

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Кузьмин Дмитрий Кузьмич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ
АВАРИЙНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент,
Абрамян Г.О.

Москва – 2023

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Среди различных видов негативных последствий длительного освоения месторождений углеводородов в последнее время стали крайне актуальными геодеформационные последствия освоения месторождений углеводородов: аномальные оседания земной поверхности и деформационная активизация разломных зон.

Выявлены аномальные (более метра) обширные просадки земной поверхности на ряде длительно разрабатываемых нефтяных и газовых месторождениях, установлены многочисленные случаи аномальной деформационной активизации разломных зон в пределах месторождений, которые сопровождались аварийными ситуациями на объектах инфраструктуры. Важно, что эти последствия сопровождаются экономическим ущербом.

Несмотря на многочисленные случаи негативного проявления современной геодинамики недр в нефтегазоносных регионах, проблема разработки унифицированной методики анализа результатов геодинамического мониторинга деформационных процессов, индуцированных разработкой нефтегазовых месторождений, а также выработка критериев промышленной опасности объектов нефтегазового комплекса с учетом геодинамического фактора до сих пор остается крайне актуальной проблемой.

Актуальность приведенных в данной диссертационной работе результатов определяется тремя причинами. Во-первых, ранее проводимые исследования затрагивали, в основном, кинематический аспект проблемы, когда исследовались только амплитуда и скорость оседаний земной поверхности при разработке месторождений, а переход к инвариантным характеристикам, как, например, градиенты смещений, не проводился. Во-вторых, при анализе результатов маркшейдерско-геодезического мониторинга не использовался такой мощный аппарат интерпретации, детально разработанный в геофизике, как методы решения обратных задач. И, наконец,

перевод наблюдаемых и модельных смещений в их градиенты напрямую позволяет сравнивать результаты наблюдений с нормативными параметрами, регламентирующими безопасное недропользование.

Цель работы заключается в обосновании критериев геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса по результатам маркшейдерско-геодезического мониторинга и разработке метода определения зон потенциальной аварийности эксплуатируемых нефтегазовых месторождений.

Идея работы заключается в использовании результатов геодинамического мониторинга земной поверхности для построения трехмерных пороупругих геомеханических моделей и обосновании на их основе критериев геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса.

Задачи диссертационного исследования:

- Обзор состояния изученности проблемы в области исследования современных деформационных процессов, индуцированных разработкой нефтегазовых месторождений и выявление основных пространственно-временных характеристик современного аномального геодинамического состояния недр в пределах разрабатываемых нефтегазовых месторождений.
- Получение аналитических решений для расчета градиентов вертикальных и горизонтальных смещений поверхности в трехмерной постановке.
- Разработка метода выявления зон потенциальной аварийности объектов нефтегазового комплекса на основе решения обратных задач современной геодинамики недр.

Научные положения, разработанные лично соискателем:

- Впервые предложено для определения предельных наклонов и относительных горизонтальных деформаций земной поверхности использовать аналитически рассчитанные градиенты ее горизонтальных и вертикальных смещений.
- Впервые получены аналитические формулы расчета горизонтальных смещений и их градиентов для поверхности упругого полупространства, а

также аналитические формулы расчета градиентов смещений поверхности для трехмерных пороупругих моделей применительно к шельфовым месторождениям углеводородов и подземным хранилищам газа.

- Установлено, что величины градиента вертикальных смещений, определенные на основе использования пороупругих моделей оседания земной поверхности, учитывающие зависимость коэффициента сжимаемости от характера изменения пластового давления, позволяют определить критерии геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса и установить зоны потенциальной аварийности нефтегазовых скважин.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается данными высокоточных повторных геодезических наблюдений, широким использованием современных методов математического моделирования, соответием использованных в работе методов и подходов базовым положениям механики деформируемых твердых тел, геологии, геодезии и маркшейдерского дела, удовлетворительной сходимостью полученных на основе модельных исследований результатов многочисленным материалам полевых наблюдений.

Научная новизна:

- Полученные аналитические формулы расчета горизонтальных смещений и их градиентов для поверхности упругого полупространства, содержащего включение прямоугольной формы - аналога разрабатываемого пласта, применимы при анализе результатов мониторинга конкретных нефтегазовых месторождений.
- Полученные аналитические формулы расчета градиентов смещений поверхности дают возможность сравнивать величины накопленных локальных напряжений с нормативными значениями и устанавливать на этой основе критерии геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса.
- Поставлены и решены обратные задачи современной геодинамики недр - нахождение параметров источника деформационных аномалий на глубине по

наблюдаемым смещениям на земной поверхности, для разломных зон нефтяных и газовых месторождений.

