

УДК 551.243:622.276/.278

**Кузьмин Дмитрий Кузьмич**  
младший научный сотрудник,  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123242, Россия, г. Москва,  
Большая Грузинская ул., 10, стр. 1,  
e-mail: [dimak1292@mail.ru](mailto:dimak1292@mail.ru)

**СОПОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ  
ДЕФОРМАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ  
РАЗДВИГОВЫХ РАЗЛОМОВ  
С РЕЗУЛЬТАТАМИ  
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО  
КОМПЛЕКСА**

*Аннотация:*

Целью работы является обзор существующих на сегодня моделей деформационной активности раздвиговых разломов и сопоставление их между собой. Приведен ряд примеров активизации разломных зон в различных регионах на объектах нефтегазового комплекса. Все они выявлены посредством многократных повторных высокоточных геодезических наблюдений и проявляются в виде локальных квазисимметричных оседаний с одинаковыми соотношениями амплитуды и ширины. По итогам сравнительного анализа моделей был сделан вывод, что в качестве механизма формирования наблюдаемого пространственно-временного спектра современных смещений может быть использована параметрически-индуцированная модель. Практическое ее применение сводится к решению обратных задач геодинамики. При использовании этой модели были просчитаны формулы для распределения горизонтальных смещений в объемной задаче, а также для наклонов и относительных деформаций (формализованных показателей) в рамках плоской задачи для геодинамического полигона ПАО «Татнефть». Были рассчитаны максимальные значения градиентов вертикальных смещений (наклонов) земной поверхности и оказалось, что к этим зонам приурочены искривления скважин. Был сделан вывод, что используемая модель способствует решению крайне актуальной проблемы по обеспечению промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса на геодинамической основе.

*Ключевые слова:* геодезический мониторинг, раздвиговые разломы, деформационная активность, обратная задача, геодинамический полигон, математическое моделирование,  $\gamma$ -аномалия

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.018

**Kuzmin Dmitry K.**  
Junior Researcher,  
Schmidt Institute of Earth Physics  
of RAS, 123242, Russia, Moscow,  
10 Bolshaya Gruzinskaya Str., build. 1,  
e-mail: [dimak1292@mail.ru](mailto:dimak1292@mail.ru)

**COMPARISON OF THE DEFORMATION  
ACTIVITY MODELS OF TENSILE FAULTS  
WITH THE RESULTS OF GEODYNAMIC  
MONITORING OF OIL  
AND GAS FACILITIES**

*Abstract:*

The purpose of this paper is to review the current models of deformation activity of tensile cracks and to compare them with each other. The paper describes a number of examples of fault zones activation in different regions at oil and gas facilities. All of them are revealed by means of multiple repeated high-precision geodetic observations and manifested in the form of local quasi-symmetric subsidences with the same amplitude and width ratios. As a result of comparative analysis of the models, it has been concluded that a parametrically-induced model can be used as a mechanism for the formation of the observed spatial and temporal spectrum of modern displacements. Its practical application is reduced to solving the inverse problems of geodynamics. When using this model, formulas have been calculated for the distribution of horizontal displacements in the volumetric problem, as well as for the inclinations and relative deformations (formalized parameters) within the framework of the flat problem for the geodynamic test site of PJSC TATNEFT. The maximum values of vertical displacement gradients (inclinations) of the earth's surface have been calculated and it turned out that these zones have been confined to the hole deviations. It is concluded that the model used contributes to the solution of the extremely urgent problem of ensuring industrial safety of oil and gas facilities on a geodynamic basis.

*Key words:* geodetic monitoring, tensile faults, deformation activity, inverse problem, geodynamic polygon, mathematical modeling,  $\gamma$ -anomaly

### Введение

Сегодня, в эпоху активного недропользования, все более актуальными становятся проблемы обеспечения геодинамической безопасности объектов нефтегазового комплекса. За последние 30 лет накоплен достаточно большой объем данных геодезических наблюдений и, в первую очередь, многократных, повторных, высокоточных нивелирных измерений, проводимых в различных регионах на месторождениях углеводородов (УВ) [1, 2, 3, 4], включая шельфовые [5, 6], и подземных хранилищах газа (ПХГ) [7, 8]. Как известно, в «Инструкции по производству маркшейдерских работ» РД 07-603-03 (п. 262) указывается на необходимость создания геодинамических полигонов на нефтегазовых месторождениях. Согласно норме этого документа, в зонах предполагаемых тектонических нарушений реперы должны закладываться через 100 м, вследствие чего мы сегодня имеем достаточно подробную информацию о тонкой структуре деформационного процесса, которая получена по данным нивелирования вдоль профилей, пересекающих зоны разломов.

