

УДК 551. 24, 551. 243, 550. 342

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА: ОТ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ДО МОНИТОРИНГА ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2019 г. Ю. О. Кузьмин

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

*E-mail: kuzmin@ifz.ru*

Поступила в редакцию 16.07.2018 г.

Принята в печать 15.08.2018 г.

Рассмотрена эволюция представлений на предмет и методы современной геодинимики за последние полвека. Обсуждаются проблемы метрологического обеспечения результатов повторных наблюдений, полученных методами наземной и спутниковой геодезии. Показано, что базовые характеристики современных геодинимических процессов существенно зависят от пространственно-временной детальности наблюдательных систем.

Представлен вариант решения проблемы парадоксов больших и малых скоростей деформаций, обнаруженный при исследованиях на геодинимических полигонах, расположенных в сейсмо-активных и слабосейсмичных областях. Для объяснения аномальной деформационной активности платформенных разломов предложен механизм параметрического возбуждения процессов, когда флуктуации во времени внутренних параметров разломной зоны (жесткость, поровое давление, коэффициент трения), находящейся в режиме внешнего квазистатического нагружения, формируют локальные деформационные аномалии.

Демонстрируются результаты мониторинга деформаций на примере шельфового месторождения нефти. Обосновано утверждение, что концепция геодинимических полигонов является универсальной формой изучения современных деформационных процессов, позволяющая с единых позиций определять пространственно-временную структуру разномасштабных геодинимических явлений, используемых в фундаментальных и прикладных исследованиях.

*Ключевые слова:* наземная и спутниковая геодезия, метрологическое обеспечение, параметрическое возбуждение процессов

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019178-103>

### ВВЕДЕНИЕ

Современная геодинимика – это наука о движениях Земли в реальном масштабе времени. Это те движения, которые можно измерять, идентифицировать и объяснять на языке фундаментальных наук. В этом смысле современная геодинимика является научным направлением, в котором гармонично используются методы геофизики, геодезии и геологии. История развития этого научного направления в нашей стране характеризовалась тесной связью геофизиков, геологов и геоморфологов из академических институтов со специалистами отечественной геодезической службы. За прошедшие годы произошло интенсивное накопление полевого материала, сменилась парадигма измерительных средств и методов анализа измерений. Су-

щественно расширились области практического применения результатов исследований.

На протяжении всей истории развития исследований по проблеме «Современные движения земной коры» сформировались два подхода к определению современной геодинимики как научной дисциплины: кинематический и силовой [Кузьмин, 1999].

Сторонники первого подхода (астрономы и геодезисты) полагали, что центральным предметом исследований в современной геодинимике является изучение основных кинематических характеристик (смещений, скоростей, векторов направленности и т. д.) движений земной поверхности в различных пространственно-временных масштабах протекания процессов для последующего анализа их природы.

Это во многом понятно, поскольку начало этим исследованиям, например, в нашей стране было положено еще в XIX веке. Исследования в любой естественнонаучной дисциплине начинаются с измерений. Поэтому первыми специалистами, которые начали «измерять» движения Земли были, естественно, геодезисты. В 1883 г. в рекомендациях к инструкции по нивелированию было указано: «Установить 3–4 марки, приняв все меры для их сохранения. Эти марки могли бы послужить для позднейших исследований поднятий и опусканий континентов» [Кашин, 1991].

Широкомасштабное развитие этих исследований было положено в 1963 г. на XIII Генеральной Ассамблее Международного геодезического и геофизического союза в рамках проекта «Современные движения земной коры». Проект состоял из трех разделов: «Мировая карта движений земной коры», «Мировая сеть полигонов (стационаров) для наблюдений за современными движениями земной коры», «Изучение общих деформаций земного шара». При этом координация исследований была, в основном, сосредоточена в рамках деятельности Международной Ассоциации Геодезии (МАГ). Так, например, работы по второму разделу этого проекта возглавлял выдающийся отечественный ученый Ю.Д. Буланже, который являлся в то время вице-президентом МАГ и заведующим Отделом геодезии и гравиметрии Института физики Земли АН СССР.

Исследования, проводимые в рамках первого и третьего разделов проблемы, потребовали активного привлечения геологов, геоморфологов и геофизиков, что повлекло за собой трансформацию в определении базовых понятий, поскольку был существенно расширен арсенал применяемых методов изучения современных движений.

Естественно, что геологи и геофизики, основываясь на втором (силовом) подходе, считали, что основной проблемой современной геодинимики является установление механизмов формирования движений в различных геосферах с последующей оценкой кинематических характеристик движений, предполагая полную унаследованность современных движений от процессов прошлых геологических эпох. Понятно, что результаты измерений в реальном масштабе времени в этом случае не являются основным предметом исследований, а служат элементом доказательности принятой схемы приложения тектонических сил (напряжений).

Дальнейшее развитие исследований и, особенно, работы по тектонике плит (геодинимике) привели к тому, что термин «Современные движения земной коры» постепенно был трансформирован в термин «Современная геодинимика». В рамках исследования современных геодинимических процессов, в настоящее время, оформились две магистральные тенденции. Во-первых, стремительное развитие спутниковых технологий привело к тому, что существенно расширилось изучение современной кинематики литосферных плит, что позволило изучать деформационные процессы на глобальном и региональном уровне. В то же время, насущные вопросы практического использования результатов наблюдений, особенно в части оценки геодинимической (сейсмической) опасности ответственных объектов, привели к тому, что параллельно развивались детальные исследования на геодинимических полигонах различного целевого назначения, обеспечивая исследования в зональном и локальном масштабах наблюдений.

Естественно, что каждое из направлений имеет свою специфику построения наблюдательных сетей и арсенал применяемых методов измерений. Исследования по кинематике литосферных плит базируются на методах спутниковой геодезии, используя методы ГНСС (ГЛОНАСС/GPS) наблюдений. В работах на геодинимических полигонах и, особенно при изучении современной динамики разломных зон, в основном, применяются методы наземной геодезии.

В предлагаемой работе рассмотрены наиболее принципиальные аспекты современной геодинимики:

- эволюция представления о предмете и задачах исследования современных геодинимических процессов;
- актуальные проблемы метрологического обеспечения наблюдений и идентификации результатов измерений;
- унаследованность современных движений, парадоксы скоростей деформаций и механизм деформационной активности разломов;
- результаты геодинимических наблюдений на специальных полигонах, организованных в пределах функционирования ответственных объектов.

Учитывая «юбилейную» тематику номера, основной упор сделан на исследования, проводившиеся под научно-методическим руководством и при непосредственном участии сотрудников Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

### Эволюция представлений о предмете и задачах исследований в современной геодинамике

Наиболее гармоничное, учитывающее и силовой, и кинематический подходы, определение основной задачи геодинамики дано в работе [Теркот, Шуберт 1985], где утверждается, что «*Геодинамика изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, и причины таких движений и деформаций*». Однако здесь имеет место двойственность определения — раздельное рассмотрение движений и деформаций. Оно возникает из-за того, что исследователям зачастую приходится изучать раздельно (особенно на модельном уровне) движения литосферных плит и/или блоков земной коры как жестких тел, и деформации, которым подвержены эти тела в результате взаимодействия.

Более того, в рамках механики деформируемого твердого тела возникновение деформаций (движений) обычно трактуется как результат действия на тело приложенных напряжений (сил). Однако, если обратиться к опыту, то справедливым оказывается и обратное утверждение. Известно, что при деформации твердых тел возникают силы, действующие как внутри тел со стороны одних частей на другие, так и между соприкасающимися телами. В случае объемных деформаций, это справедливо также и для жидкостей и газов в полном соответствии с аксиомами реологии. Имеют место явные противоречия. Эти противоречия исчезают, если вспомнить, что деформация — это изменение формы и размеров тела, *изменение взаимного расположения отдельных частей тела друг относительно друга, т. е. результат различных перемещений (движений) отдельных частей тела*. Тогда объяснение происхождения деформаций — это объяснение происхождения тех движений, которые привели к изменению взаимного расположения отдельных частей тела. Деформации есть результат определенного движения, и непосредственной причиной деформаций является движение, а не силы (или напряжения, как силы, деленные на площадь их приложения).

Установить непосредственную связь между силами и деформациями не всегда возможно. Силы сами по себе еще не определяют деформаций, которые должны возникнуть. Если эти силы таковы, что разные части тела движутся по-разному, а взаимное расположение различных частей тела изменится, только тогда возникнут деформации. Зная, как движутся различные части тела, можно определить деформации,

которые в результате этих движений появляются. В тех случаях, когда, несмотря на действие сил, движение тела, в итоге, прекращается, и деформации перестают изменяться, эти установившиеся (статические) деформации будут однозначно определяться действующими на тело силами. Однако в общем случае, когда деформируемое тело находится в движении, деформации не определяются однозначно приложенными силами. Одни и те же силы могут в различных случаях вызвать разные деформации. Напряжения (силы) и деформации (смещения) есть отражение различных форм (силовой и кинематической) единого процесса — движения и поэтому никакого обособления или противопоставления этих понятий при правильной трактовке не существует [Кузьмин, 1999; 2009].

Оперируя терминами «напряжение» и «деформация», исследователи часто упускают из вида, что наблюдаемыми (измеряемыми) величинами в геодинамике являются именно движения (горизонтальные, вертикальные или сдвиговые перемещения), а напряжения и деформации (отношение перемещений к базе измерений) определяются по результатам вычислений. Поэтому в геодинамике (особенно современной) движения являются и объектом наблюдений, и объектом интерпретации одновременно.

Из основ классической механики (теорема Коши—Гельмгольца) следует, что любое движение можно представить как параллельный перенос и вращение участков среды как абсолютно твердых (жестких) тел и их деформаций (объемных и сдвиговых). В этом смысле деформация тела как явление входит составной частью в более общее явление — движение тела. Тогда определение геодинамики можно сформулировать следующим образом: геодинамика — это научная дисциплина, изучающая движения, происходящие в земной коре, мантии и ядре, и причины этих движений [Кузьмин 1999].

Как отмечалось выше, статические деформации однозначно определяются приложенными напряжениями (силами). Это обстоятельство породило известную иллюзию о том, что основной задачей интерпретации — нахождения источника аномальных деформаций, является определение тех напряжений или того напряженного состояния, которые вызвали наблюдаемые деформации. Этой точки зрения придерживаются большинство специалистов в области тектоники и геодинамики. Однако в геодинамике, особенно современной, подобные статические ситуации практически невозможны. Земная поверхность,

блоки земной коры и литосферные плиты находятся в непрерывном движении с различными скоростями. Более того, в физике, начиная с конца XIX века, формулировались представления о том, что воздействовать на материальный объект (тело) можно не только путем приложения сил при непосредственном соприкосновении, но и воздействием на него различными полями (тепловым, электрическим, магнитным и др.). В этом случае возмущению подвергаются внутренние элементы твердого тела (молекулы, атомы, электроны), которые даже в состоянии макроскопического покоя отдельно взятого тела находятся в постоянном движении. Тогда, например, повышение температуры приводит к увеличению амплитуды смещений атомов, что приводит к увеличению объема тела, т. е. оно начинает деформироваться без приложения внешних сил (напряжений) к его границам. Это же относится к явлениям электрострикции и магнитоэлектричества, когда изменение электрического или магнитного поля меняет радиус орбиты движения заряженных частиц, что приводит к изменению макроскопических размеров тела, помещенного в область полевого воздействия. В этом случае, вновь источником происхождения деформаций будут являться движения отдельных, но микроскопических элементов твердого тела. Поэтому в учебниках по механике, написанных физиками (Г. Герц, М. Планк, А. Зоммерфельд, Я.И. Френкель, С.Э. Хайкин и др.), возникновение деформаций описывается именно с позиций первичности движений.

Для формулировки определения «современная геодинамика» необходимо иметь в виду ряд принципиальных обстоятельств. Как известно из физики, динамику можно определить в противопоставлении либо кинематике, либо статике. В первом случае динамика изучает причины, вызывающие движения, во втором, она понимается в более обобщенном смысле — и как описывающая сами движения, и как изучающая причины их вызывающие. В этом обобщенном смысле традиционный термин «современные движения земной коры» адекватно заменяется термином «современная геодинамика». Особо следует остановиться на трактовке термина — «современный». Его, как правило, определяют двояким образом: либо подчеркивая инструментальный характер фиксации движений, либо отмечая «кратковременность» протекания измеряемых процессов в сравнении с геологическими масштабами времени. С другой стороны, существует относительность средств наблюдений к свойствам исследуемых объектов. Если

измерять с помощью повторных геодезических наблюдений такой, типичный для современной геодинамики процесс, как земноприливные деформации, то существует ограничение по чувствительности и временной детальности наблюдений. В случае, когда предпринимается попытка измерения движений плит или блоков земной коры наклономерами и деформометрами, то существует ограничение по пространственному масштабу наблюдений.

Основным методом интерпретации геодинамических наблюдений является решения обратных задач — установления глубинного источника аномальных движений, по данным измерений на земной поверхности. Однако и в данном случае вновь возникает относительность средств наблюдений к свойствам объекта. Так, например, если имеет место фиксация унаследованного движения, например, вызванного конвекцией в мантии, методами современной геодинамики, то вследствие ограниченности (кратковременности) периода наблюдений возникает принципиальная невозможность решения обратных задач (как кинематики, так и динамики). Для однозначной интерпретации необходимо, чтобы «начало» и «завершение» наблюдаемого процесса целиком укладывалось во временной интервал наблюдений.

Таким образом, можно определить, что *современная геодинамика — это часть общей геодинамики, изучающая движения земных недр и причины, их вызывающие, когда время действия последних соизмеримо с длительностью процесса наблюдений* [Кузьмин, 1999]. Из этого определения следует, что объектом изучения в современной геодинамике могут быть наиболее мобильные и активные структуры литосферы и, в первую очередь, зоны тектонических нарушений (разломов).