Практическое значение работы состоит в разработке метода анализа результатов мониторинга деформационных процессов, индуцированных разработкой нефтегазовых месторождений и подземных хранилищ газа, позволяющего выявлять зоны потенциальной аварийности скважин и промысловых трубопроводных систем, что повышает эффективность обеспечения промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса.

Реализация выводов и результатов работы. Разработанный метод изучения современных деформационных процессов в разломных зонах нефтегазовых месторождений принята к использованию на геодинамических полигонах ПАО «Татнефть», ПАО «Газпром», ПАО «Лукойл», что подтверждается соответствующей справкой об использовании результатов диссертационного исследования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных конференциях:

- научно-практической конференции «Современная геодинамика недр и эколого- промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса» Москва, 2013 г.;
- международной научно-технической конференции «Неделя горняка – 2017»;
- международной научно-технической конференции «Неделя горняка – 2023»;
- научных конференциях «молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН» 2019-2022гг.;
- международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» 2019г.;
- научно-практической Щукинской конференции, Воронеж 2020г.;
- международных научных конференциях молодых ученых, Бишкек 2021-2023гг.;
- международной конференции «Строение Литосфера и Геодинамика», Иркутск 2021г.;

- международной научной конференции «Молодые – Наукам о Земле», Москва 2022г.;
- всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» г. Пермь 2022г.;
- всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа» Москва, 2022г.

Публикации: Содержание диссертационной работы отражено в 12 опубликованных научных работах. Из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 4 статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, и 4 статьи в прочих изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 55 рисунков и 1 таблицу, список использованной литературы из 92 наименований и приложение.

Благодарности. Автор диссертационной работы выражает благодарность Г. О. Абрамяну, к. т. н., доценту, зав. кафедрой «Геология и маркшейдерское дело» НИТУ МИСИС, руководителю данной диссертационной работы за постановку задачи и мотивацию к работе на всех стадиях ее реализации; Ю. О. Кузьмину, д. ф. –м. н., профессору, зам. директора ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН за помощь и конструктивное содействие в овладении знаниями по вопросам геодинамики, геофизики и математического моделирования деформационных процессов; В. С. Жукову, д. ф.-м. н., главному научному сотруднику ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН за поддержку и консультирование в области динамической петрофизики, А. И. Никонову, к. г.-м. н., ведущему научному сотруднику ИПНГ РАН за консультации и помощь в освоении элементов нефтегазовой геологии; С. Ф. Изюмову, к. ф.-м. н., зав. лабораторией ИС и ФА АН Туркменистана за поддержку и содействие в вопросах интерпретации результатов геодинамического мониторинга месторождений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор результатов изучения деформационных процессов на геодинамических полигонах, расположенных в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах. В ней повествуется о методах изучения современной геодинамики недр, а также приведены примеры негативных деформационных последствий на месторождениях при разработке нефти и газа.

Анализом геодинамических последствий разработки месторождений и эксплуатации объектов подземного хранения и захоронения, в первую очередь, обширных просадок земной поверхности и деформационной активности разломных зон, занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Абрамян Г. О., Адушкин В. В., Ашихмин С. Г., Батугина И. М., Батугин А. С., Васильев Ю. В., Гатиятуллин Н. С., Гатиятуллин Р. Н., Жуков В. С., Изюмов С. Ф., Кафтан В. И., Кашников Ю. А., Кашуркин П. И., Кочарян Г. Г., Кузьмин Ю. О., Михайлов В. О., Никонов А. И., Петухов И. М., Панжин А. А., Пономарев А. В., Саньков В. А., Сашурин А. Д., Семинский К. Ж., Смирнов В. Б., Рахматуллин М. Х., Сидоров В. А., Татаринов В. Н., Турунтаев С. Б., Черных В. А., Шабаров А. Н., Шерман С. И.

Castle R., Chilingar G., Davis P., Geertsma J., Grasso J., Fourmaintraux D., Kovach R., Kratch G., Mindlin R., Okada I., Segall P., Shapiro S., Singh J., Moury V., Yerkes R., Wittlinger G., Zoback M. и другие.