Оказалось, что по многочисленным натурным данным подавляющее большинство аномальных деформаций разломных зон – это локальные «пикообразные» оседания земной поверхности, характерные для кинематики раздвиговых разломов. Однако, несмотря на то что к настоящему времени представления о локальных деформационных аномалиях раздвигового типа в разломных зонах вошли в учебники [9], получили достаточно серьезное геодинамическое и геомеханическое обоснование [10, 11, 12, 13] и нашли практическое применение при оценке геодинамической опасности нефтегазовых объектов [14, 15, 16], прямого сопоставления базовых морфологических характеристик наблюдаемых аномалий с существующими аналитическими моделями раздвиговых разломов проведено не было. В этой связи ниже представлены результаты детального рассмотрения различных механизмов формирования локальных приразломных оседаний, которые затем сопоставлялись с «тестовыми» примерами результатов наблюдений.

#### *Примеры локальных деформационных аномалий, зафиксированных на разрабатываемых месторождениях УВ и эксплуатируемых ПХГ*

На нефтяном месторождении Тенгиз (республика Казахстан) для обеспечения безопасного недропользования уже в 1989 г. советские геодезисты провели первый цикл наблюдений. Высокоточное нивелирование 2-го класса вдоль профиля 1-1 выполнялось в течение 4 лет с периодичностью раз в полгода – год (рис 1). Как можно заметить из рисунка, геодезические наблюдения выявляют локальные оседания земной поверхности, концентрированные в зоне пересечения профилем разлома.

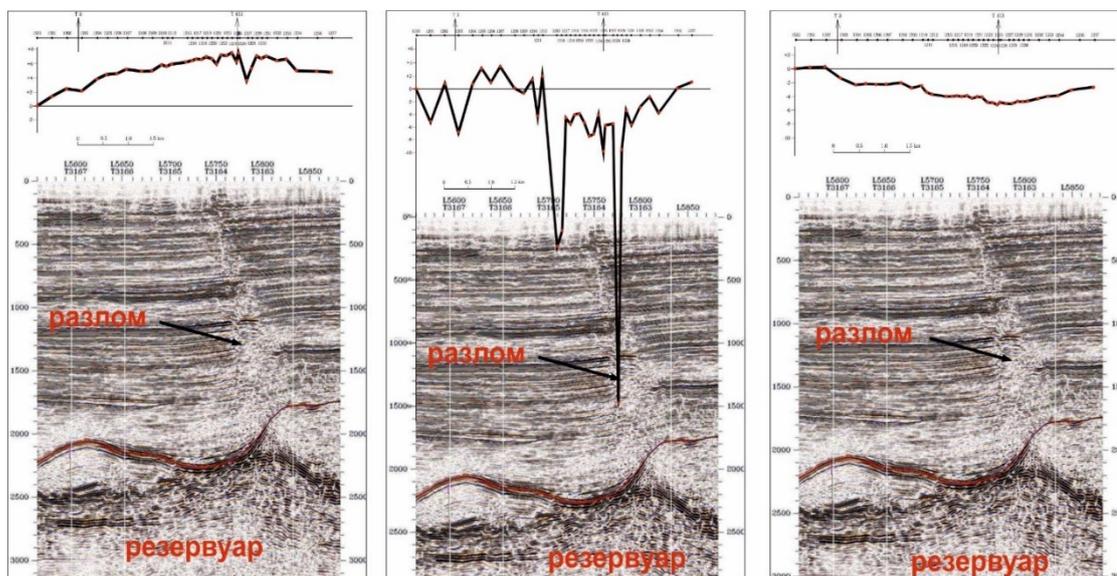


Рис. 1 – Высокоточное нивелирование по профилю 1-1 с 1987 по 1991 г.

Наблюдения продолжились спустя 9 лет уже в постсоветский период американской компанией «Chevron Corporation» (рис. 2). Центральный график на рисунке показывает оседания земной поверхности в период с января 1992 по март 2001 г. Локальная аномалия за все время наблюдений достигла амплитуды 4,8 см, а ширина ее – порядка 1 км. Последний цикл наблюдений (на рис. 2 справа) отражает период март 2001 г. – сентябрь 2001 г. На графике видно затухание и наблюдаемая ранее аномалия больше не проявляется, а миллиметровые отклонения колеблются в пределах допустимой случайной среднеквадратичной ошибки измерений.