Учитывая определенную степень дискусионности в определении понятия «разлом» необходимо сформулировать авторскую позицию в этом вопросе. Как правило, термин «разлом» или «разломная зона» используется как некая граница раздела между блоками, которые отличаются различной мобильностью или иными характеристиками. По мнению автора, разломы следует рассматривать как специфические геологические тела, некий объем земной коры, имеющий аномальное строение и повышенную трещиноватость, возникший в результате линейной деструкции среды. Главным является то, что зона разлома есть область, вмещающая породы с аномальными физико-механическими, геолого-геофизическими, флюидо-геохимическими и др. характеристиками. В этом случае

зоны разломов естественным образом являются концентраторами современного аномального напряженно-деформированного состояния и, следовательно, базовым объектом изучения современных геодинамических процессов.

При исследованиях в рамках геодинамического мониторинга ответственных объектов зачастую употребляется термин «геодеформационные» процессы, которые отличают от деформационных процессов материалов конструкций изучаемых объектов. Принципиально важно то, что в отличие от геодинамики, изучающей только природные процессы, в современной геодинамике исследуются процессы как природного, так и техногенного происхождения. Основные явления, изучаемые в современной геодинамике — это деформационные и сейсмические процессы, а также взаимосвязанные с ними вариации геофизических и флюидо-геохимических полей. Очень часто сейсмичность относят к современной геодинамике. Это так, поскольку сейсмичность это «быстрая» составляющая геодинамического процесса. Современные движения, естественно, относятся к «медленной» части спектра геодинамических явлений. Поэтому в последние годы, среди специалистов утвердилась тенденция медленные движения именовать современной геодинамикой (или деформационными процессами), а все, связанное с землетрясениями, определять как сейсмические процессы.

#### **Актуальные проблемы метрологического обеспечения наблюдений и идентификации результатов измерений в современной геодинамике**

Как известно, одним из наиболее эффективных методов изучения современных геодинамических процессов является геодеформационный мониторинг. При этом очевидно, что повышенная пространственная детальность измерений позволяет эффективно оценивать уровень и масштабы процессов, а повышенная частота опроса надежно устанавливает скорость их изменения. Однако не всегда пространственно-временная детальность измерений соответствует динамическим свойствам исследуемых объектов. Иногда обстоятельства вынуждают локальные объекты изучать региональными системами наблюдений, а быстропротекающие процессы измерять спорадически и с большими перерывами. Кроме того, традиционные методы геодеформационных наблюдений за глубинными природными объектами организованы таким образом, что датчики расположены либо на земной поверхности,

либо в приповерхностном слое. Все это затрудняет однозначную геодинамическую трактовку результатов измерений.

Основной проблемой адекватной оценки уровня современной геодинамической активности среды является проблема правильной идентификации результатов наблюдений за истинными параметрами деформационного процесса. Проблема идентификации результатов измерений современных геодинамических (геодеформационных) процессов в последние годы существенно обострилась. Это обусловлено тем, что в арсенале исследователей, изучающих современные деформации (вертикальные и горизонтальные смещения, наклоны и т. п.) земной поверхности появились спутниковые и скважинные методы измерений, которые внесли свою, подчас проблемную, специфику в традиционные методы наземных геодезических и обсерваторских геофизических (наклономерно-деформометрических) наблюдений.

Эта специфика затрагивает такие базовые понятия как «чувствительность», «точность», «пространственно-временное разрешение», «абсолютно и относительно измеренные величины», «идентификация измеренных данных», которые используются в теории измерения физических (механических) величин. Ситуация усугубляется тем, что некоторые исследователи полагают, что наблюдения не являются измерениями в строгом смысле этого понятия, т. к. «полевая» специфика налагает ограничения, которые не свойственны строгим лабораторным методам. Это дает им основание не всегда корректно обращаться с оценками точности результатов наблюдений и пространственно-временными характеристиками наблюдаемых параметров. Мониторинговые, повторные во времени измерения, не воспроизводимы, т. к. повторить их в тех же условиях уже невозможно. Это действительно так, но, по мнению автора, процедура наблюдения должна максимально приближаться к процедуре измерения. Для этого необходимо проводить тщательный метрологический анализ системы «измерительный датчик — вмещающая среда». Причем это касается не только тривиальных оценок статистической значимости получаемых результатов с позиции теории погрешности наблюдений. Наблюдения только тогда становятся измерениями, когда удовлетворяют основным принципам метрологии. Только в этом случае результаты наблюдений могут быть сравнимы, адекватно идентифицируемы и, следовательно, репрезентативны.

Как следует из физических основ теории измерений, чувствительность (или разрешение) метода — это его способность к выявлению сигнала определенной амплитуды. Точность — это способность прибора (метода) выявлять полезный сигнал на фоне помех. Самым чувствительным методом измерения геодеформаций является наклонмерно-деформометрический. Для того, чтобы в полной мере выявить полезный сигнал на уровне максимальной чувствительности приборов —  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  в единицах относительных деформаций, необходимо их заглублять (на 20 м и более) и помещать в специально оборудованные помещения, а в идеале организовывать скважинные наблюдения. Естественно, что только в этом случае «точность» и «чувствительность» наблюдений будут сопоставимы. Если расположить эти приборы в неглубоком (3–5 м) подвале, то уровень метеорологических и антропогенных воздействий существенно снизит точность наблюдений (до  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  единиц относительных деформаций) в то время, как чувствительность датчиков останется неизменной. По мере заглубления высокочувствительного датчика, которое увеличивает его помехозащищенность, точность прибора приближается к его чувствительности. Поэтому характеристики «точности» измерительных инструментов, декларируемых в рекламных проспектах фирм-изготовителей геодезического и геофизического оборудования — это, на самом деле, «чувствительность» измерительных устройств. Истинная точность этих методов (инструментов) будет объективно определяться конкретными условиями установки и режимом эксплуатации измерительного оборудования. Это тем более актуально в режиме многократной (повторной) полевой эксплуатации приборов.

Современная геодинамика — это многофакторное явление, которое обусловлено совокупностью природных и техногенных, эндогенных и экзогенных воздействий, изменяющихся в пространстве и во времени. В этом случае возникает ситуация, когда более чувствительный прибор (метод), измеряющий современные геодинамические процессы, будет более эффективно регистрировать не только полезный сигнал, но и помехи. Кроме того, следует иметь в виду, что стандартное геодезическое (наземное и спутниковое) и геофизическое оборудование предназначено, в первую очередь, для стационарных, «однократных» съемок. Задачи мониторинга, в первую очередь, требуют наличие многократных, повторных (в идеале непрерывных) измерений. А это накладывает дополнительные

требования к фильтрации переменных во времени помех различной природы. При изучении современных деформаций земной поверхности принципиально важной является проблема закрепления измеряемых точек (реперов) на местности и их сохранность. Классическая (наземная) геодезия за почти два века своего развития накопила значительный опыт по разработке различных типов (конструкций) реперов, которые используются в зависимости от грунтовых, геокриологических и климатических условий местности. При этом предусмотрены «антивандальные» мероприятия, сводящиеся к максимально возможному заглублению пунктов наблюдений. Это позволяет одновременно решать и вопросы повышения точности наблюдений, и проблемы «маскировки» реперов.

Используя спутниковые системы измерений деформаций земной поверхности, например, GPS/ГЛОНАСС, напротив, стремятся в целях реализации антивандальных мероприятий располагать приемные антенны на крышах зданий и сооружений, что повышает степень сохранности оборудования, но существенно снижает точность наблюдений. Важно отметить, что наземные геодезические методы при всей трудоемкости их полевой реализации, крайне просты и наглядны в методах обработки. В противоположность этому спутниковые наблюдения легче измеряются, но очень сложно, а подчас неоднозначно обрабатываются, что может привести к существенным искажениям итоговых оценок уровня современного геодинамического состояния недр.

Другая важная проблема заключается в том, что результаты повторных геодезических наблюдений часто используются специалистами наук о Земле в соответствии с существующими парадигмами научных направлений. Так, например, в период господствования фиксистских представлений в геотектонике, исследователи активно использовали результаты повторных нивелирных наблюдений вдоль протяженных (сотни и тысячи км) линий Государственного нивелирования. По этим данным были сделаны выводы о преобладании современных вертикальных движений земной коры.

Когда доминирующей парадигмой в тектонике и геодинимике стала тектоника плит, то оказалось, что для инструментального измерения скоростей современных горизонтальных движений литосферных плит материалы повторных, наземных геодезических наблюдений являются некондиционными. Действительно, измерение

горизонтальной компоненты смещений наземными геодезическими методами (триангуляция, трилатерация, светодальнометрия и т. п.), во-первых, имели меньшую точность по сравнению с нивелирными измерениями, а во-вторых, не могли обеспечивать большой пространственный охват территорий.

Появление спутниковых геодезических наблюдений ознаменовалось их широким использованием для определения скоростей и направленности горизонтальных движений литосферных плит. При этом сложилась противоположная ситуация. По данным ГНСС-измерений точность горизонтальной компоненты смещений земной поверхности оказалась выше, чем вертикальной, при большом пространственном масштабе наблюдений. Особенности технологии геодезических наблюдений позволяют существенно точнее измерять вертикальную составляющую смещений земной поверхности наземными методами, а горизонтальную компоненту — спутниковыми. Отсюда напрашивается вывод о принципиальной невозможности совместного анализа результатов измерения идентичных компонент движения, полученных наземными и спутниковыми методами на одинаковом уровне точности. Однако из основ теории измерений следует, что результаты наблюдений идентичных величин не должны зависеть от способа измерений. В противном случае вывод о преобладании вертикальных или горизонтальных движений в общем ходе геодинамического процесса будет отражать уровень технологических возможностей того или иного метода измерений. В прошлом веке, когда произошел переход от методов геодезических измерений, работающих в радиодиапазоне (радиодальномеры) к методам оптического диапазона (лазерные светодальномеры), для оценки точности приборов нового поколения, работающих на других физических принципах, проводилось сравнительное сопоставление результатов на различных объектах, находящихся в различных условиях. Стремительное развитие методов ГНСС-наблюдений и средств обработки данных, к сожалению, не сопровождалось тщательным сравнением результатов измерений, полученных спутниковыми и наземными методами. Методы ГНСС-измерений имеют принципиально иной способ получения сигнала, методику обработки измерений, а также способ организации пунктов наблюдений

Применительно к задачам современной геодинамики важно отметить две принципиальные трудности при использовании результатов наблюдений методами спутниковой геодезии.

Во-первых, подавляющее большинство исследований направлено на изучение горизонтальной компоненты смещений. Во-вторых, сеть наблюдений имеет малую густоту, по сравнению с наземными методами, что снижает их возможности при изучении локальных процессов. Таким образом, возникает необходимость комплексирования методов наземной и спутниковой геодезии и оценки соответствия результатов наблюдений, полученных разными методами.

В самое последнее время появились работы, которые направлены на решение этих проблем. В этих работах проведено сопоставление точности определения координат, полученных методами ГЛОНАСС и GPS [Галаганов и др., 2014; Кафтан и др., 2017], а также сопоставление между результатами, полученными наземными и спутниковыми системами геодезических наблюдений [Кузиков, 2014]. Было показано, что эффективность применения системы ГЛОНАСС не значительно уступает GPS-наблюдениям и может быть использована при исследовании современных геодинамических процессов, особенно при условии наращивания спутниковой группировки ГЛОНАСС. Однако сопоставление наземных и спутниковых измерений указывает на то, что среднегодовые скорости горизонтальных смещений, полученные синхронно на совмещенных пунктах, отличаются более, чем на порядок [Кузьмин, 2017]. Отсюда следует необходимость проведения целенаправленных исследований по сопоставительному анализу результатов, получаемых методами спутниковой и наземной геодезии, на совмещенных (в пространстве и во времени) системах наблюдений для осуществления правильной идентификации наблюдаемых деформаций.

При проведении дискретных (повторных) наблюдений принципиально важный вопрос заключается в установлении оптимальной пространственно-временной детальности измерений. Как правило, большая пространственная детальность наблюдений характерна для относительно коротких наблюдательных сетей и наоборот. Поэтому значительные по пространственному охвату нивелирные наблюдения имеют редкую частоту опроса и малую густоту наблюдательных пунктов. Необходимо проводить наблюдения, тщательно соблюдая принцип соответствия между динамическими свойствами объекта и пространственно-временной детальностью измерений, поскольку невозможно редкими пространственно-временными сетями производить измерения локальных, быстропротекающих процессов.

Для учета этих обстоятельств полезно учитывать два соотношения неопределенностей, которые известны из теории колебаний и волн. Первое соотношение связывает неопределенность (погрешность измерения) в определении волнового числа  $\Delta K (K = 2\pi/\lambda)$  и неопределенность в пространственной детальности измерений (густоте наблюдательных пунктов)  $\Delta X: \Delta K \cdot \Delta X = 1$ . Второе обуславливает взаимосвязь между погрешностью определения частоты наблюдаемого процесса  $\Delta\omega$  и неопределенностью во временной дискретности наблюдений  $\Delta t: \Delta\omega \cdot \Delta t = 1$ . Из первого соотношения следует, что с помощью больших расстояний между пунктами наблюдений, нельзя выявить малую длину волны  $\lambda$  (малую по пространственному размеру аномалию деформаций) и наоборот. Второе соотношение утверждает, что более короткопериодные процессы необходимо регистрировать наблюдениями с повышенной частотой опроса [Кузьмин, 2014a].

Из основ теории измерений следует невозможность отождествления абсолютных и относительных характеристик измерений, но хорошо известно, что существующие методы изучения современных геодинамических процессов в основном являются относительными.

