{i,j}^0 \cdot \iiint \sigma_{ij}^{(r)}(x, \xi) dV_\zeta, \quad (1)$$

где: $\varepsilon_{i,j}^0$ – дисторсия или избыточная деформация, которая создает локальный источник деформационных аномалий в объеме среды V (во включении); $\sigma_{ij}^{(r)}(x, \xi)$ – тензор напряжений Грина. В качестве дисторсии, которая описывает источник аномалий внутри разломной зоны, может быть неоднородность жесткостных свойств, избыточное поровое или пластовое давление и другие механические параметры.

Как известно, в физике твердого тела и механике композиционных материалов такие два понятия, как включение и неоднородность, различают [Eshelby, 1961]. Неоднородность – это такая область среды, в которой жесткость (модули упругости) отличается от вмещающей среды. В этом смысле разломная зона – это область с отличающейся, часто уменьшенной, жесткостью горных пород, которая находится в поле внешних напряжений (сил). Включение – это область с «внутренней» деформацией, которая не зависит от внешних граничных условий. Ее примером может служить, например, подземное хранилище газа, когда закачка газа в пласт создает локальную деформацию.

В работе [Кузьмин, 2018a] показано, что для объемных включений (неоднородностей) эти два понятия становятся эквивалентными. Для флюидонасыщенных, раздвиговых разломов основное условие формирования локальных аномалий смещений поверхности – это наличие девиаторной деформации горизонтального (по отношению к плоскости разлома) удлинения или локального девиаторного растяжения. При этом, следует учитывать, что и девиатор деформаций и девиатор напряжений – это обязательно только сдвиговая деформация или касательное напряжение. Например, во многих учебниках по теории упругости утверждается, что тензоры – девиаторы описывают только явление формоизменения, которое отождествляется со сдвиговой деформацией [Timoshenko, Goodier, 1970; Reiner, 1970]. Однако при основном, например, удлинении упругого тела кубической формы произойдет изменение формы куба. Он станет параллелепипедом. Но одновременно произойдет и увеличение первоначального объема. Очевидно, что формоизменение может сопровождаться изменением объема

и необязательно определяет только сдвиговую деформацию [Кузьмин, 2014; 2015; 2018a].

Другой пример – это эффективное напряжение во флюидонасыщенной среде. Как известно [Zoback, 2007; Segall, 2010; Ma, Zoback, 2017] эффективное напряжение σ_{eff} связано с поровым давлением P , приложенным напряжением σ_c и коэффициентом Био α соотношением:

$$\sigma_{eff} = \sigma_c - \alpha P. \quad (2)$$

Как правило, для большинства осадочных пород, $\alpha \approx 1$. Тогда σ_{eff} является девиатором напряжения. При этом, эффективное напряжение может быть как нормальным (сжатие, растяжение), так и касательным. Все зависит от того, какова ориентация и характер приложенного напряжения. Если оно приложено так, что формируется касательное нагружение на пороупругий, флюидонасыщенный объем, то эффективное напряжение будет касательным.

В этом смысле результаты известных лабораторных экспериментов по влиянию жидкости на акустическую эмиссию [Соболев, Пономарев, 2011; Потанина и др., 2015] во многом подобны результатам этой работы по деформационной активизации разломных зон. В природных условиях аналогичные результаты были получены по активизации оползня и других деформаций дождевыми осадками [Fu, Freymueller, 2012; Chanard et al., 2018; Huang, Yeh, 2018]. Во многом похожие закономерности наблюдаются и в индуцированной сейсмичности при различных режимах заполнения водохранилищ [Смирнов и др., 2010; Смирнов и др., 2018].

Необходимо отметить, что разделение сейсмических последствий разработки месторождений нефти и газа на техногенные и техногенно-индуцированные проводилось автором данной работы по аналогии с деформационными процессами. Техногенные землетрясения происходят в непосредственной окрестности разрабатываемого месторождения как в пространстве, так и по глубине. Они имеют невысокий энергетический потенциал. Очаги техногенно-индуцированной сейсмичности могут залегать намного глубже, чем разрабатываемое месторождение и иметь существенно более высокую энергию. Во многом аналогичные рассуждения были изложены в недавней работе [Doglioni, 2018], которая посвящена классификации явлений индуцированной сейсмичности. Автор этой работы также рассматривает различные механизмы

индуцированных землетрясений, которые можно отождествить с техногенными, экзогенно-индуцированными, эндогенно-индуцированными и техно-индуцированными землетрясениями.