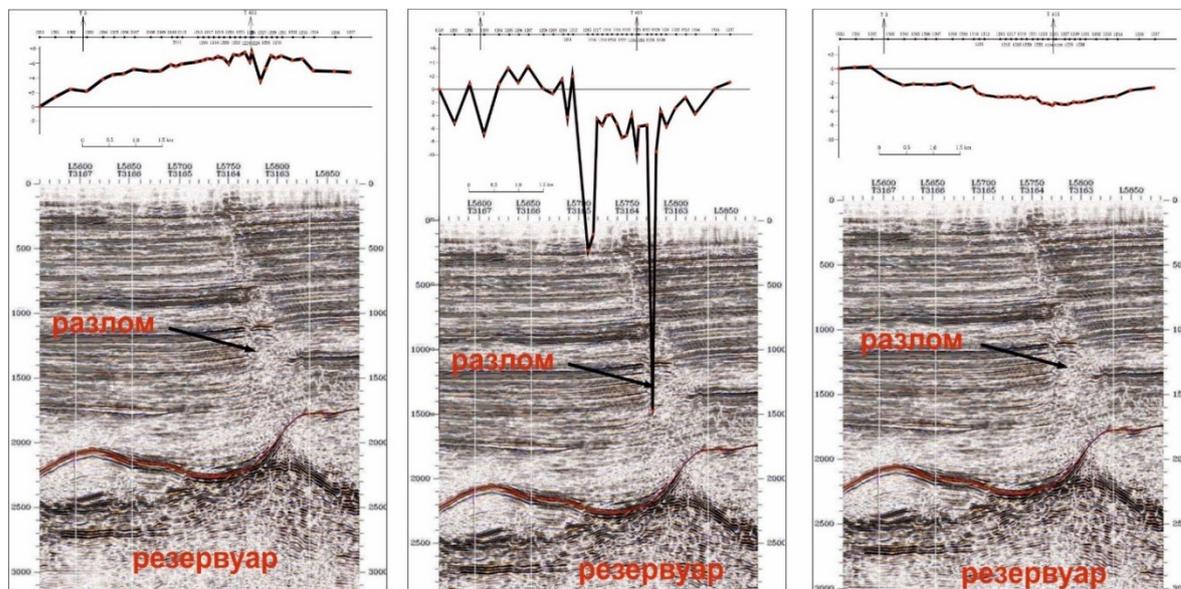


Рис. 2 – Высоточное нивелирование по профилю 1-1 в 2001 г.

Аналогичный характер проявления локальных оседаний земной поверхности мы можем наблюдать и на примере Степновского подземного хранилища газа в Саратовской области [8]. На рис. 3 представлены 4 цикла наблюдений вдоль профиля, пересекающего 4 разлома. Частота опроса составляла 2 раза в год. Густота заложения реперов проводилась согласно вышеупомянутой инструкции.

Характерной особенностью ПХГ является циклическое деформирование, чем и объясняется поведение кривой на графиках на 3-х разных этапах: в период отбора газа, в нейтральный период и в период закачки газа. Но вне зависимости от состояния ПХГ в любой период наблюдения в зонах пересечения профиля с разломами отчетливо прослеживаются те самые аномалии, которые в свое время в работе [17] получили название  $\gamma$ -аномалии, так как по своей форме напоминают эту греческую букву.

Примечательно, что все эти  $\gamma$ -аномалии примерно похожи по соотношению амплитуды к ширине, и, как правило, обнаружение данного явления посредством многократных повторных геодезических измерений говорит нам о наличии в этом месте тектонического нарушения (разлома).

Существует также много других примеров выявленных аномалий в различных регионах [6, 18]. Все они устойчивы по своей форме и ширине (рис. 4).

В процессе анализа большого объема данных, полученных путем многократных повторных наблюдений, было сформулировано предположение, что эти аномалии кинематически описываются раздвигом бортов разломов. В этой связи представляется актуальным проанализировать существующие на сегодняшний день аналитические модели раздвиговых разломов и сопоставить их между собой и наблюдаемыми аномалиями (рис. 5).