Можно рассмотреть следующий мысленный эксперимент. Пусть на земной поверхности имеются два ( $A$  и  $B$ ) прочно закрепленных репера, которые ориентированы по азимуту «Север – Юг» таким образом, что пункт  $A$  расположен южнее пункта  $B$ . Можно показать, что абсолютному понятию «укорочение» будет соответствовать пять различных кинематических ситуаций с относительными горизонтальными смещениями поверхности и, следовательно, различными геодинамическими обстановками (рис. 1).

Аналогично, абсолютному понятию «наклон на юг» будут соответствовать пять различных геодинамических ситуаций с относительными вертикальными смещениями земной поверхности.

Это справедливо для систем наблюдений при малом количестве обсерваторий или для коротких профилей с малым количеством наблюдательных пунктов. Когда имеются наблюдения с высоким пространственно-временным разрешением, то существует возможность определить «абсолютное» значение смещения земной поверхности. Например, при локальных просадках земной поверхности можно считать, что амплитуда аномального изменения, отсчитываемая от «нуля», определяемого точностью наблюдений,

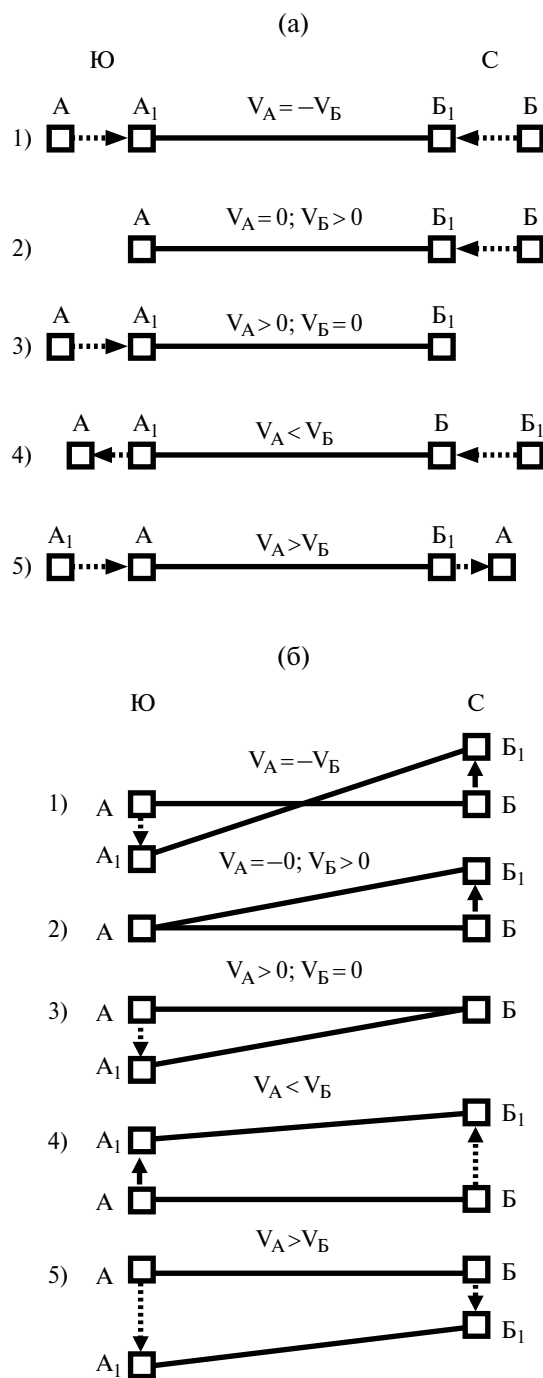


Рис. 1. Относительный характер горизонтальных (а) и вертикальных (б) смещений реперов при абсолютном укорочении и абсолютном наклоне на Юг.

есть абсолютное вертикальное смещение земной поверхности, имеющее однозначное кинематическое объяснение и геодинамическую идентификацию.

Другим примером неоднозначной идентификации результатов относительных измерений служат данные многократных повторных



нивелирных наблюдений. Обычно используют два варианта построения графиков изменения превышений реперов по профилю и во времени: «эволюционный» и «пульсационный» [Кузьмин, 1999]. В «эволюционном» варианте изменения вертикальных смещений земной поверхности определяются вычитанием текущих величин превышений от значений, полученных при первом наблюдении. В этом случае прослеживается временная эволюция смещений земной поверхности. В «пульсационном» варианте используются разности между смежными эпохами наблюдений и определяются периоды пульсаций вертикальных движений.

На рис. 2 представлена трансформация результатов повторных, высокоточных нивелирных наблюдений на Камчатском геодинимическом полигоне [Churikov, Kuzmin, 1998; Kuzmin, Churikov, 1999; Кузьмин, 1999]. Из проведенных 156 циклов наблюдений искусственным путем сформированы данные по 11 циклам, интервал между которыми составляет 3 месяца.

Совместный анализ обоих графиков ярко демонстрирует относительный характер смещений. Так, если рассматривать только эволюционный график в эпоху 7–1, то ясно видны два

локальных минимума (просадки земной поверхности). Если же рассматривать только пульсационный график, то в эпоху (7–6), то есть **в то же время**, наблюдаются два максимума (поднятия земной поверхности). Отсюда следует вывод, что необходимо тщательно учитывать относительный характер измеряемых величин в современной геодинамике.

Иногда идентификация истинных смещений невозможна, в рамках использования одного метода в принципе. Это, например, происходит при идентификации измеренных смещений земной поверхности в методе спутниковой радарной интерферометрии (*РСА*-интерферометрии). Известно, что данные *РСА*-интерферометрии позволяют определять смещения в направлении видения спутника (*LOS*) относительно выбранного в качестве точки отсчета радарного изображения. Поэтому определение полного вектора смещений в форме трех естественных составляющих в рамках только *РСА*-интерферометрии (без дополнительных данных) принципиально невозможно, поскольку необходимо при одном известном значении (величины *LOS*-смещения) определить три неизвестные компоненты полного вектора смещений поверхности. Необходимо либо комплексировать радарные данные

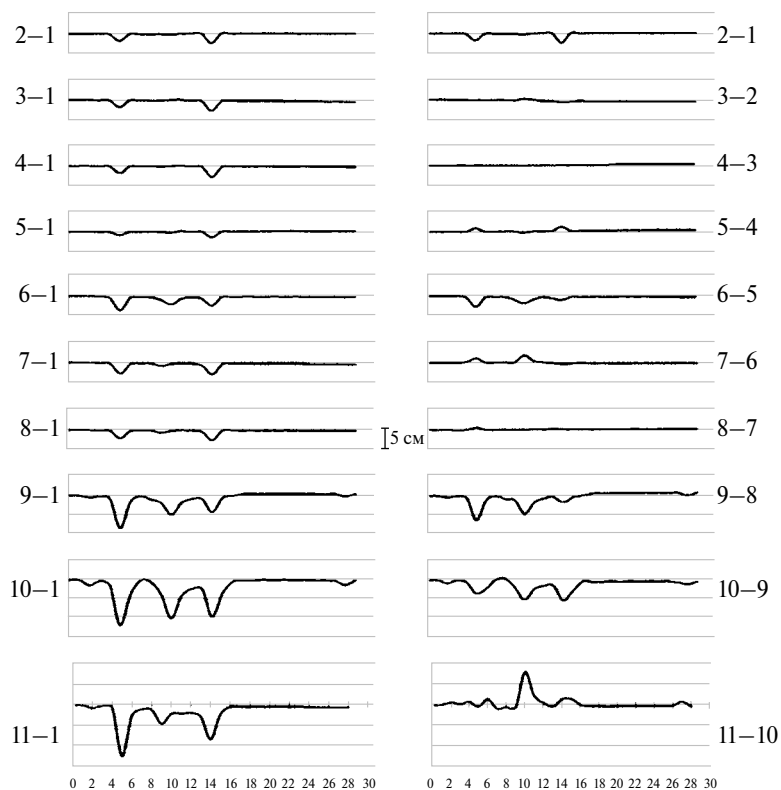


Рис. 2. «Эволюционные» (слева) и «Пульсационные» (справа) графики вертикальных смещений земной поверхности.

с результатами геодезических измерений, либо использовать априорную информацию о наблюдаемом объекте (процессе) для модельной оценки компонент полного вектора смещений земной поверхности.

Эти подходы реализованы специалистами ИФЗ РАН в целом ряде работ, посвященным анализу смещений в очаговых зонах землетрясений [Михайлов и др., 2010], при изучении оползневых процессов [Михайлов и др., 2013] а также при исследовании деформаций земной поверхности в пределах разрабатываемых месторождений и подземных хранилищ газа [Михайлов и др., 2013; Кузьмин, 2014а; б]. К сожалению, во многих работах, особенно отечественных исследователей, величина измеренного «наклонного расстояния» LOS определяется как вертикальное смещение земной поверхности, что приводит к принципиально неверной идентификации наблюдаемых геодинамических явлений.

#### **Унаследованность современных движений, парадоксы скоростей и механизм деформационной активности разломов**

На протяжении последних полвека исследования по современной геодинамике интенсивно развивались по трем основным направлениям, отмеченным во Введении данной статьи. Следует отметить, что развитие спутниковых технологий измерения разномасштабных деформационных процессов привело к слиянию первого и третьего разделов проекта «Современные движения земной коры (современная геодинамика)». Исследования, проводимые в прошлом веке методами наземной геодезии и геофизики (наклономерно-деформометрические измерения), позволили осуществить картографирование современных вертикальных движений земной поверхности крупных регионов Земли, а сеть астрономических и геофизических обсерваторий провели фундаментальное исследование глобальных деформаций Земли как планеты.

В нашей стране, благодаря совместным усилиям специалистов геодезической службы и академических институтов, были созданы карты современных вертикальных движений земной коры для различных территорий. Для больших территорий это: «Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы (1:2 500 000)»; «Карта современных вертикальных движений на территорию СССР (1:5 000 000)». Кроме того, были проведены детальные работы по составлению аналогичных карт для отдельных регионов: «Карта скоростей

современных вертикальных движений земной поверхности Прикаспийского региона» [Кафтан и др., 1995]; «Карта современных вертикальных движений земной коры на территорию Северо-Запада России и Финляндии» [Mäkinen, Kaftan, et al., 2008; и др.] Накопленный материал позволил провести детальный анализ информативности карт современных движений в зависимости от пространственно-временной детальности исходной геодезической информации [Кафтан, 1996].

Появление спутниковых технологий измерения современных движений земной поверхности позволило в рамках единого метода ГНСС изучать глобальные и региональные процессы, но преимущественно для горизонтальной компоненты движений. Построена устойчивая схема глобальной кинематики литосферных плит [Стеблов и др., 2005; Kogan, Steblov, 2008]. Определены скорости и направленность горизонтальных смещений земной поверхности в различных регионах [Ашурков и др., 2016; Галаганов и др., 2016; 2018; Кузиков, Мухамедиев, 2010; Левин и др., 2014; Лухнев и др., 2010; Саньков и др., 2014; Тимофеев и др., 2018].

Анализ и сопоставление глобальной и региональной информации о современных геодинамических процессах был существенно дополнен работами на геодинамических полигонах различного целевого назначения. Эти работы в нашей стране, а в рамках Международной Ассоциации геодезии (МАГ) на международном уровне, проходили под руководством выдающегося отечественного ученого Ю.Д. Буланже. Большинство национальных и международных симпозиумов по исследованию современных движений земной коры были организованы под его руководством и при активном участии специалистов Института физики Земли. На базе Института был создан постоянно действующий «Общественный семинар по проблеме «Современные движения земной коры», который в настоящее время трансформирован в «Общественный семинар по современной геодинамике и геомеханике». На этом семинаре обсуждались самые актуальные проблемы изучения современных деформационных процессов на геодинамических полигонах и вырабатывались базовые основы метрологического обеспечения измерений и анализа получаемой информации.

Согласно традиционной точке зрения, современные движения земной поверхности платформенных, асейсмических, областей характеризуются относительно слабыми скоростями до

3÷5 мм в год, в отличие от орогенных, сейсмоактивных регионов, где скорости могут достигать величин значительно больших. Этот вывод следует из анализа карт современных вертикальных движений земной коры, построенных по данным повторных нивелирований больших территорий с интервалами между наблюдениями в десятки лет. Одной из основных особенностей пространственного распределения современных вертикальных движений земной поверхности больших территорий (порядка сотен и более километров) являются протяженные аномальные зоны, представленные градиентным характером аномальных изменений, которые контролируются зонами глубинных разломов. При этом величины горизонтальных градиентов движений составляют величин первых мм/км в год. На графиках, отражающих линейную (профильную) составляющую движений, эти градиентные участки имеют форму ступенеобразных изменений в полном соответствии с общепринятыми представлениями о медленных, дифференцированных вертикальных перемещениях смежных объемов среды (блоков земной коры) вдоль зон разломов под воздействием изменений регионального поля напряжений во времени.

Однако, когда были проведены первые сравнения скоростей современных движений, измеренных геодезическими методами в платформенных регионах, со скоростями, определенными по геолого-геоморфологическим данным, возникла проблема резкого их несоответствия. Впервые наиболее полно эта проблема была рассмотрена в работе [Буланже, Магницкий, 1974] на примере «парадокса больших скоростей» современных вертикальных движений земной коры. Было показано, что если предположить, что: «Современные движения являются, как правило, продолжением движений ближайшего геологического прошлого», то «... при скоростях нескольких мм/год в течение одного четвертичного периода, т. е. за  $10^6$  лет на платформах возникли бы горы и впадины в несколько км высотой (глубиной), чего фактически нет». По существу, «парадокс больших скоростей» представляет собой инструментально установленный факт отклонения от унаследованного характера современных движений коры от движений прошлых геологических эпох.