Вместе с тем, нужно признать, что деформационные и сейсмические явления имеют существенные отличия. Сейсмический каталог – это каталог конкретных событий (явлений). Каталог измеренных смещений – это каталог фрагментов деформационного явления, которое еще предстоит изучить. Особенно это актуально при анализе временных рядов. Например, каталог часовых измерений наклонов земной поверхности становится полусуточным или суточным земным приливом только тогда, когда эти наблюдения будут проводиться в течение суток или месяца. Дело здесь не в метрологии или статистической достоверности результатов, а в необходимости зарегистрировать явление полностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты несомненно указывают на то, что экзогенно-индуцированные, эндогенно-индуцированные и техногенно-индуцированные деформации разломных зон являются результатом параметрического индуцирования (возбуждения) регионального и глобального напряженно-деформированного состояния относительно слабыми воздействиями. Это позволяет считать их существенно нелинейными процессами.

Как известно, самое общее свойство нелинейных систем – это отсутствие выполнения принципа линейной суперпозиции, когда суммарный результирующий эффект от нескольких воздействий должен быть равен сумме эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности. В случае индуцированных деформаций разломных зон присутствует явная нелинейность, когда малые воздействия приводят к аномально высокой (до 2–3 порядков) деформационной реакции на эти воздействия.

В нелинейных, неустойчивых системах принципиальным образом меняются представления о характере причинно-следственных связей. В линейных системах меры причин и следствий всегда одного порядка. В существенно нелинейных системах малые, по уровню, причины могут привести к большим последствиям. В этих системах причиной явлений следует считать саму неустойчивость.

Если это так, то возникает серьезная проблема по идентификации и прогнозу индуцированных явлений. Результаты наблюдений позволяют только регистрировать уровень и масштабы реакции среды на воздействия. Однако идентификация генезиса процесса оказывается очень трудной задачей, поскольку, например, экзогенно-индуцированные деформации могут оказаться идентичными по уровню и характеристикам, эндогенно-индуцированным.

Существует высказывание, которое приписывают Конфуцию: «Трудно искать черную кошку в темной комнате, особенно, когда ее там нет». Однако для исследований индуцированных процессов скорее всего нужно использовать другую редакцию этого высказывания: «Еще труднее искать черную кошку в темной комнате, особенно, когда она там есть!»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б.* Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН. 2015. 364 с
- Буланже Ю.Д., Магницкий В.А.* Современные движения земной коры. Состояние проблемы // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1974. № 10. С. 19–54.
- Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С. и др.* ГНСС мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 2. С. 40–47.
- Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С. и др.* Мониторинг деформационных процессов природного происхождения при изыскательных работах на площадке АЭС // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. № 2 (31). С. 15–23.
- Григорьев А.С., Волович И.М., Михайлова А.В., Ребецкий Ю.Л., Шахмурадова З.Е.* Задача о раздвиге // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1987. № 6. С. 3–21.
- Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О.* Изучение современных геодинамических процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе // Физика Земли. 2014. № 6. С. 3–16.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство экономических новостей. 1999. 220 с.
- Кузьмин Ю.О.* Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная малыми природно-техногенными воздействиями // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2002. № 9. С. 48–54.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон // Физика Земли. 2004. № 10. С. 95–112.
- Кузьмин Ю.О.* Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44–60.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.
- Кузьмин Ю.О.* Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. № 5. 2014. С. 51–64.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. 2015. № 4. С. 25–30.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 87–101.
- Кузьмин Ю.О.* Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // Физика Земли. 2017. № 6. С. 24–39.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. 2018а. № 6. С. 87–105.
- Кузьмин Ю.О.* Современные аномальные деформации земной поверхности в зонах разломов: сдвиг или раздвиг? // Геодинамика и тектонофизика. 2018б. Т. 9. № 3. С. 967–987.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных процессов // Физика Земли. 2019. № 1. С. 65–86.
- Курбанов М.К., Кузьмин Ю.О.* О деформографическом эффекте по наклонным данным // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 9. С. 67–71.
- Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Любушин А.А., Шозиёв Ш.П.* Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования // Физика Земли. 2015. № 2. С. 126–138.
- Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О.* Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М.: Наука. 1989. 183 с.
- Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О., Хитров А.М.* Концепция «Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России». М.: ИГиРГИ. 2000. 56 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В.* Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурального моделирования // Физика Земли. 2010. № 2. С. 17–49.
- Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Пономарев А.В., Арора К., Chadha R.K., Srinagesh D., Потанина М.Г.* О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2018. № 4. С. 100–109.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Динамика разрушения моделей геологической среды при триггерном влиянии жидкости // Физика Земли. 2011. № 10. С. 48–63.
- Хисамов Р.С., Гатиятуллин Н.С., Кузьмин Ю.О. и др.* / Под ред. Хисамова Р.С., Кузьмина Ю.О. Современная

- геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана. Казань: «ФЭН». 2012. 240 с.
- Andronov A.A., Chaikin C.E.* Theory of oscillations. Princeton University Press. Princeton. New Jersey. 1949.
- Chan A.W., Zoback M.D.* The role of hydrocarbon production on land subsidence and fault reactivation in the Louisiana coastal zone // *Journal of Coastal Research* 2007. V. 23 (3). P. 771–786.
- Chanard K., Fleitout L., Calais E., Barbot S., Avouac J.P.* Constraints on transient viscoelastic rheology of the asthenosphere from seasonal deformation // *Geophys. Res. Letters*. 2018. V. 45. P. 2328–2338.
- Churikov V.A., Kuzmin Yu.O.* Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia // *Geophys. J. Int.* 1998. V. 133. P. 607–614.
- Cing-Chuan Huang, Shan-Wun Yeh* Predicting periodic rainfall induced slope displacements using force-equilibrium-based finite displacement method // *Journal of GeoEngineering*. 2018. V. 10. № 3. 83–89.
- Dahm T., Hainzl S., Becker D., Bisschoff M., Cesca S., Dost B., Fritschen R., Kuhn D., Lasocki S., Klose C.D., Meier T., Ohrnberger M., Rivalta E., Shapiro S., Wegler U.* How to discriminate induced, triggered and natural seismicity. Proceedings of the Workshop Induced seismicity: November 15–17, 2010. 2010. Luxembourg. P. 69–76.
- Davis P.M.* Surface associated with a dipping hydrofracture // *Journal of geophysical research*. 1983. V. 88. № B7. P. 5826–5834.
- Dogliani C.* A classification of induced seismicity // *Geoscience Frontiers*. 2018. V. 9. P. 1903–1909.
- Eshelby J.D.* Elastic inclusions and inhomogeneities. *Prog. Solid Mech.* 1961. № 2. P. 89–140.
- Fu Y., Freymueller J.T.* Seasonal and long-term vertical deformation in the Nepal Himalaya constrained by GPS and GRACE measurements // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B03407. P. 3407–3421.
- Grigoryev A.S. et al.* Relationships between the kinematics of the top of a layer and the state of stress within it due to block motion at its bottom (in connection with the interpretation of recent movements) // *Journal of Geodynamics*. 1988. V. 10. № 2–4. P. 127–138.
- Kuzmin Yu.O., Churikov V.A.* Anomalous strain generation mechanism before the March 2, 1992, Kamchatka earthquake // *J. Volcanol. & Seismol.* 1999. V. 20. P. 641–656.
- Ma X., Zoback M.D.* Laboratory experiments simulating poroelastic stress changes associated with depletion and injection in low porosity sedimentary rocks // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. V. 122. P. 2478–2503
- Mandl G.* Rock Joints. The Mechanical Genesis. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. 2005.
- Mindlin R., Cheng D.H.* Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid // *J. Appl. Phys.* 1950. V. 21. № 9. P. 926–930.
- Marketos G., Govers R., Spiers C.J.* Ground motions induced by a producing hydrocarbon reservoir // *Geophys. J. Int.* 2015. V. 203. P. 228–242.
- Maxwell J.C.* Matter and motion. London. Society for promoting Christian knowledge. 1888.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1985. V. 75. P. 1135–1154.
- Ponomarev A.V., Zavyalov A.D., Smirnov V.B., Lockner D.A.* Physical modeling of the formation and evolution of seismically active fault zones // *Tectonophysics*. 1997. V. 277. P. 57–81.
- Reiner M.* Deformation, strain and flow. London. H.K. Lewis & Co. 1960.
- Segall P.* Earthquake and Volcano Deformation. Princeton Univ. Press. 2010.
- Shapiro S.A.* Fluid-induced seismicity. Cambridge Univ. Press. 2015. 276 p.
- Sokolnikoff I.S.* Mathematical theory of elasticity. New York: McGraw-Hill. 1983.
- Timoshenko S., Goodier J.N.* Theory of Elasticity. McGraw – Hill. New York. 1970.
- Zoback M.D.* Reservoir geomechanics. Cambridge Univ. Press. 2007.
- Yang X.M., Davis P.M.* Deformation due to a rectangular tensile crack in an elastic half-space // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1986. V. 76. P. 865–881.

Induced Deformations of Fault Zones

Yu. O. Kuzmin^{a,*}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^{*}*e-mail: kuzmin@ifz.ru*

Received January 22, 2019

Empirical data obtained by studying the Earth's surface deformations in the fault zones induced by exogenous, endogenous, and manmade processes are presented. It is suggested to analyze induced deformations in the fault zones caused by different factors using a unified approach based on the notions of parametric excitation of processes. Two variants (types) of the formation of induced phenomena are

considered. In the first variant, deformational response of faults occurs linearly when an influence directly causes a fault to deform. The second variant is a nonlinear parametric amplifier when the deformational response of a fault zone is anomalously high and induced (excited) by small influences.

In accordance with this approach, definitions are given of exogenously induced, endogenously induced, and technology-induced deformations of the fault zones. The examples are presented when both scenarios of process formation, e.g., exogenous and exogenously-induced surface deformations, are simultaneously observed within a single measurement system.

Keywords: induction, technology-induced deformations, technogenic earthquakes, fault zone, parametric excitation