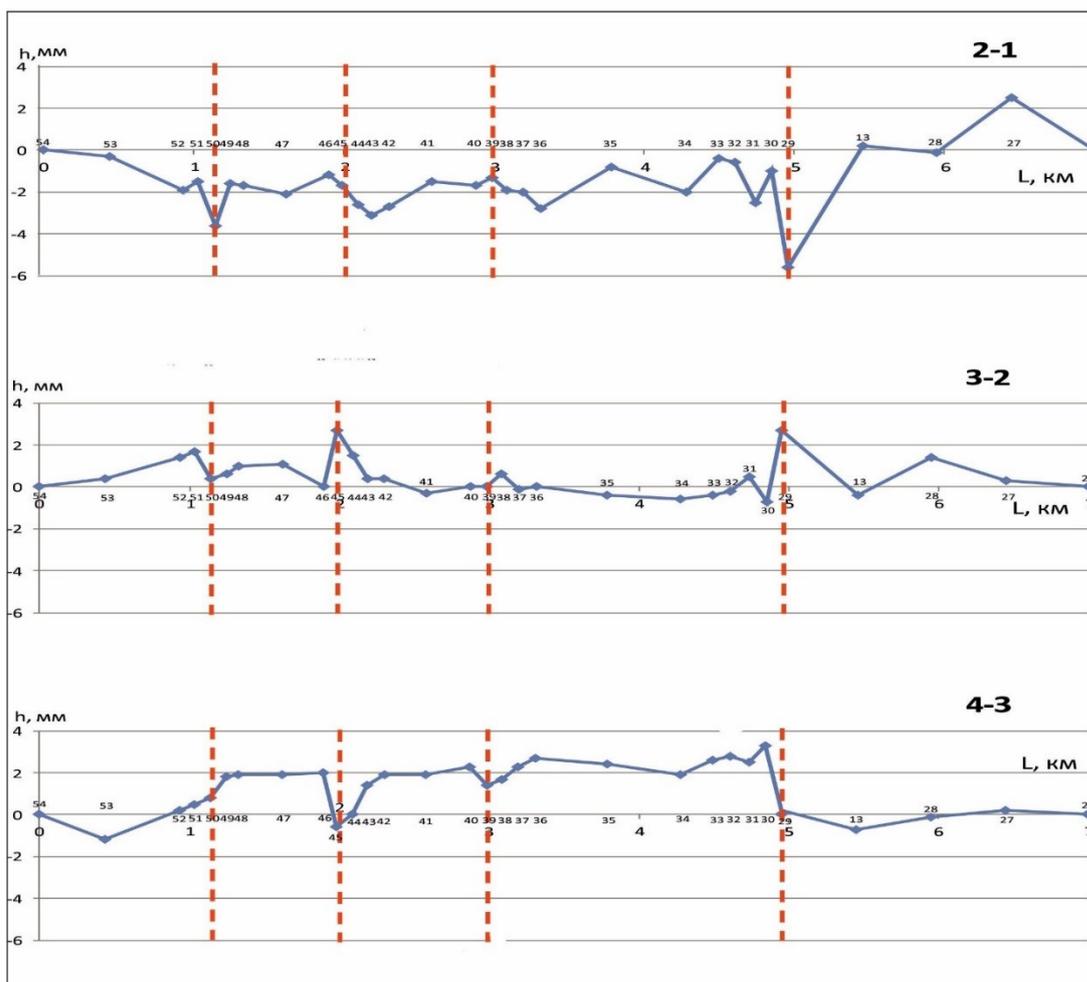


Рис. 3 – Высоточное нивелирование (4 цикла) на Степновском ПХГ вдоль профиля, пересекающего 4 разломные зоны