Для объяснения этого парадокса были привлечены представления [Магницкий, Калашникова, 1978] о знакопеременном и/или прерывистом (пульсационном) характере движения астеносферного слоя, который приводит к знакопеременным движениям земной поверхности,

что при больших временах осреднения приводит к компенсации движений различных знаков (поднятий и опусканий). Предложенные механизмы достаточно хорошо объясняли формирование основных пространственно-временных характеристик современных геодинамических процессов, полученных по результатам повторных нивелирных наблюдений вдоль линий Государственной нивелирной сети с большими интервалами между повторениями (десятки лет) и расстояниями между измерительными пунктами (десятки км) и соответствовали, в целом, картам современных вертикальных движений.

Подобная система взглядов господствовала в исследованиях по современной геодинамике до того момента, когда в середине шестидесятых годов XX века под эгидой Междудементственного геофизического комитета при Президиуме АН СССР была развернута обширная программа изучения современных движений земной коры на геодинамических полигонах. Результаты повторных наблюдений на этих полигонах, с интервалами времени между повторениями в месяцы и годы, выявили наличие интенсивных (10–20 мм в год и более), локальных движений, которые имели пульсационный и короткопериодический характер. Это не явилось большой неожиданностью для специалистов, поскольку первые геодинамические полигоны закладывались в орогенных, сейсмоактивных регионах.

Знаковым событием, разрушившим привычную парадигму унаследованного характера развития современных геодинамических процессов, явилась организация Министерством нефтяной промышленности СССР в начале семидесятых годов прошлого века долгосрочной программы изучения современных движений земной коры в нефтегазоносных осадочных бассейнах [Сидоров, Кузьмин, 1989; Сидоров и др., 1989]. Крайне важно, что параметры измерительных систем (густота пунктов, частота опроса и точность наблюдений) на геодинамических полигонах, расположенных в платформенных, асейсмичных районах, были идентичны системам измерений, расположенным в сейсмоактивных областях.

Выяснилось, что на платформах имеют место интенсивные локальные аномалии современных движений земной поверхности, приуроченные к зонам разломов различного типа и порядка. Эти движения высокоамплитудны (50–70 мм/год), короткопериодичны (0,1–1 года), пространственно локализованы (0,1–1 км), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. Среднегодовые

скорости относительных деформаций оказались очень высоки ( $5 \cdot 10^{-5}$ – $10^{-4}$ /год) и поэтому они были определены как **суперинтенсивные деформации (СД)** [Кузьмин, 1999]. Естественно, что подобный, «высокочастотный» спектр современных вертикальных движений оказался труднообъяснимым в рамках динамики астеносферных процессов.

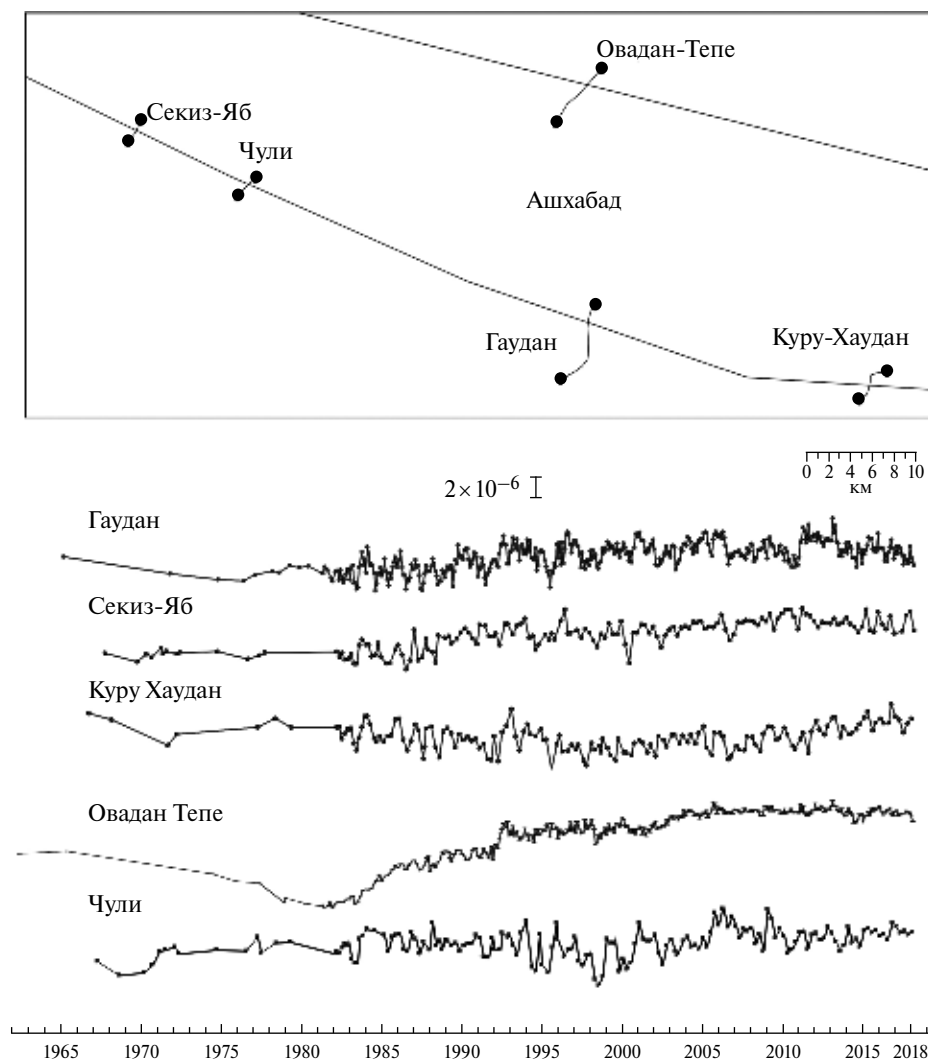
Если имеется унаследованная схема деформирования, то локальные деформации в зонах разломов должны иметь монотонный, однонаправленный характер развития во времени в полном соответствии с морфолого-генетическими характеристиками разрывных структур и региональной схемой тектонических напряжений. Однако оказалось, что локальные деформационные процессы в разломных зонах имеют явно выраженный автономный характер и развиваются в обстановке квазистатического нагружения.

Результаты многочисленных исследований показали, что скорости относительных горизонтальных деформаций земной поверхности, полученные по данным ГНСС-измерений, достигают величин очень малых значений ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  в год). Такая низкая скорость относительных горизонтальных деформаций противоречит скоростям монотонного однонаправленного движения литосферных плит. Все это позволяет трактовать выявленные несоответствия как «парадокс малых скоростей относительных деформаций» земной поверхности [Кузьмин, 2009, 2013]. При этом, если «парадокс больших скоростей современных вертикальных движений» можно было объяснять суперпозицией вертикальных движений различных знаков, то с «парадоксом малых скоростей относительных деформаций» все обстоит намного сложнее. Простое объяснение этого парадокса состоит в том, что расстояния между пунктами ГНСС-измерений слишком велики, что, естественно, приводит к существенному занижению величины относительной деформации. Однако привлечение к анализу данных по длительным рядам наземных наблюдений за горизонтальными и вертикальными смещениями на расстояниях 1–10 км показывает, что этот парадокс остается в силе. В качестве примера можно рассмотреть результаты многолетних нивелирных и светодальномерных наблюдений, которые проводятся на регулярной основе в Копетдагской сейсмоактивной зоне на протяжении последних 50 лет сотрудниками Института сейсмологии и физики атмосферы Академии наук Туркменистана [Изюмов, Кузьмин, 2014; Кузьмин, 2017].

Как известно, геодинамика Копетдагского сейсмоактивного региона обусловлена динамическим взаимодействием Иранской и Туранской плит. Основной зоной коллизии этих плит является Передовой разлом Копетдага (Главный Копетдагский надвиг). Естественно, что подобная кинематика плит, должна приводить к систематическому (с юга на север) надвигу Копетдага на Туранскую плиту вдоль зоны Передового разлома Копетдага, а также к постоянному правостороннему сдвиговому перемещению вдоль этого разлома. При этом среднегодовые скорости подобных смещений должны иметь величину около 1 см в год. На это указывают результаты спутниковых геодезических измерений [Кузьмин, 2009; 2017]. Если следовать этой схеме и предполагать полную унаследованность современных движений земной коры от прошлых геологических эпох, то существующая система геодеформационных наблюдений, развернутая в центральной части Копетдагского региона и имеющая многолетнюю (более 50 лет) историю наблюдений, должна уверенно фиксировать систематический наклон предгорных участков земной поверхности на север–северо-восток по нивелирным данным и постоянное увеличение длин линий, пересекающих Передовой разлом Копетдага под углом  $45^\circ$  и менее.

Исследования проводились в пределах активных разломов и в первую очередь в зоне Передового разлома Копетдага. Нивелирные и светодальномерные наблюдения проводились на специально организованных тестовых деформационных площадках. Длины нивелирных профилей и светодальномерных линий на этих площадках варьировались в пределах 1–10 км. Частота опроса, в среднем, составляет от 1 раза в месяц до 4 раз в год для нивелирных наблюдений и порядка 1–2 раза в неделю для светодальномерных измерений.

На рис. 3 представлены результаты многолетних (почти 50 лет) высокоточных нивелирных наблюдений, проводимых по локальным профилям, пересекающим Передовой разлом Копетдага и Северо-Ашхабадский разлом. При этом измерительной сетью контролируется полоса Передового разлома протяженностью порядка 100 км. Из рисунка видно, что верхняя кривая, которая относится к Северо-Ашхабадскому разлому, содержит длиннопериодные, знакопеременные колебания наклона земной поверхности. Четыре нижние кривые наклонов соответствуют Передовому разлому. Они характеризуются короткопериодическими знакопеременными изменениями. Эти кривые, в отличие от верхнего

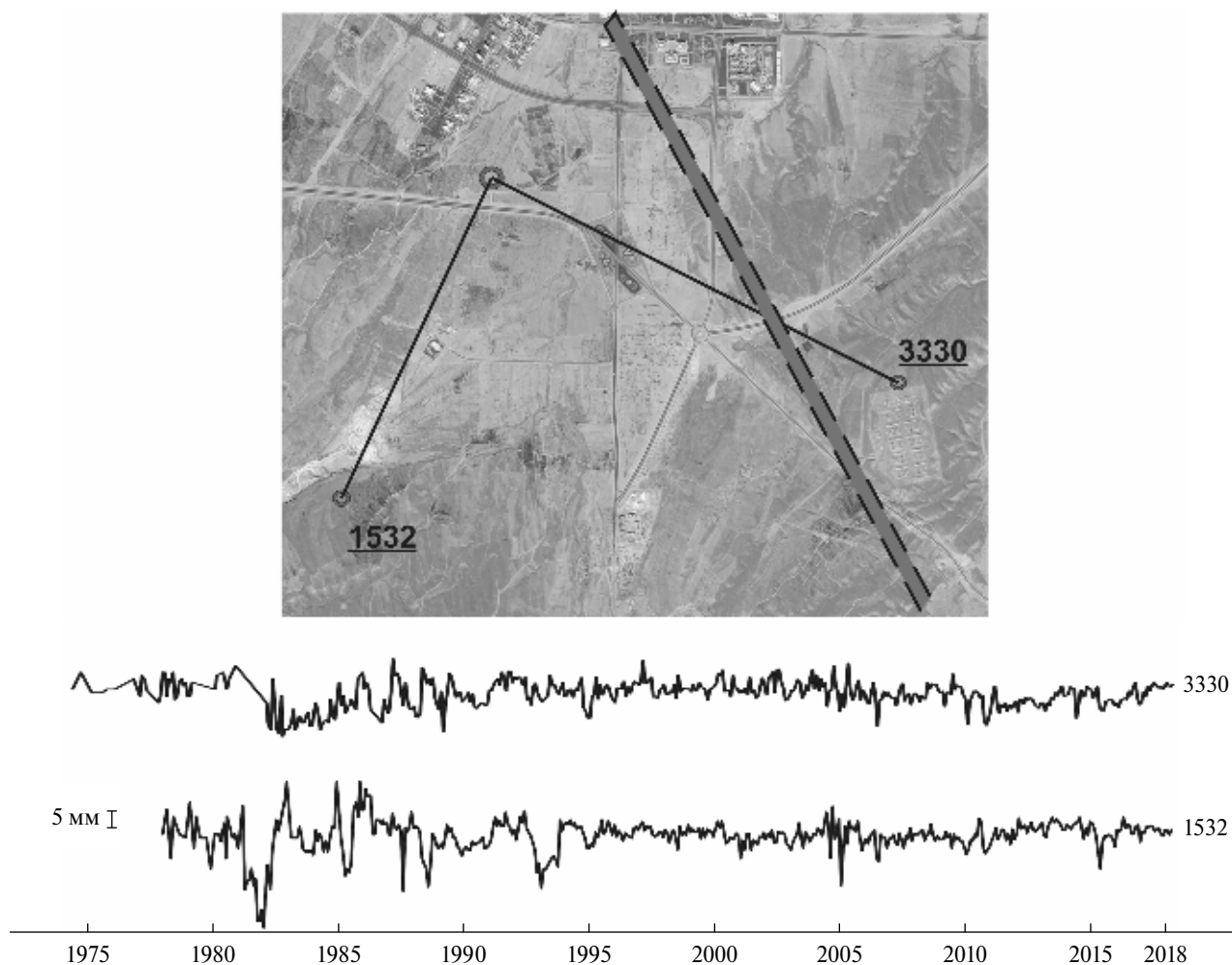


**Рис. 3.** Результаты многолетних нивелирных наблюдений вдоль локальных профилей, пересекающих зоны разломов. Верхняя и нижняя линия – Северо-Ашхабадский и Передовой разлом Копетдага, соответственно.