Обобщение имеющейся информации показало, что для месторождений углеводородов с коллекторами трещинно-кавернозного типа обширных просадок земной поверхности, как правило, не наблюдается. Интересно, что в отличие от месторождений твердых полезных ископаемых (рудных и нерудных), где основной формой негативных деформационных последствий являются обширные просадки (мульды) земной поверхности, на месторождениях жидких УВ наиболее интенсивные деформационные процессы – это техногенно-индуцированные деформации в зонах разломов (Кузьмин Ю.О., 1999; Кузьмин Ю.О., Жуков, 2004; Кочарян 2016).

Этот факт находит естественное объяснение, если учесть, что месторождение жидких УВ – это динамически активная флюидная система, которую, в отличие от месторождений твердых полезных ископаемых, намного легче вывести из состояния устойчивого равновесия малыми воздействиями (индуцированием) (Кузьмин Ю.О., 2002).

Техногенно-индуцированная активизация разломных зон - широко распространенное явление. Автору не удалось обнаружить ни одного месторождения жидких УВ, в пределах которых были проведены мониторинговые измерения деформаций, на которых отсутствовали бы суперинтенсивные деформации (СД) земной поверхности в зонах разломов. Учитывая, что эти процессы могут достигать весьма высоких скоростей деформаций ($5-7 \cdot 10^{-5}$ в год), то становятся очевидными существенные экологические и социально-экономические последствия их воздействия на объекты нефтегазового комплекса. (Кузьмин Ю.О., Никонов, 1998; Кузьмин Ю.О., 2021)

В качестве примеров деформационной активности рассмотрены:

- Нефтяное месторождение Уиллмингтон (США);
- Месторождения нефти и газа в районе Хьюстона (США);
- Астраханское газоконденсатное месторождение (Россия);
- Газовое месторождение Шатлык (Туркменистан);
- Нефтяное месторождение Вышка (Туркменистан).

Резюмируя полученные результаты по этим месторождениям можно констатировать, что и для нефтяного месторождения, расположенного в сейсмоактивной зоне и для газового месторождения, расположенного в слабосейсмичном регионе, интенсивная добыча не приводит к обширным оседаниям земной поверхности всего месторождения. Общим является наличие деформационной активизации разломных зон в форме аномальных локальных просадок земной поверхности (Изюмов, Кузьмин Ю.О., 2014).

Анализ многочисленных натурных данных о техногенных сейсмодеформационных процессах, обусловленных разработкой

месторождений УВ, позволил сформулировать закономерности их формирования.

К настоящему времени имеется ряд аналитических и численных моделей формирования оседаний, которые условно можно разделить на 3 группы.

К первой группе относится полуаналитическая модель, разработанная учеными компании Shell совместно с J. Geertsma (Geertsma, 1973). В ее основу легла концепция деформационных ядер в полупространстве, предложенная в свое время Mindlin и Cheng (Mindlin, Cheng, 1950).

Ко второй группе отнесены аналитические модели, в частности, подробно рассмотрена генетическая модель деформируемого пласта (Кузьмин Ю.О., 1999), которую в дальнейшем использует диссертант. По ряду факторов данная модель качественно превосходит инженерные модели, когда необходимо проанализировать геомеханику процесса, формирующего оседания земной поверхности по всей площади залежи. Модель учитывает, как генетическую поправку (геологический тип залежи), так и вес вышележащей (над пластом) толщи, вклад которой, к слову, не учитывался в работах вышеперечисленных зарубежных специалистов.

К третьей группе отнесены численные модели, которые в отличие от аналитических могут, применяя методы конечных или граничных элементов, учитывать более сложную геометрию пласта, разбивая его тем самым на отдельные элементы (Кашников, Ашихмин, 2019).

Для иллюстрации деформационной активизации разломов при разработке месторождений УВ и подземных газохранилищ приведены примеры следующих объектов: Нефтяное месторождение Тенгиз (Казахстан) (Сидоров, Кузьмин Ю.О., Хитров, 2000); Степновское подземное хранилище газа (Россия) (Квятковская и др., 2017).