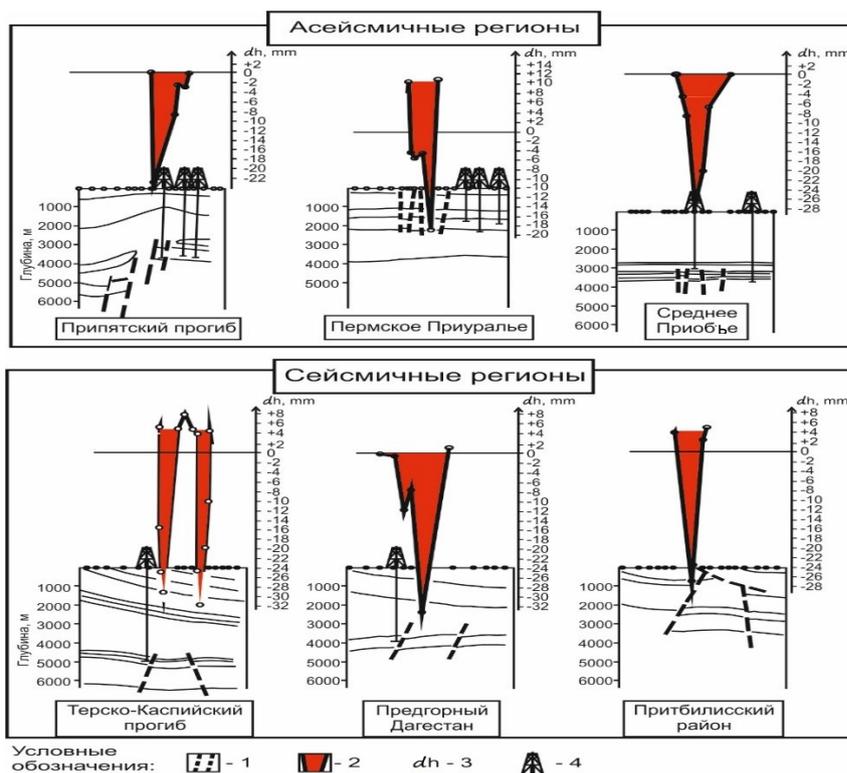


Рис. 4 – Примеры активизации разломных зон в различных регионах

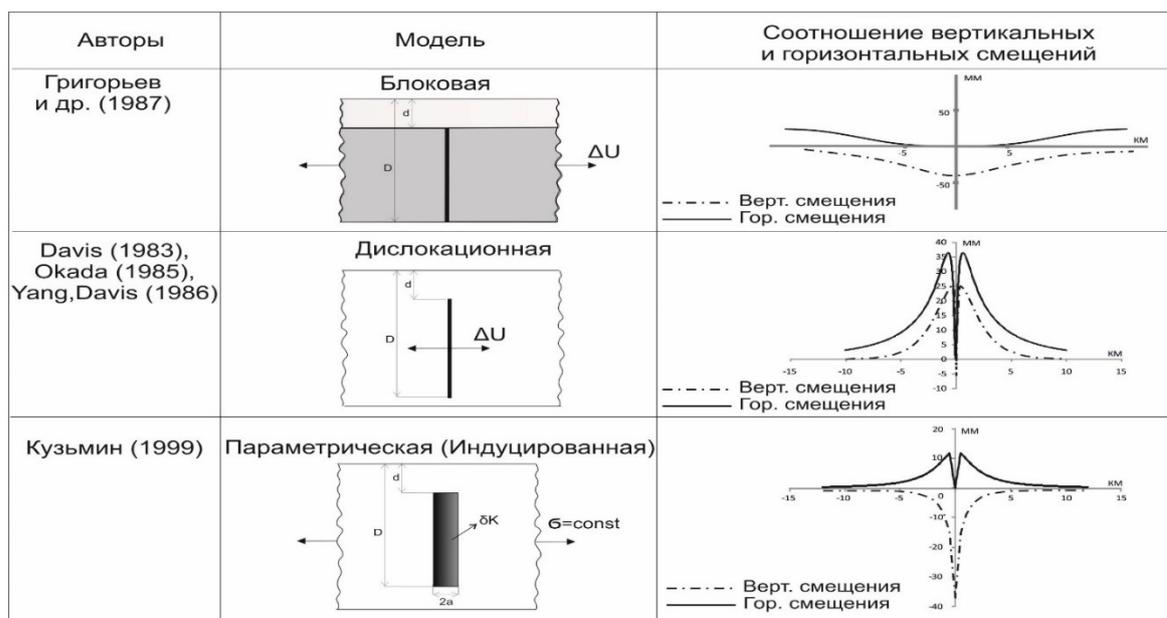


Рис. 5 – Сопоставление моделей раздвиговых разломов

### Сравнительный анализ моделей раздвиговых разломов

А теперь о каждой модели поподробнее. В 1987 г. группа российских ученых из Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта под руководством А.С. Григорьева [19] решала задачу определения напряжений, деформаций и скоростей смещения в деформируемом слое, обусловленных движениями блоков его основания. Слой моделировал осадочный чехол ( $d$ ), основание – фундамент ( $D-d$ ). Материал слоя полагался однородным или слоистым, линейно-вязким и весомым. Были заданы внешние условия растяжения блоков фундамента ( $\Delta U$ ) и получены вертикальные и горизонтальные смещения свободной поверхности.

Задача решалась в безразмерных величинах, и для того чтобы эту модель можно было сопоставить с другими в нашем исследовании, автор подобрал численные значения  $d$  и  $D$  (то есть глубину включения) так, чтобы максимальная амплитуда кривой вертикальных смещений составляла порядка 5 см, какой мы ее зачастую встречаем из реальных полевых наблюдений. Стоит заметить, что величины  $d$  и  $D$  подбирались в разумных пределах, не превышающих известные нам на сегодняшний день параметры разломов. На графике мы видим, что теоретическая кривая с амплитудой 5 см имеет очень большую ширину, порядка 15 км, чего не наблюдается в природе при измерениях в зонах разломов.

Дислокационная модель раздвиговых разломов подробно была изучена в работах [20, 21, 22]. Здесь, в отличие от блоковой модели, нет внешних (граничных) условий, смещение  $\Delta U$  задано от внутреннего источника (раздвига краев разлома), и у нее отсутствует толщина. Последний факт и сыграл ключевую роль в вопросе применения этой модели для задач геодинамики разломов. По профильным графикам теоретических вертикальных и горизонтальных смещений в этой модели мы видим, что локальные оседания на фоне общего поднятия с такой же амплитудой никогда не встречаются в полевых наблюдениях. Эта модель многими исследователями использовалась в вулканических областях, где лава прорастает в трещины и за счет растяжения происходят такие локальные оседания. Но для решения наших задач такая модель не применима. На рис. 6 показано, что при выходе «разлома» на поверхность ( $d=0$ ) картина поведения кривой вообще не подчиняется закону классического раздвига.