графика, практически подобны. Визуальный анализ указывает на отсутствие заметных трендовых изменений. Для удобства сопоставительного анализа результаты вертикальных превышений реперов построены в едином масштабе путем деления их значений на расстояние между реперами. Таким образом, система наблюдений представляет собой 5 «длиннобазисных наклонмеров», которые пересекают 2 разломные зоны и ориентированы в субмеридиональном направлении. Очевидно, что деформационный процесс в зоне Северо-Ашхабадского разлома развивается автономно и не зависит от движений в зоне Передового разлома [Кузьмин, 2015]. Это обусловлено особенностями взаимосвязи деформационных и сейсмических процессов в этом районе [Кузьмин, 1999; Изюмов, Кузьмин, 2014].

Анализ среднегодовых скоростей наклонов за период более 50 лет, показал наличие в зоне Северо-Ашхабадского разлома (Овадан – Тепе) среднегодовой скорости наклона величиной около  $2 \cdot 10^{-7}$ /год. В зоне Передового разлома скорости наклонов оказались значительно меньше: Секиз-Яб –  $(3 \cdot 10^{-8})$ /год, Чули –  $(2 \cdot 10^{-8})$ /год, Гаудан –  $(2 \cdot 10^{-8})$ /год, Куру-Хаудан –  $(6 \cdot 10^{-9})$ /год. Таким образом, средняя скорость наклона в пределах Передового разлома равна –  $(2.5 \cdot 10^{-8})$ /год.

Аналогичная картина складывается и при анализе результатов режимных светодоальномерных наблюдений за горизонтальными движениями земной поверхности. И в данном случае система наблюдений организована таким образом, что одна линия (3330 м) пересекает зону разлома, а другая (1532 м) расположена в пределах блока (рис. 4).



**Рис. 4.** Схема измерительной сети (сверху) и изменения горизонтальных смещений во времени вдоль линий № 3330 и № 1532.

Из рис. 4 видно, что кривые носят сложный характер. Видны периоды направленных смещений как положительных (удлинение), так и отрицательных (укорочение). Для выявления среднегодовой скорости смещений была проведена интервальная оценка скорости смещений за период линейного тренда внутри интервала. Затем средние значения трендов скоростей суммировались с учетом знака изменений длин линий (удлинения, укорочения). Вдоль линии № 3330 отмечается укорочение на величину  $-0.7$  мм за 46 лет. Среднегодовая скорость деформации укорочения составляет величину  $-0.015$  мм/год. Укорочение вдоль линии № 1532, которая направлена ортогонально простиранию Копетдага и линии Передового разлома, за период 40 лет составило  $-2.1$  мм. Среднегодовая скорость этого укорочения  $-0.052$  мм/год. Таким образом, линия, пересекающая Передовой разлом сокращается, что противоречит правому сдвигу,

который установлен по геологическим данным. При реализации правого сдвига линия № 3330 должна монотонно удлиняться, а этого не происходит. Ситуация скорее соответствует левому сдвигу. По геологическим данным скорость правого скольжения по Передовому разлому составляет  $2$  мм/год. По данным многолетних геодезических наблюдений скорость скольжения в 133 раза меньше! Для линии № 1532 скорость относительной деформаций будет равна  $-4 \cdot 10^{-8}$ /год, а для линии № 3330  $-5 \cdot 10^{-9}$ /год.

Интересно сопоставить полученные скорости относительных деформаций и наклонов с таким эталонным геодинамическим процессом, как земной прилив. Для широты Ашхабада амплитуда лунной полусуточной волны  $M_2$ , которая является доминирующей из всего спектра приливных волн, равна  $\approx 2.3 \cdot 10^{-8}$  для приливных наклонов и  $1.6 \cdot 10^{-8}$  для приливных горизонтальных деформаций, соответственно.

В этом случае, *средняя скорость относительных деформаций в сейсмоактивном регионе, будет равна или меньше 1–2 амплитуд земноприливных деформаций в год!!!* Это означает, что зона Ирано-Туранского сегмента коллизии Аравийской и Евразийской плит находится в состоянии квазистатического (мягкого) нагружения в течение последних 50 лет. При этом, в зоне Передового и Северо-Ашхабадского разломов неоднократно отмечались периоды локальной (ширина аномалий 0.5–1.0 км) деформационной активизации со скоростями деформаций  $3–5 \cdot 10^{-5}$ /год [Кузьмин, 2013; 2016]. Важно подчеркнуть, что во всех перечисленных выше исследованиях в сейсмоактивных зонах скорости среднегодовых относительных горизонтальных деформаций заключены в интервале  $– 10^{-8}$ /год– $10^{-9}$ /год, что также соизмеримо с уровнем земноприливных деформаций.

Детальные исследования современных деформаций в зонах платформенных, слабосейсмичных регионах показали, что и там наблюдается резкое усиление (на 1–2 порядка) скоростей относительных деформаций в зонах разломов [Кузьмин, 1999].

Для демонстрации высокой активности разломных зон слабосейсмичных регионов на рис. 5 представлены результаты повторных нивелирных наблюдений, вдоль профилей, пересекающих разломы, которые сопоставлены с геологическими разрезами. Учитывая, что среднее значение ширины аномалий  $L$  имеет величину

около 1 км, а интервал повторения наблюдений – 10–12 месяцев, то величина скорости деформаций будет равна  $4–6 \cdot 10^{-5}$  в год. Видно, что по морфологии кривые похожи и представляют собой локальные изгибы вниз земной поверхности. Максимумы кривых соответствуют проекции разломов на земную поверхность. Сравнивая рис. 5а и рис. 5в видно, что форма и амплитуда локальных аномалий идентичны для обеих разломных зон. Однако из геологического разреза следует, что в первом случае разлом имеет высокую амплитуду смещений, а во втором малую. Сложный характер кривой вертикальных смещений на рис. 5б является наложением двух одиночных аномалий от двух близко расположенных соседних разломов. Подробно этот эффект описан в работе [Кузьмин, 2015].

Аномалии имеют практически симметричную форму, что не соответствует сдвиговым перемещениям бортов разлома в вертикальной плоскости. Создается впечатление, что источником аномалий является раздвиг бортов разломов под воздействием растягивающих усилий. Этот тип локальных аномалий смещений, названных в честь греческой буквы,  $\gamma$ -аномалией, отмечаются повсеместно в том случае, когда имеются геодезические измерения с повышенной пространственно-временной детальностью. Особенно важна пространственная детальность наблюдений. Если расстояния между реперами составляет 0.1–0.3 км, то практически во всех исследуемых регионах наблюдаются локальные

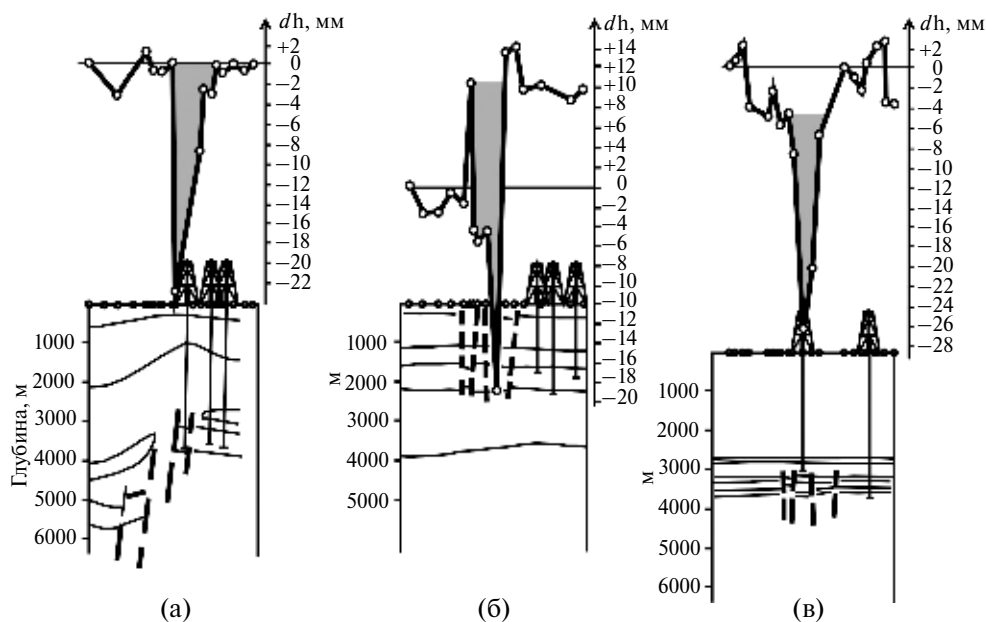


Рис. 5. Примеры вертикальных смещений земной поверхности для слабосейсмичных регионов. Припятская впадина (а); Пермской Приуралье (б); Среднее Приобье (в).

оседания земной поверхности (локальные изгибы) симметричной или квазисимметричной формы (Кузьмин, 2008; 2014а).

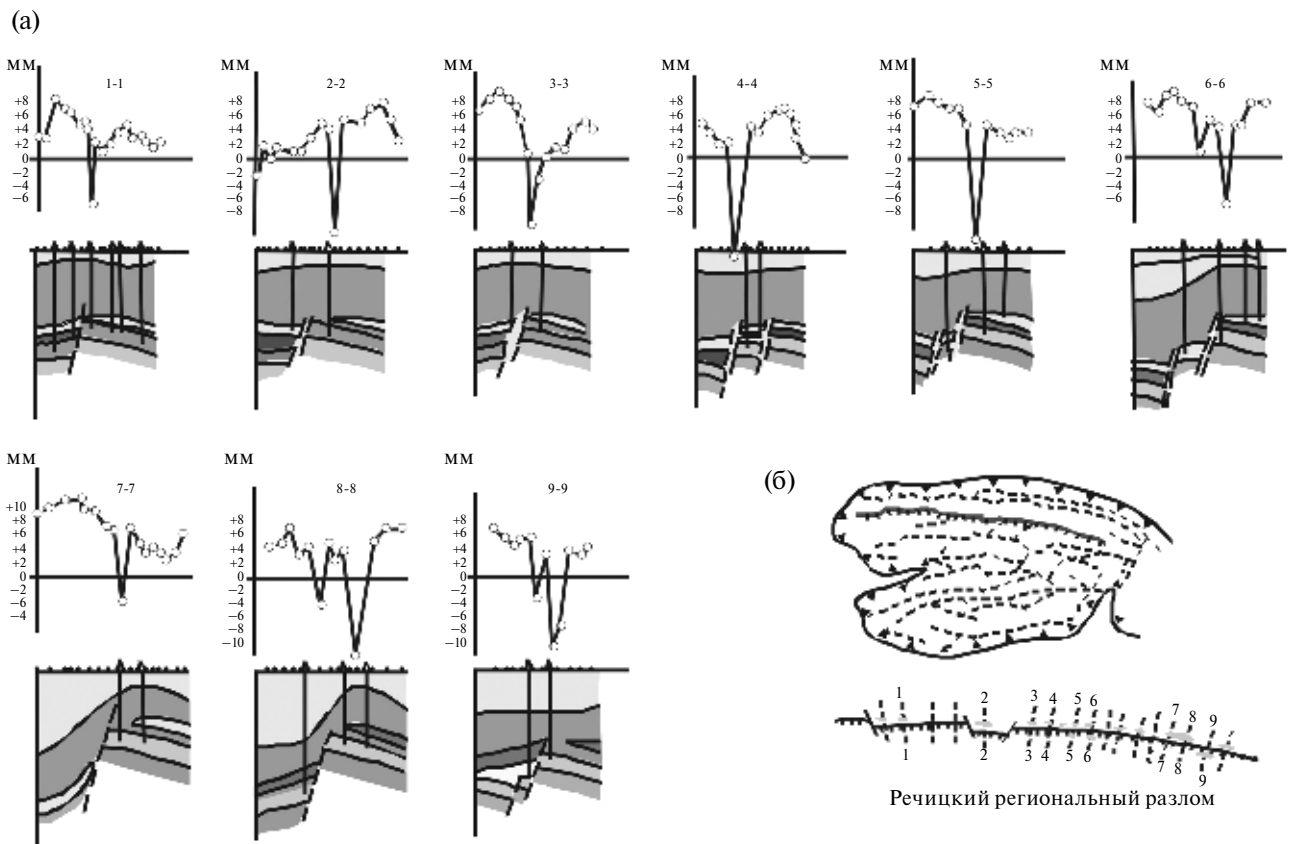
Для выявления тонкой структуры деформационных процессов на локальном уровне был проведен уникальный эксперимент. Вдоль простираения регионального Речицкого разлома (Припятская впадина, Белоруссия) было исследовано пространственное распределение вертикальных смещений на основе 26 квазиортогональных пересечений зоны разлома нивелирными профилями [Кузьмин, 2009].

Только на 9 профилях были выявлены аномальные деформации. Из рис. 6а следует, что величины среднегодовых скоростей варьируют в пределах от 10 мм в год до 20 мм в год. Морфологически смещения идентичны и представляют собой узкие пикообразные просадки земной поверхности, имеющие ширину 0.5–1.0 км. Местоположение Речицкого разлома в пределах Припятской впадины и номера профилей, на которых были выявлены аномальные смещения, показаны на рис. 6б.

На рис. 7 представлено площадное распределение деформационных аномалий на территории

Припятской впадины за весь почти 20-летний период наблюдений. Общая площадь покрытия нивелирной сетью составляет 30 000 км<sup>2</sup>. Среднее расстояние между нивелирными пунктами (показаны точками) – 250–300 м. Из рисунка видно, что зоны аномальных деформаций представлены дискретными полосами широтного простираения, приуроченными к разломным зонам, каждая из которых состоит из набора активизированных фрагментов.