Проанализированы существующие на сегодняшний день аналитические модели раздвиговых разломов. (Григорьев и др., 1987; Davis, 1983; Yang, Davis, 1986; Okada, 1985). Сравнительный анализ моделей формирования

деформаций земной поверхности в зонах раздвиговых разломов условно разделены на три типа (рис.1).

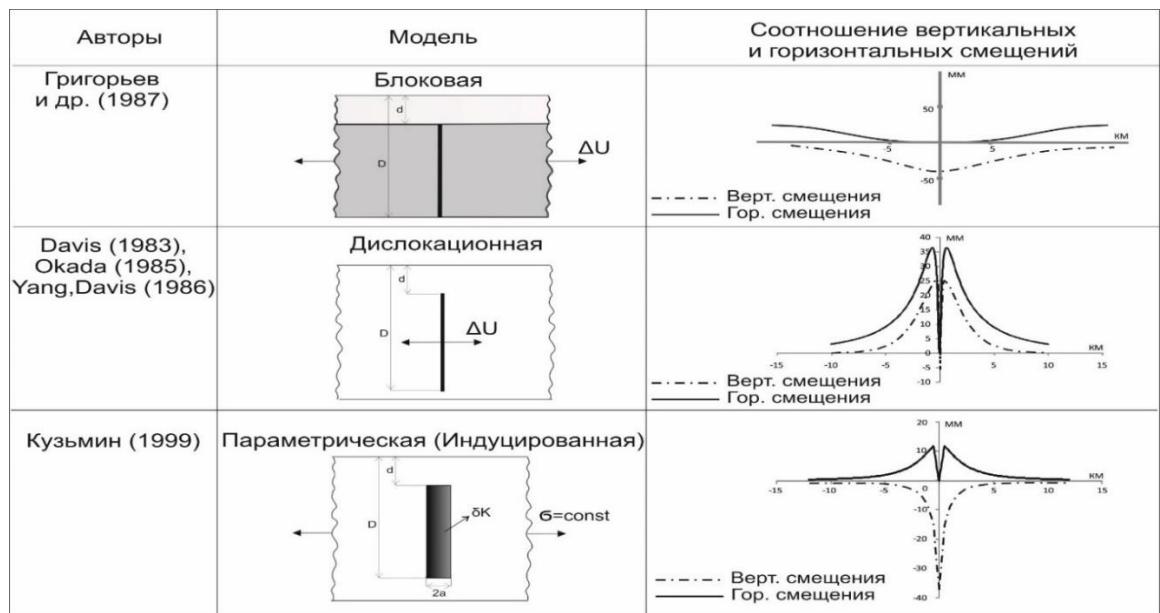


Рисунок 1 - Сопоставление моделей раздвиговых разломов.

Установлено, что кривая вертикальных смещений параметрической модели по своей морфологической особенности максимальным образом соответствует наблюдаемым на практике результатам повторных геодезических измерений.

Очевидно, что параметрическая (индуцированная) модель может быть использована в качестве механизма формирования наблюдаемого пространственно-временного спектра современных смещений.

Вторая глава посвящена разработке и уточнению геомеханических моделей деформационных процессов, получаемых на основе анализа результатов геодинамического мониторинга.

В соответствии с п. 263 «Инструкции по производству маркшейдерских работ» (РД 07-603-03 263) проектную документацию на создание системы наблюдений составляют на основе горно-геологического обоснования, в которое включают: «количественную оценку горизонтальной и вертикальной составляющих векторов движения, величин, характеризующих деформации массива горных пород и земной поверхности, скорости изменения этих величин».

Для того, чтобы на модельном уровне оценивать смещения, а также их градиенты, необходимо получить аналитические выражения для вертикальных и горизонтальных смещений. Эта модель должна максимальным образом соответствовать действительности. В первой главе при детальном анализе и сравнении разных моделей и подходов диссертант принял решение использовать генетическую модель деформируемого пласта.