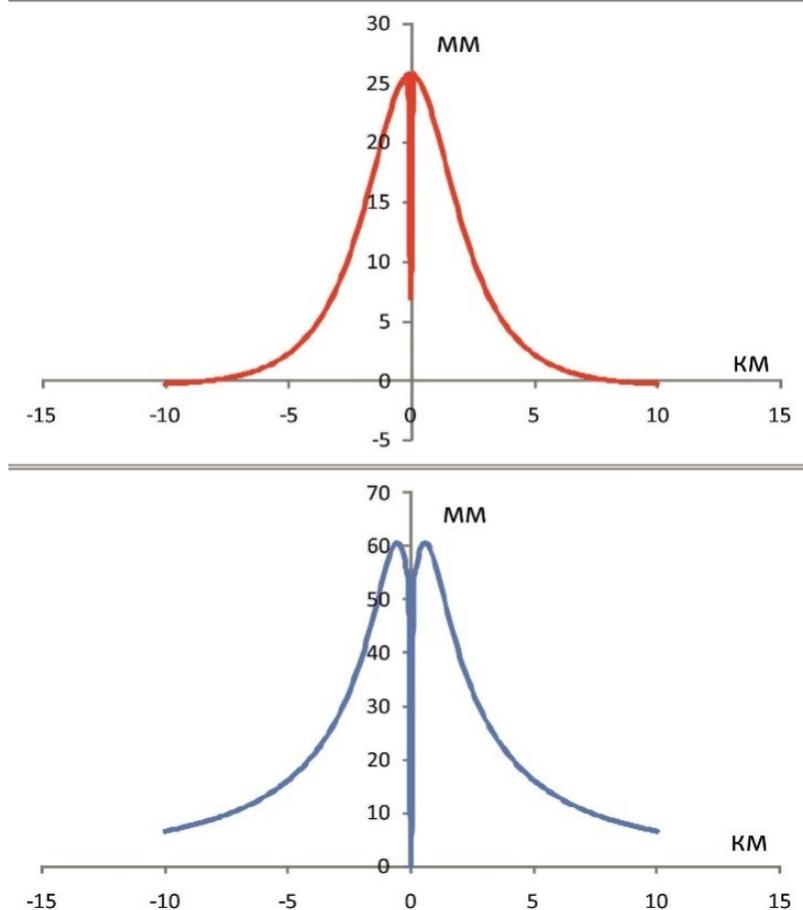
Вертикальные и горизонтальные смещения  
(Разлом выходит на поверхность)

Рис. 6 – Вертикальные и горизонтальные смещения в дислокационной модели при выходе «разлома» на поверхность ( $d=0$ )

В 90-х годах прошлого века Ю.О. Кузьминым была разработана параметрическая модель [1, 17]. Автор пишет о ней 30 лет спустя: «Эта модель в известной степени обобщает блоковую и дислокационную модели, учитывая присущие им ограничения. Как и в блоковой модели, она имеет «региональные» (внешние) условия формирования локальных, соответствующих измерениям аномалий. С другой стороны, как и дислокационная, параметрическая модель способна описывать локальные аномалии, но для конечной ширины разломной зоны» [13]. Можно сказать, что возбуждать (индуцировать) деформационные процессы в этой модели можно малыми воздействиями на разломную зону, которая изначально нагружена тектоническими и гравитационными напряжениями. Поэтому справедливо будет назвать ее также и «индуцированной». На рис. 5 показано, что внутреннее возбуждение (индуцирование) среды характеризуется изменением объемного модуля  $\delta K$ , или жесткостью, иными словами, – параметром, оказывающим сопротивление силе упругости в законе Гука. В работах [14, 13] показано, что внутренними параметрами среды могут быть не только параметры жесткости среды и/или коэффициент трения, но и пороупругие параметры и, в частности, локальное изменение порового давления во флюидонасыщенной среде разлома.

Параметрическая модель задается геометрическими параметрами:  $d$  – глубина до верхней кромки разлома;  $D$  – глубина до нижней кромки;  $2a$  – ширина разломной зоны;  $2b$  – длина простираения разлома. Решая объемную задачу для данной модели, Ю.О. Кузьмин получил распределения вертикальных смещений земной поверхности (рис. 7).

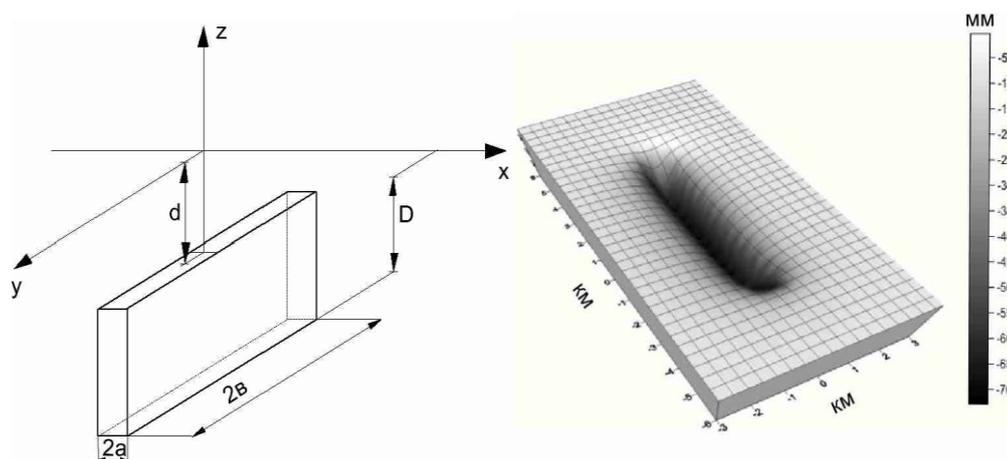


Рис. 7 – Параметрическая модель разлома (слева) и 3-d распределение вертикальных смещений от этого источника (справа)

Если от объемного распределения вертикальных смещений взять сечение вкрест простирания разломной зоны в точке  $b$  (то есть по центру), мы получим профильный график, который приведен в сводной таблице (см. рис. 5). Полученная  $\gamma$ -аномалия целиком расположена в отрицательной плоскости смещений, затухает по мере отдаления от центра и по своей морфологической особенности максимальным образом соответствует наблюдаемым на практике результатам повторных геодезических измерений, квазисимметричным локальным оседаниям.