В центральной части выделяется зона Речицкого разлома, в пределах которой идентифицировано наибольшее количество активизированных фрагментов. Необходимо отметить, что аномалии выявляются только в разломных зонах широтной и квазिशиротной ориентации. В зонах разломов квазимеридиональной ориентировки аномальные деформации земной поверхности не обнаружены. И это несмотря на то, что конфигурация нивелирной сети обеспечивала пересечение квазимеридиональных разломов. Очевидно, что данная картина площадного распределения локальных аномалий отражает характер регионального напряженного состояния,



**Рис. 6.** Распределение вертикальных смещений земной поверхности по профилям вкост простираения Речицкого разлома (а) и местоположение нивелирных профилей (б).



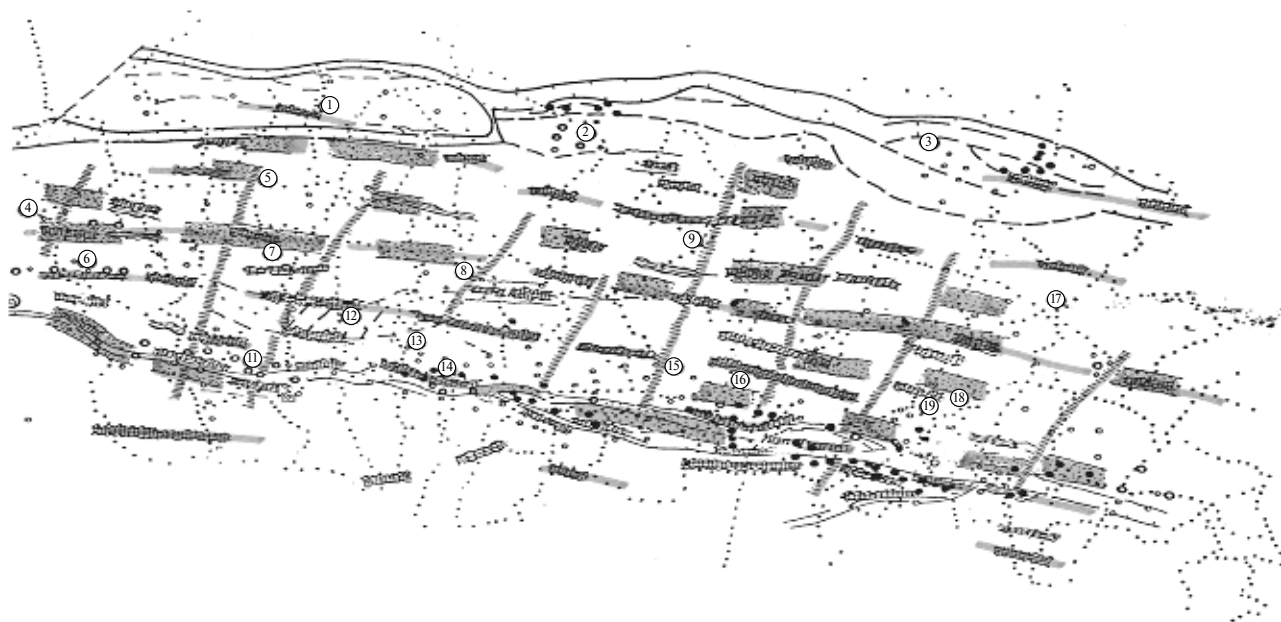


Рис. 7. Площадное распределение аномалий современных вертикальных движений земной поверхности в пределах Припятской впадины.

а именно, горизонтальное квазимеридиональное растяжение Припятского палеорифта.

Отсюда следует три важных вывода: во-первых, показано, что даже в пределах одной разломной зоны картина пространственного распределения деформаций носит контрастно-неоднородный, дискретный характер; во-вторых, полученные результаты указывает на отсутствие ступенеобразных вертикальных смещений в пределах столь ярко выраженных разломных зон сбросового типа; в-третьих, морфологический тип (локальные, симметричные просадки) выявленных аномалий современных вертикальных движений соответствует характеру регионального поля напряжений. Подробный анализ других разломных зон, расположенных в других регионах мира [Кузьмин, 1999; 2018], так же выявил повсеместное проявление аномалий  $\gamma$ -типа и отсутствие значимых ступенеобразных смещений, т. е. отсутствие унаследованности современных движений.

Современное геодинамическое состояние недр – многофакторное явление, обусловленное совокупностью природных и техногенных, эндогенных (глубинных) и экзогенных (поверхностных) воздействий, изменяющихся в пространстве и во времени. Приведенные выше результаты высокоточных геодезических наблюдений сопровождались тщательной селекцией помех экзогенного и техногенного генезиса. Это позволяет рассматривать выявленные характеристики

современных вертикальных и горизонтальных движений в зонах разломов как проявление тектонических процессов.

Эндогенные природные воздействия подразделяются по механизмам формирования на эволюционные, пульсационные и знакопеременные [Кузьмин 1999]. Длительность протекания этих процессов составляет интервал от  $10^9$  до  $10^3$  лет. При этом установлена четкая закономерность – уменьшение пространственно-временного масштаба процессов ведет к уменьшению глубины, размеров и длительности воздействия источника аномальных движений и наоборот.

Согласно традиционным представлениям динамика разломов обусловлена силовым воздействием меняющегося во времени регионального поля тектонических напряжений (эндогенное воздействие), которое приводит к сдвиговым перемещениям смежных объемов (плит, блоков) среды, локализованных в пределах собственно разломных зон. В этом случае уровень и длительность приложенной нагрузки должны соответствовать уровню и длительности деформационной реакции среды. Естественно, что в случае упругой среды подобное соответствие полностью выполнимо. Однако считать среду только упругой справедливо не во всех случаях. Тем более, что исследуется степень унаследованности процессов от прошлых геологических периодов. В этой связи, представляется актуальным рассмотреть вопрос о соответствии амплитуды

и длительности простейшего синусоидального воздействия на среду с типичной Максвелловской реологией.

Пусть в упруго-вязкой среде Максвелла в начальный момент времени начинает действовать источник периодических возмущений (напряжений)  $\sigma = \sigma_0 \cdot \sin \omega t$ . Можно показать [Кузьмин, 2013], что деформация такой среды будет иметь вид:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( \sin \frac{2\pi t}{T} - \frac{T}{2\pi\tau} \cdot \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{T}{2\pi\tau} \right). \quad (1)$$

В этой формуле  $\tau = \eta/E$  – отношение коэффициента вязкости к упругому модулю (время релаксации);  $T$  – период гармонического воздействия. Из формулы видно, что минимальное искажение синусоиды напряжений происходит, когда период релаксации существенно превосходит (в идеале на порядок и более) период возмущений.

Если использовать типичные реологические параметры земной коры и верхней мантии [Биргер, 2012; Трубицын, 2016; Karato 2008], то время релаксации определяется на уровне  $10^3$ – $10^5$  лет. Естественно, что в этом случае весь наблюдаемый спектр современных движений в зонах разломов, который заключен в интервале времени  $10^{-1}$ – $5 \cdot 10^1$  лет, невозможно описать с позиций прямого силового воздействия на вязкоупругую среду. Эти воздействия являются квазистатическими нагрузками по отношению к временным флуктуациям современных деформаций в разломах. Таким образом, многочисленные эмпирические данные, включая приведенные выше, входят в «парадоксальное» противоречие с представлениями о степени соответствия приложенных воздействий и деформационных реакций среды в зонах разломов.

Для разрешения этих «парадоксов» были использованы методы наследственной механики деформируемых сред [Работнов, 1977]. Рассматривая для феноменологической иллюстрации одномерное уравнение развития деформации во времени, можно записать:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_0^t K(t-\theta, \sigma) \cdot \sigma(\theta) d\theta, \quad (2)$$

где:  $\sigma(t)$  и  $E(t)$  – приложенное напряжение и модуль Юнга соответственно;  $(t-\theta)$  – история нагружения,  $K$  – интегральное ядро Вольтерра, характеризующее функцию памяти (унаследованности) процесса. В уравнении (2) полагается, что рассматриваемая среда обладает зависящими

от времени жесткостными характеристиками. Учитывая, что установившееся вязкое течение (установившаяся ползучесть) является полностью унаследованным процессом, можно уравнение (2) переписать в следующем виде:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_0^t K(\sigma) \cdot \sigma(\theta) d\theta. \quad (3)$$

Дифференцируя (3) по времени, получается:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} - \frac{\sigma}{E^2} \cdot \dot{E} + K(\sigma) \cdot \sigma. \quad (4)$$

Поскольку при установившейся ползучести  $K(\sigma) = 1/\eta$ , то (4) будет иметь вид:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} - \frac{\sigma}{E^2} \cdot \dot{E} + \frac{\sigma}{\eta}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является аналогом уравнения Максвелла для вязкоупругой среды, но для сред с нестабильными во времени жесткостными характеристиками, т. к. модуль упругости (модуль Юнга) в физическом смысле является коэффициентом «сопротивляемости» (**жесткости**) среды приложенным нагрузкам. В случае неизменности во времени жесткостных свойств, второе слагаемое стремится к нулю и (5) переходит в уравнение Максвелла [Кузьмин, 1999].

Пульсационный и знакопеременный характер выявленных движений, «парадоксальное» отклонение от унаследованной схемы развития, позволяет пренебречь третьим слагаемым в (5), поскольку оно описывает состояние унаследованного движения от прошлых геологических эпох. В этом случае уравнение (5) трансформируется в формулу (6):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} - \frac{\sigma}{E^2} \cdot \dot{E}. \quad (6)$$

Если первое слагаемое очевидно и означает прямое силовое воздействие на разломную зону, то второе слагаемое, обеспечивающее возникновение аномальных деформаций за счет переменной во времени жесткости среды, менее очевидно и требует разъяснений. Из теории колебаний известно, что любую систему можно вывести из состояния равновесия 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. Наиболее часто приводимый пример параметрического возбуждения процессов – это человек, который, приседая и вставая на качелях, может раскачать сам

себя, без вмешательства внешней, вынуждающей силы. В этом случае предварительно нагруженная система — маятник «человек — качели» изменяет свой параметр (длину маятника), что приводит к выводу ее из состояния равновесия.

Возвращаясь к проблемам современной геодинамики разломов, можно утверждать, что аномальные деформационные процессы в зонах разломов, которые происходят в обстановке региональных квазистатических полей напряжений, обусловлены флуктуациями внутренних параметров среды внутри самих разломных зон, что является примером параметрического возбуждения. Именно поэтому эти деформации были названы *параметрическими*. Отсюда следует, что существуют два варианта формирования локальных деформационных аномалий в зонах разломов.

*Вариант I* представляет собой типичный линейный усилитель деформаций, когда внешние воздействия усиливаются за счет пониженной жесткости разломной зоны, как это следует из первого слагаемого уравнения (6). Это должно означать, что жесткостные характеристики разломной зоны должны быть на 2–3 порядка меньше, чем в бортовой зоне. Но тогда, например, приливные деформации в зонах разломов должны достигать величин  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ . Подобные величины *никогда не наблюдались* по многочисленным и многолетним инструментальным наблюдениям земноприливных деформаций.

*Вариант II* характеризует ситуацию, когда разломная зона представляет собой нелинейный параметрический усилитель деформаций. В этой связи, очевидно, что локальные деформационные процессы, регистрируемые многократным детальными геодезическими наблюдениями в зонах разломов, обусловлены, в основном «внутренними» источниками (параметрическими деформациями), а региональные процессы обеспечивают квазистатический фон приложенных напряжений, характер которых определяет конкретную морфологию аномалий. Кроме того, очень важно отметить, что для возникновения наблюдаемых величин аномальных деформаций ( $5 \cdot 10^{-5}$  /год– $5 \cdot 10^{-6}$  /год) достаточно создать условия для изменения во времени **всего на несколько процентов** жесткостных характеристик в локальных фрагментах, изначально напряженных, разломных зон.

Изложенные выше представления о параметрической природе аномально высокой активности разломных зон позволяют предложить решение «парадоксов» больших и малых скоростей

современных движений земной поверхности. Если вновь рассмотреть уравнение (6), то оказывается, что использование первого слагаемого позволяет разрешить «парадокс» больших скоростей в рамках схемы внешнего силового воздействия астеносферного слоя, предложенного В.А. Магницким [Магницкий, Калашникова, 1978]. Однако в рамках этого подхода не удастся разрешить «парадокс» малых скоростей, т. к. малым изменениям внешних силовых воздействий соответствуют малые деформационные реакции среды.

Использование второго слагаемого, которое характеризует так называемое «параметрическое» возбуждение процессов, позволяет достаточно адекватно разрешать оба «парадокса» скоростей в современной геодинамике. Вариации во времени внутренних параметров среды в обстановке внешнего квазистатического нагружения, обеспечивают наличие высоко интенсивных деформаций в зонах разломов («парадокс» больших скоростей) и малую интенсивность региональных деформаций («парадокс» малых скоростей) [Кузьмин, 2013].

Важным аргументом в пользу использования «параметрической» идеологии при разрешении обоих «парадоксов» является анализ энергетики деформационных процессов. 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. При реализации «жесткой» схемы фиксированными являются смещения (деформации). В опытах с образцами горных пород первая схема соответствует так называемым испытаниям на ползучесть. В рамках «жесткой» схемы реализуется заданная программа фиксированных (монотонных) смещений нагружающих элементов пресса. Можно легко показать, что накопление энергии и концентрация напряженно-деформированного состояния в случае «мягкой» схемы нагружения происходит в пределах «мягких» включений — областей пониженных жесткостных параметров среды. В случае «жесткой» схемы накопление энергии происходит в пределах «жестких» включений — областей повышенной жесткости среды.