В свое время, в работе (Кузьмин Ю.О., 1999) удалось получить общее интегральное уравнение для смещений упругого полупространства, а далее, применяя гравидеформационную аналогию, получить формулы для расчета вертикальных и горизонтальных смещений для случая плоской деформации, а затем и для объемной задачи для вертикальных смещений (1).

$$U_z = Ph \cdot G_z; \quad G_z = (a - x) * \ln(b - y + \sqrt{(a - x)^2 + (b - y)^2 + d^2}) + (b - y) * \ln(a - x + \sqrt{(a - x)^2 + (b - y)^2 + d^2}) + d \left(\operatorname{arctg} \frac{b - y}{d} - \operatorname{arctg} \frac{(a - x)(b - y)}{d * \sqrt{(a - x)^2 + (b - y)^2 + d^2}} \right) \quad |||_{a_1, b_1, d_1}^{a_2, b_2, d_2} \quad (1)$$

$$[U_z] = \text{м} ; [G_z] = \text{м}$$

Однако формулы оценки горизонтальных смещений для трехмерной задачи получены не были.

Для перехода в объемную задачу для горизонтальных смещений, диссертантом было осуществлено прямое интегрирование функции Грина и в результате не самых сложных, но громоздких вычислений, впервые получены выражения для 3-d распределения горизонтальных смещений земной поверхности:

$$U_x = Ph \cdot G_x; \quad G_x = d * \ln(b - y + \sqrt{(a - x)^2 + (b - y)^2 + d^2}) + Ph + (a - x) * \left(\operatorname{arctg} \frac{d}{(a - x)} - \operatorname{arctg} \frac{d * (b - y)}{(a - x) * \sqrt{(a - x)^2 + (b - y)^2 + d^2}} \right) \quad |||_{a_1, b_1, d_1}^{a_2, b_2, d_2} \quad (2)$$

Физический сомножитель $Ph = \frac{(1+\nu) \cdot m \cdot C_p \cdot \Delta P}{3\pi}$; где: m -коэффициент пористости, C_p -коэффициент сжимаемости порового пространства, ν -коэффициент Пуассона; ΔP -изменение пластового давления.

Для упрощения формулы (1) и (2) представлены в виде, когда общие выражения проинтегрированы, но подстановка пределов еще не осуществлена.

Геометрические параметры модели: a_2 – полуширина пласта от 0 до $+x$; a_1 – полуширина пласта от 0 до $-x$; b_2 – полудлина пласта от 0 до $+y$; b_1 – полудлина пласта от 0 до $-y$; d_2 – глубина до нижней кромки пласта; d_1 – глубина до верхней кромки пласта (рис 2).

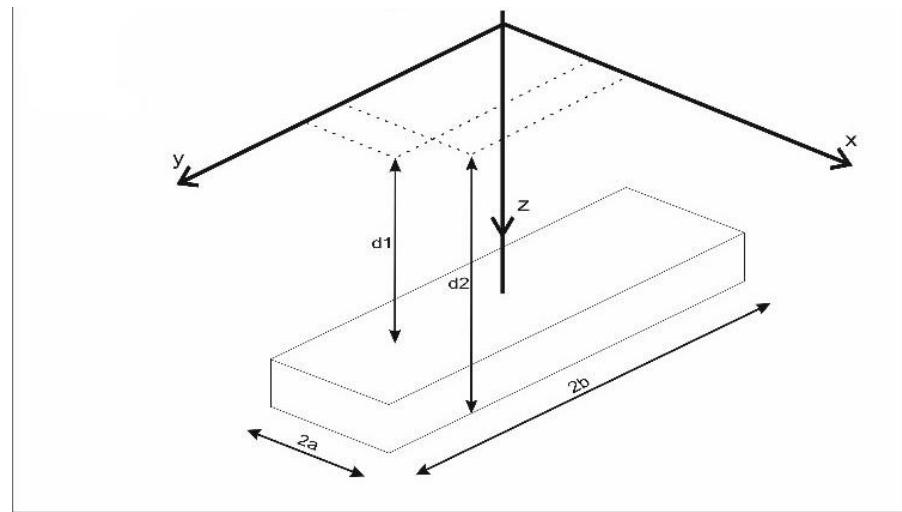


Рисунок 2 - Модель пласта и его геометрические параметры.

Ниже, на рисунке 3, представлены результаты реализации этой модели при параметрах: $2a=30\text{км.}$, $2b=45\text{км.}$, $d_1=3,944\text{км.}$, $d_2=4,056\text{км.}$, изменение пластового давления $\Delta P=11\text{МПа}$, коэффициент сжимаемости порового пространства $\beta=0,001\text{ 1/МПа}$, коэффициент пористости $m=0,17$.