#### *Обсуждение результатов*

Очевидно, что параметрически-индуцированная модель может быть использована в качестве механизма формирования наблюдаемого пространственно-временного спектра современных смещений. Выбирая эту модель за основу, автор данного исследования решил развивать эту модель и практически реализовывать применительно к объекту исследования. Используя математический аппарат-формализм теории деформационных ядер и функцию Грина для полупространства, получили формулу для распределения горизонтальных смещений в объемной постановке. Сечение, построенное от этих 3d-распределений, вкрест простирания разлома через центральную его точку ( $b$ ), также представлено на рис. 5 в соотношении с вертикальными смещениями.

Для перехода к формализованным (безразмерным) показателям были получены аналитические выражения для градиентов смещений – наклонов и относительных деформаций в рамках плоской задачи [23, 24].

Практическое применение данной модели сводится к решению обратных задач. Рассмотрим один из примеров такого решения на геодинамическом полигоне ПАО «Татнефть» (рис. 8). Имеется профиль, пересекающий 2 разломные зоны, по которому повторное высокоточное нивелирование выявило 2 квазисимметричные  $\gamma$ -аномалии [4]. С учетом физических свойств горных пород было проведено математическое моделирование, целью которого являлось получение теоретической кривой, максимально схожей с наблюдаемой, т.е. процедуры подбора, когда менялись геометрические параметры разлома (глубина залегания и ширина). После того как эта цель была достигнута и нужные нам величины  $D$ ,  $d$  и  $2a$  были определены, по ним были построены горизонтальные градиенты вертикальных смещений (наклоны). На рис. 8 видно, что в области максимальных значений наклонов ( $0,8 \cdot 10^{-5}$ ) произошло искривление скважин, что подтверждает правильность решения обратной задачи с использованием этой модели.