Количественной основой параметрической 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 [Mindlin, Cheng, 1950]. Следует подчеркнуть, что применительно к геофизике рядом исследователей уже предпринимались попытки использовать представления о разломах как о включениях в упругое полупространство. Вместе с тем в этих работах не удалось построить общий формализм, который бы позволял не только получать выражения для оценки локального поля смещений поверхности в окрестности разломов, как неоднородностей (включений) с пониженной жесткостью, но и связать их с дислокационными моделями в рамках единого подхода. В работе [Кузьмин, 1999] на основании теоремы взаимности работ для среды с дисторсией и с использованием аппарата функций Грина получено выражение (7) для смещений упругого полупространства  $U_r(\xi)$ , где в качестве источника локальных аномалий могут быть вариации жесткости, дислокационные скачки смещения, изменения пороупругих параметров и др.:

$$U_r(\xi) = \varepsilon_{ij}^0 \cdot \iiint \sigma_{ij}^{(r)}(x, \xi) dV_\zeta, \quad (7)$$

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. Серьезная проблема для получения замкнутых аналитических формул для расчета напряженно-деформированного состояния заключается в необходимости проведения не сложных, но громоздких вычислений. Этого удалось избежать после обнаружения так называемой гравидеформационной аналогии. Оказалось, что выражение для вертикального градиента гравитационного потенциала ( $g$ ) как потенциала от единичной массы и вертикального градиента потенциала смещений (вертикальное смещение  $U_3$ ) как потенциала от единичной силы геометрически идентичны. Формула для расчета вертикальных смещений  $U_3$  от неоднородности (включения) произвольной формы равна:

$$U_3 = -\frac{\alpha(1-2\nu)\sigma}{6\pi\mu} \iiint \frac{z}{R^3} dV, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – относительное изменение объемного модуля;  $\sigma$  – региональное напряжение;  $\mu$  и  $\nu$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона соответственно. Формула для  $\Delta g$  имеет вид:

$$\Delta g = -\delta\rho f \iiint \frac{z}{R^3} dv, \quad (9)$$

где:  $f$  – гравитационная постоянная,  $\delta\rho$  – изменение плотности,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ . Сравнение выражений (8) и (9) показывает, что их можно представить в виде произведения двух сомножителей:  $\Phi \times \Gamma$ , где:  $\Phi$  – физический сомножитель, описывающий интенсивность деформационной или гравитационной аномалии, а  $\Gamma$  – геометрический, описывающий пространственную конфигурацию деформационной или гравитационной аномалии в зависимости от формы включения (аномалеобразующего тела). Учитывая найденную аналогию, можно, используя известные в теории гравитационного потенциала выражения для геометрического сомножителя, получить аналитические выражения для смещений и деформаций свободной поверхности упругого полупространства, содержащего объемные включения различной конфигурации, внутри которых изменяются внутренние параметры.

Найденная гравидеформационная аналогия позволяет использовать для создания количественных моделей распределения смещений поверхности аппарат теории деформационных ядер поскольку теория гравитационного потенциала оперирует с представлениями о точечных массах (потенциал как работа перемещения точечных масс) заглубленных в полупространстве, а теория деформационных ядер использует представления о точечных смещениях (деформациях) во внутренних точках этого же полупространства.

На протяжении всего изложения автор использовал представления о включениях и неоднородностях в качестве единого понятия – неоднородность (включение). Однако в физике твердого тела эти два понятия различают вслед за известной работой Дж. Эшелби [Eshelby, 1961]. Неоднородность – такая область среды, в которой жесткость (модули упругости) отличается от вмещающей среды. В этом смысле разломная зона – область с уменьшенной жесткостью горных пород, которая находится в поле внешних напряжений. Включение – это область с «внутренней» деформацией, которая не зависит от внешних граничных условий. Ее примером может служить, например, подземное хранилище газа, когда закачка (или отбор) газа в пласт создает локальную деформацию.

Энергетика формирования аномальных деформаций в пределах неоднородности состоит в том, что внешние (региональные) силы производят работу на внутренних (локальных) перемещениях в неоднородной области, возникающих вследствие изменения во времени внутренних параметров среды. Энергетика локальных

деформаций в окрестности включения сводится к работе, которая совершается внутренними силами (напряжениями), вызвавшими локальные смещения, на внешних перемещениях. В соответствии с теоремой взаимности Максвелла – Бетти [Timoshenko, Goodier, 1970], обе рассмотренные выше работы равны друг другу, поскольку производятся над одной и той же средой. В этом случае математический формализм, основанный на уравнении (1), будет одинаково применим и к задаче с неоднородностью, и к задаче с включением.

### Геодинамический мониторинг ответственных объектов

При исследованиях по геодинамическому мониторингу ответственных объектов в полной мере используется опыт организации наблюдений и анализа результатов, полученный при работах на геодинамических полигонах, расположенных в очаговых зонах сильных землетрясений [Галаганов и др., 2014; Изюмов, Кузьмин, 2014; Кафтан, Мельников, 2018; Певнев, 1988; Тимофеев и др., 2018; Kuzmin, Churikov, 1999]. По существу, главные принципы организации систем геодеформационных наблюдений сводятся к тому, чтобы с достаточной пространственно-временной детальностью локализовать область аномальной деформации.

Например, при мониторинге объектов инфраструктуры нефтегазовых объектов; участков подземного захоронения отходов; площадок ГЭС, АЭС и др. главным объектом изучения, также, как и в сейсмоактивных зонах, являются активные разломы [Галаганов и др., 2017; Кафтан, Устинов, 2012; Кузьмин и др., 2018; Хисамов и др., 2012]. При этом в последние годы стало очевидным, что необходимо различать «активные» и «опасные» разломы.

В существующих нормативах отмечается, что предельно допустимые, за весь период эксплуатации сооружений, в основании объектов строительства, деформации не должны превышать: относительное горизонтальное сжатие или растяжение –  $10^{-3}$ , наклон –  $3 \cdot 10^{-3}$ , относительная неравномерность осадок земной поверхности –  $6 \cdot 10^{-3}$ . Эти относительные деформации называются **опасными**. Очевидно, что если среднегодовые скорости относительных деформаций достигают величин порядка  $5 \cdot 10^{-5}$ – $10^{-4}$  в год, то зоны разломов, в пределах которых они выявлены, представляют собой зоны повышенной геодинамической опасности, поскольку за период эксплуатации объекта (обычно 50–100 лет) уровень

накопленной относительной деформации может достигнуть (или превзойти) нормативные значения. «Активный разлом» характеризуется наличием аномальных, по сравнению с фоновыми, движений. Эти аномальные движения могут и не являться опасными. «Опасный разлом» – это зона линейной деструкции, в которой происходят современные короткопериодические (первые месяцы и годы) пульсационные и/или знакопеременные движения со скоростями относительных деформаций более, чем  $5 \cdot 10^{-5}$  в год [Кузьмин, 2016]. В этом определении учитываются также и все деформационные процессы, связанные с сейсмичностью (предсейсмические, косейсмические, постсейсмические).

Подавляющее большинство геодинамических полигонов организовано в пределах «сухопутных» объектов. Создание системы геодинамических наблюдений для шельфовых месторождений нефти и газа представляет собой, по понятным причинам, сложную техническую задачу. Одной из первых успешных попыток организации геодинамического мониторинга в мировой практике разработки шельфовых месторождений углеводородов является создание системы геодинамических наблюдений на морском нефтегазоконденсатном месторождении им. Ю. Корчагина, которое осуществлено ПАО «ЛУКОЙЛ» на Российском шельфе Каспийского моря. Регулярные наблюдения начаты в 2017 г. и анализируются в «мониторинговом» режиме специалистами Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН [Кузьмин и др., 2018].

В геодеформационной подсистеме геодинамического мониторинга использованы инклинометры, которые установлены на главной палубе добывающей платформы ЛСП-1. На рис. 8 показан временной ход наклонов, полученный по данным инклинометрических наблюдений за период с января 2017 года по июнь 2018 г. Учитывая «морскую» специфику получения данных на добывающих платформах, наклоны вдоль длинной оси платформ носят название дифферента, а вдоль их короткой части – крена.

Из рисунка видно, что в целом за период 1.5 года имеется слабый, около  $0.008$  градуса, тренд по крену, осложненный ярко выраженным сезонным ходом до  $0.03^\circ$  и знакопеременными высокочастотными колебаниями с амплитудами, меняющимися в диапазоне от  $0.01^\circ$  до  $0.001^\circ$ . Заметных трендовых изменений по дифференту за период наблюдений не отмечается. Имеются сезонные изменения с амплитудой  $0.15^\circ$

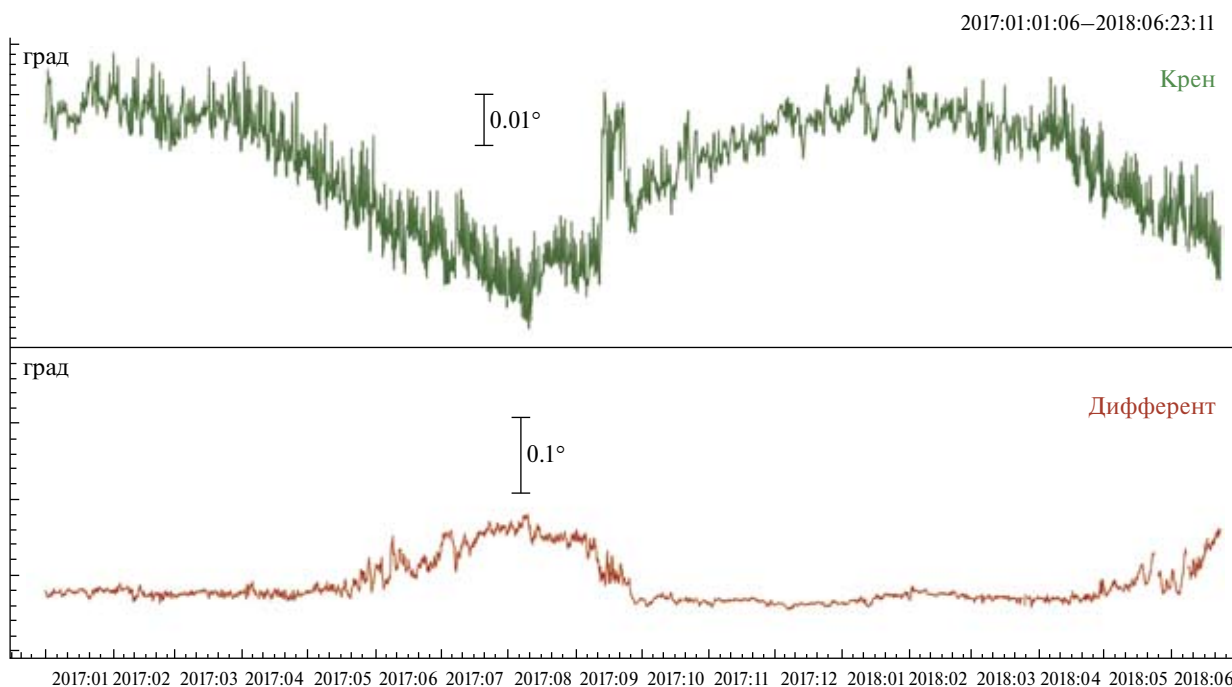


Рис. 8. Временной ход крена и дифферента в период с января 2017 г. по июнь 2018 г.

и высокочастотные колебания с амплитудами в диапазоне  $0.06\text{--}0.002^\circ$ .

Проведенный спектрально-временной анализ показал, что сезонные колебания обусловлены динамикой речных стоков в Каспийское море. Кроме этого, были выявлены устойчивые колебания с периодами 24, 12, 8 и 6 часов, которые связаны с метеорологическими и приливными воздействиями моря на платформу. Учитывая, что ограничения на наклоны свайного фундамента платформы составляют величины порядка  $\sim 0.5^\circ$ , то положение платформы за период наблюдений является устойчивым.

При геодинамическом мониторинге объектов, которые связаны с использованием недр, необходимо также учитывать деформации, связанные с добычей нефти и газа. Для этой цели были проведены оценки оседания морского дна в окрестности месторождения и детальный анализ поведения наклонов в месте установки платформы. Оценки были проведены в рамках разработанной геомеханической модели, учитывающей вес вышележащей толщи пород и генетические особенности месторождения [Кузьмин, 1999]. Модель выполнена в гибридном варианте и допускает как аналитическую, так и численную реализацию.

Основная добыча на месторождении им. Ю. Корчагина осуществляется из двух нефтенасыщенных пластов: неокомского подъяруса

и Волжского яруса. При этом меньший по горизонтальным размерам Волжский ярус залегает глубже, чем больший неокомский подъярус. Для расчета оседаний дна использовалась численно-аналитическая модель деформированного пласта в трехмерной постановке. Учитывая, что относительные объемные деформации обоих пластов, которые возникают при снижении пластового давления, имеют величины порядка  $10^{-4}\text{--}10^{-5}$ , то возможно использование линейной суперпозиции смещений и определение суммарного оседания от обоих горизонтов. Для того, чтобы можно было сравнивать расчетные значения с наблюдаемыми, была проведена оценка распределения наклонов морского дна в направлении крена и дифферента платформы.

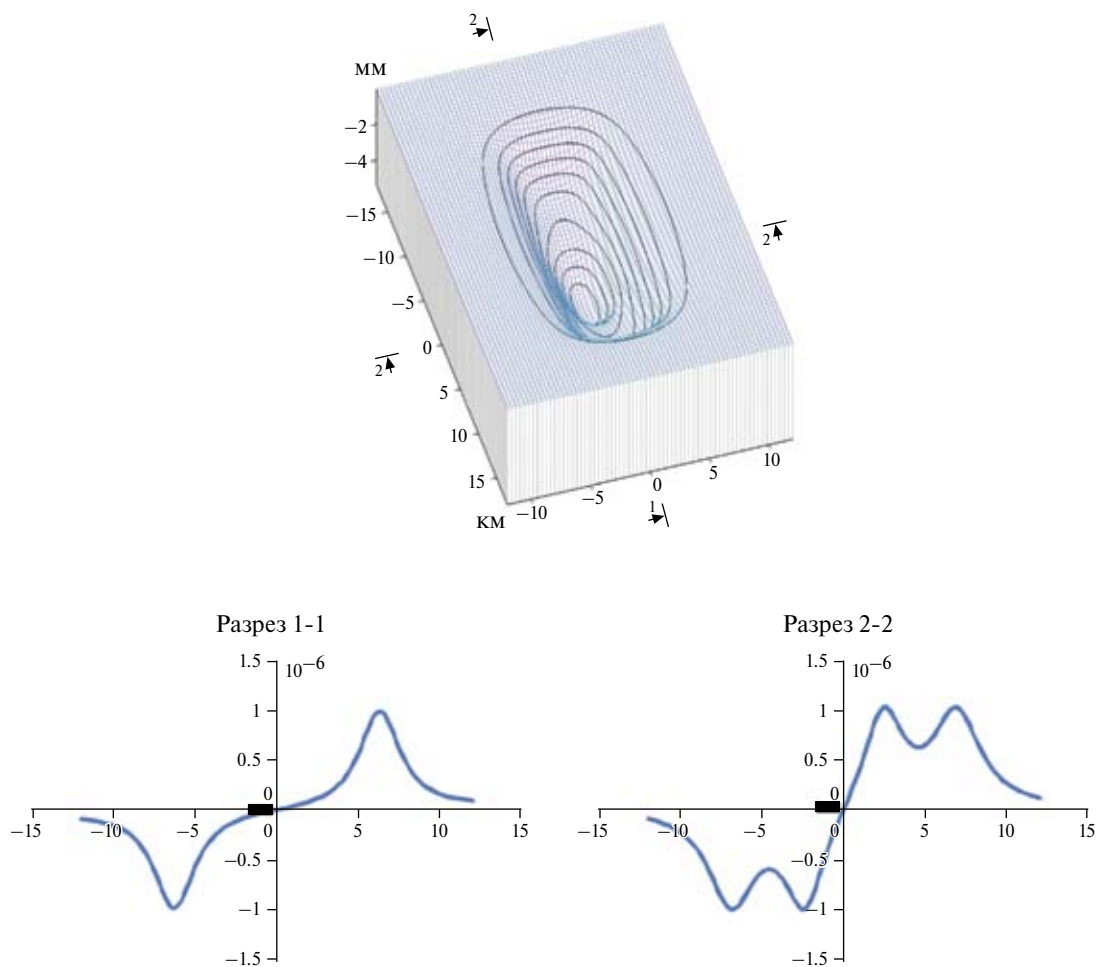
Пластовое давление в обоих пластах снизилось, в течение 1.5 года, на 0.6 МПа. Сжимаемость порового пространства  $\beta_{\text{пор}} = 5 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициент пористости, в среднем,  $m = 0.25$ . Геометрические параметры пластов (округленные до метров) следующие: глубина до кровли неокомского подъяруса — 1758 м; глубина до подошвы неокомского подъяруса — 1770 м; длина пласта (по простирацию) — 21.8 км; ширина — 6.9 км; глубина до кровли Волжского яруса — 1521 м; глубина до подошвы Волжского яруса — 1532 м; длина пласта (по простирацию) — 6.3 км. Ширина — 2.4 км.

На рис. 9 представлена объемная модель расчетных оседаний, на которой показано местоположение разрезов, которые выполнены в направлении дифферента и крена платформы, поскольку ориентация платформы по отношению к простиранию обоих пластов такова, что разрезы 1–1 и 2–2 соответствуют распределению кренов и дифферентов, соответственно. Максимальная амплитуда оседаний достигает величины  $\approx 5.0$  мм.

Из рисунка видно, что кривая кренов имеет два экстремума (максимум и минимум), а кривая дифферентов – 4 экстремума. Максимальное изменение кренов (размах от минимума к максимуму) достигает  $2 \cdot 10^{-6}$ , а дифферентов –  $2.01 \cdot 10^{-6}$ , т. е. примерно 400 угловых миллисекунд. В месте расположения платформы крен, обусловленный добычей, будет равен  $3 \cdot 10^{-7}$ , что составляет около 80 угловых миллисекунд, дифферент –  $1.4 \cdot 10^{-7}$ , что равно примерно 35 угловым миллисекундам. Поскольку разрешающая

способность инклинометров равна  $10^{-3}$  градуса, то получается, что обусловленные добычей в 2017–2018 гг., расчетные дифференты и крены изменяются на величины, которые в  $10^4$  раз меньше разрешающей способности инклинометров. Таким образом, можно полагать, что разработка месторождения за отчетный период времени не привела к значимым кренам и дифферентам платформы.

Столь незначительная величина наклонов в месте установки платформы, обусловленная добычей нефти, объясняется тем, что она расположена в центральной части разрабатываемой залежи и, следовательно, в области максимального оседания. Наклоны поверхности, в данном случае, это горизонтальные градиенты вертикальных смещений, которые должны быть минимальными в окрестности экстремума оседаний. Этот факт является дополнительным граничным условием при адаптации параметров модели. Любые неоднородности строения



**Рис. 9.** Объемная модель расчетных оседаний (верхняя часть рисунка), распределение наклонов морского дна в направлении дифферента (слева), крена (справа) и местоположение платформы (прямоугольник).

месторождения, включаемые в модель, должны быть такими, чтобы в результате решения уравнений удовлетворялось условие стремления к нулю наклонов дна в центральной части пласта. Это условие может оказаться эффективным не только при проведении математического моделирования, но и для оценки стабильности положения платформы, что является основной задачей геодинамического мониторинга.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении всей истории своего развития современная геодинамика как научное направление прошла путь от изучения кинематики Земли и элементов ее структуры до исследования механизмов формирования разномасштабных геодеформационных процессов и создания методов геодинамического мониторинга потенциально опасных природных и техногенных объектов.

Фундаментальную основу для получения новых данных об интенсивности, временной структуре и масштабах современного геодинамического состояния различных регионов и Земли как планеты, составляют геодинамические полигоны различного целевого назначения. Сравнительный анализ результатов, полученных на идентичных по составу и точности методов наблюдений геодинамических полигонах, показал, что интенсивность деформационной активности разломов, расположенных в платформенных (слабосейсмичных) и сейсмоактивных регионах практически идентичны, что средняя скорость относительных деформаций в год, определенная на длительном промежутке времени (20–50 лет), имеет парадоксально малую величину даже в областях высокой сейсмической активности.

Оказалось, что геодинамические полигоны — это не только измерительная система, работающая в режиме мониторинга. Можно утверждать, что исследователи, работающие с результатами наблюдений на полигонных системах наблюдений, вынуждены по-новому рассматривать многие традиционные представления и ставить фундаментальные вопросы. Например, как оценивать точность и достоверность измерений традиционными статистическими методами, когда резкие флуктуации во времени сигнала являются не ошибкой, а наблюдаемым параметром? Как сопоставлять результаты измерения смещений земной поверхности совмещенными спутниковыми и наземными методами наблюдений? Как устанавливать причины происхождения наблюдаемых вариаций локальных

деформаций при стабильности региональных силовых воздействий? Что представляют собой деформационные волны, когда скорости их распространения на несколько порядков меньше, чем сейсмические скорости? И полученные результаты, и поставленные вопросы, безусловно будут способствовать разработке новой, «полигонной» системы научных взглядов, которая позволит фундаментальные исследования быстрее доводить до практического использования, а прикладным разработкам придавать необходимый фундаментальный смысл.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аишурков С.В., Саньков В.А., Серов М.А. и др.* Современные деформации Амурской плиты и окружающих структур по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. С. 2059–2070.
- Биргер Б.И.* Неустановившаяся ползучесть литосферы и ее роль в геодинамике // Физика Земли. 2012. № 6. С. 34–42.
- 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., Крупеникова 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., Крупеникова 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.
- Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупеникова И.С. и др.* Сравнение данных ГЛОНАСС и GPS измерений на геодинамических полигонах // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 1. С. 6–15.
- Исюмов С. Ф., Кузьмин Ю.О.* Изучение современных геодинамических процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе // Физика Земли. 2014. № 6. С. 3–16.
- Кафтан В.И.* Карты современных движений земной коры: содержание и информативность // Физика Земли. 1996. № 1. С. 48–61.
- Кафтан В. И., Кузнецов Ю. А., Серебрякова Л. И. и др.* Карта скоростей современных вертикальных движений земной поверхности Прикаспийского региона // Геодезия и картография. 1995. № 12. С. 18–21.
- Кафтан В. И., Мельников А.Ю.* Выявление деформационных аномалий по данным ГНСС наблюдений в связи с подготовкой и разрядкой крупных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 26–36.
- Кафтан В. И., Сидоров В. А., Устинов А.В.* Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием



- глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 50–58.
- Кафтан В.И., Устинов А.В.* Применение глобальных спутниковых навигационных систем для мониторинга деформаций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2012. № 12. С. 11–19.
- Кашин Л.А.* Построение классической астрономо-геодезической сети России и СССР (1816–1991 гг.). М.: Картогеоцентр – Геодезиздат. 1999. 192 с.
- Кузиков С.И.* Методические задачи и проблемы точности GPS-наблюдений (на примере Бишкекского геодинимического полигона) // Физика Земли. 2014. № 6. С. 55–69.
- Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А.* Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // Физика Земли. 2010. № 7. С. 33–51.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. 2018. № 6. С. 3–22.
- Кузьмин Ю. О., Децеровский А. В., Фаттахов Е. А. и др.* Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 53. № 3. С. 31–41.
- Кузьмин Ю.О.* Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. № 5. 2014а. С. 51–64.
- 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 и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство экономических новостей. 1999. 220 с.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 87–101.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014б. Т. 5. № 2. С. 401–443.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. 2015. № 4. С. 25–30.
- Кузьмин Ю.О.* Тектонофизика, и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44–60.
- Левин В. Е., Бахтияров В. Ф., Титков Н. Н. и др.* Современные движения земной коры на Камчатке // Физика Земли. 2014. № 6. С. 17–36.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др.* Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 7. С. 1006–1017.
- Магницкий В.А., Калашикова И.В.* Об унаследованном характере современных движений земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 10. С. 13–20.
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н. и др.* Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа // Геофизические исследования. 2012. № 3. С. 5–17.
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И. и др.* Мониторинг оползневых процессов на участке Северо – Кавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизические исследования. 2013. № 4. С. 5–22.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б. и др.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.
- Певнев А.К.* Прогноз землетрясений – геодезические аспекты проблемы // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1988. № 12. С. 88–98.
- Работнов Ю.Н.* Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука. 1977. 384 с.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. и др.* Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физика Земли. 2014. № 6. С. 70–79.
- Сидоров В.А. и др.* Современная геодинамика и нефтегазоносность. М.: Наука. 1989. 200 с.
- Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О.* Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М.: Наука. 1989. 183 с.
- Стеблов Г.М., Фролов Д.И., Куксенко В.С.* Кинематика движения материков Земли // Физика твердого тела. 2005. № 6. С. 1009–1014.
- Стеблов Г.М., Василенко Н.Ф., Прытков А.С. и др.* Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS // Физика Земли. 2010. № 5. С. 77–82.
- Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф. и др.* Вариации силы тяжести и смещений в зонах сильных землетрясений на Востоке России // Физика Земли. 2018. № 3. С. 45–59.
- Трубицын В.П.* Распределение вязкости в моделях мантийной конвекции // Физика Земли. 2016. № 5. С. 3–12.
- 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.
- Churikov V.A. and 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.
- Eshelby J.D.* Elastic inclusions and inhomogeneities // Prog. Solid Mech. 1961. № 2. P. 89–140.

- Karato S.* Deformation of Earth Materials. Cambridge Univ. Press. New York. 2008. P. 463.
- Kogan M.G., Steblov G.M.* Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate-consistent reference frame // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. B04416.
- 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.
- Mäkinen J., Kaftan V.I., Demiyarov G.V. et al.* Crustal uplift in eastern Fennoscandia: Results from repeated Russian and Finnish leveling / EGU General Assembly, Vienna, April 13–18. 2008.
- Mindlin R., Cheng D.H.* Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid // *J. Appl. Phys.* 1950. V. 21, № 9. P. 926–930.
- Timoshenko S., Goodier J.N.* Theory of Elasticity, McGraw-Hill. New York. 1970.

## Recent Geodynamics: from Crustal Movements to Monitoring the Critical Objects

Yu. O. Kuzmin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

*E-mail: kuzmin@ifz.ru*

Received August 15, 2018

The evolution of the views on the subject and methods of recent geodynamics over the past fifty years is outlined. Metrological provision of the results obtained by repeated observations by means of ground-based and satellite geodesy is discussed. The substantial dependence of the main characteristics of recent geodynamical processes on the degree of spatiotemporal detail of the observational systems is demonstrated.

A possible solution of the paradoxes of large and small strain rates which were detected in the studies at geodynamical sites in seismically active and aseismic regions is proposed. To explain the anomalous deformational activity on the platform faults, the mechanism of parametric excitation is suggested. According to this mechanism, the time fluctuations in the internal parameters of a fault zone (stiffness, pore pressure, friction coefficient) create local strain anomalies under quasi static external loading.

The results of strain monitoring are demonstrated by the example of a shelf oil field. It is substantiated that the geodynamical testing sites are a universal instrument for exploring recent deformational processes which offers a unified framework for establishing the spatiotemporal structure of different-scale geodynamical phenomena addressed in the fundamental and applied studies.

*Keywords:* ground-based and satellite geodesy, metrological provision, parametric excitation of processes