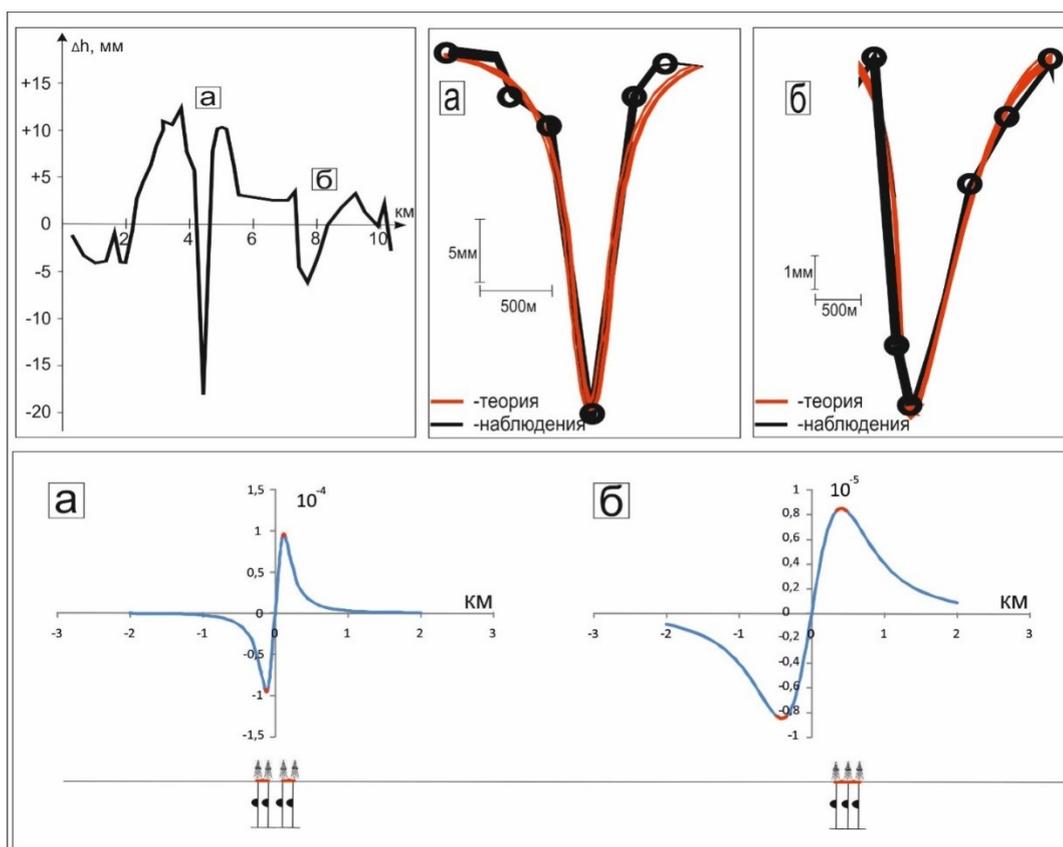


Рис. 8 – Решение обратной задачи геодинамики на основе параметрической модели

Эта методика позволяет оценивать уровень опасных деформаций и давать рекомендации для обеспечения безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры нефтегазовых месторождений и ПХГ. Так, например, этот подход использовался при оценке устойчивости добывающей платформы на шельфовом месторождении ПАО «Лукойл» [5].

### Заключение

Таким образом, предложенная параметрически-индуцированная модель и по сей день не только совершенствуется, но и способствует решению крайне актуальной проблемы по обеспечению безопасности объектов нефтегазового комплекса. Стоит отметить, что на точность оценок влияет не только качество работы на этапе анализа полученных данных, но и качество самих полевых измерений, а именно соблюдение рекомендуемых частоты опроса и густоты заложения реперов. Как показано в приведенных примерах, если четко следовать требованиям «Инструкции по производству маркшейдерских работ» относительно густоты реперов в зонах разломов, то выявленные аномалии полностью соответствуют предложенным модельным построениям.

### Литература

1. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю.О. Кузьмин. - М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. – 220 с.
2. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная разработкой месторождений нефти и газа / Ю.О. Кузьмин // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Вып. 2. - М.: ГЕОС, 2002. – С. 418 – 427.
3. Жуков В.С. Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) /

- В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмин, Г.А. Полоудин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – № 7. – 2002. – С. 54 – 57.
4. Современная геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана / Р.С. Хисамов, Н.С. Гатиятуллин, Ю.О. Кузьмин, Р.Х. Бакиров и др. // Казань: «Фэн», 2012. – 240 с.
5. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина / Ю.О. Кузьмин, А.В. Дешеревский, Е.А. Фаттахов, Д.К. Кузьмин и др. // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 53. – № 3. – С. 31 – 41.
6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 78 – 103.
7. Кузьмин Ю.О. Геодинамический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов // Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Вып. 2. - М.: ГЕОС, 2002. – С. 427 – 433.
8. Анализ деформаций земной поверхности на Степновском подземном хранилище газа методами спутниковой и наземной геодезии / С.С. Квятковская, Ю.О. Кузьмин, Р.С. Никитин, Е.А. Фаттахов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Том 22. – № 3. – С. 16 – 32.
9. Маркшейдерия. Учебник для вузов / М.Е. Певзнер, В.Н. Попов, В.А. Букринский и др. - М.: МГГУ, 2003. – 419 с.
10. Кузьмин Ю.О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51 – 64.
11. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика системы разломов / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 25 – 30.
12. Кузьмин Ю.О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2017. – № 6. – С. 24 – 39.
13. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика раздвиговых разломов / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2018. – № 6. – С. 87 – 105.
14. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса / Ю.О. Кузьмин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 1. – С. 33 – 41.
15. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика опасных разломов / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 87 – 101.
16. Кузьмин Ю.О. Геодинамическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем / Ю.О. Кузьмин, А.И. Никонов // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. - М.: Газпром, 1998. – С. 315 – 328.
17. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений / Ю.О. Кузьмин // Прогноз землетрясений. – №11. – М.: Дониш, 1989. – С. 52 – 60.
18. Сидоров В.А. Пространственно-временные характеристики современной динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин // Дискретные свойства геофизической среды. – М: Наука, 1989. – С. 33 – 46.
19. Задача о раздвиге / А.С. Григорьев, И.М. Волович, А.В. Михайлова, Ю.Л. Ребецкий и др. // Физика Земли. – 1987. - № 6. – С. 3 - 21.
20. Paul M.Davis. Surface Deformation Associated With a Dipping Hydro fracture / Paul M.Davis // Journalofgeophysicalresearch. - 1983. - Vol. 88, NO. B7. – P. 5826 - 5834.
21. Yoshimitsu Okada. Surface deformation due to shear and tencile faults in a half-space / Yoshimitsu Okada. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1985. – Vol.75, No.4. - P. 1135 - 1154.

22. Yang, X.M. Deformation due to a rectangular tensile crack in an elastic half-space/ Yang, X.M., Davis, P.M. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1986. – Vol.76. – P. 865 - 881.

23. Абрамян Г.О. Решение обратных задач современной геодинамики недр на месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа / Г.О. Абрамян, Д.К. Кузьмин, Ю.О. Кузьмин // Маркшейдерский вестник. – 2018. – № 4. – С. 52 – 61.

24. Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон / Ю.О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. – № 5. – С. 123 – 138.