Мы видим принципиальную особенность, что в центре, где вертикальные смещения максимальны (1.055м), горизонтальные смещения равны нулю. Максимумы горизонтальных смещений (0,730м.) сосредоточены на границах простирания пласта. Черным пунктиром нанесена проекция пласта на земную поверхность (Рис 3).

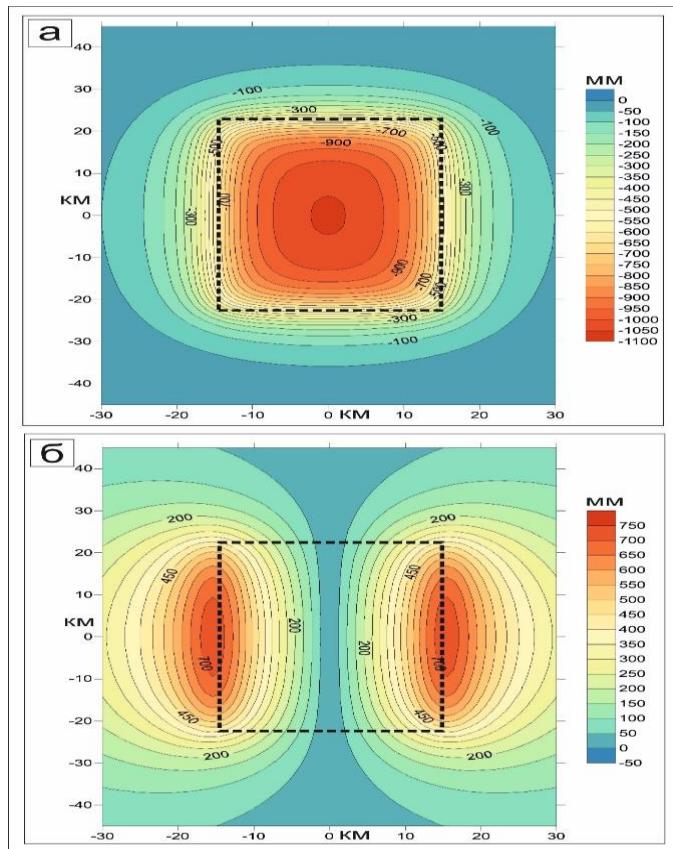


Рисунок 3 - Распределения вертикальных (а) и горизонтальных (б) смещений земной поверхности при объемной постановке задачи.

Для сравнения результатов решения в рамках объемной модели с плоской задачей, где $2b=\infty$, на рис.4 приведены профильные графики вертикальных и горизонтальных смещений.

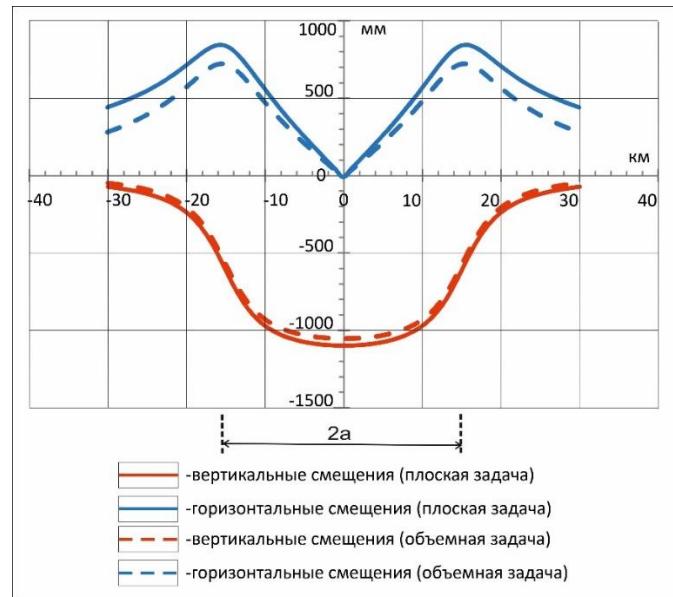


Рисунок 4 - Профильные графики вертикальных и горизонтальных смещений в условиях плоской и объемной задач

Видно, что в случае плоской задачи амплитуды вертикальных и горизонтальных смещений завышены (1,099м, и 0,852м). Сказывается отсутствие длины пласта и это дает разницу между максимальными значениями вертикальных смещений 4,5см., а между значениями максимальных горизонтальных смещений 12см. Следовательно, для расчета градиентов смещений с большей точностью, необходимо использовать объемную задачу. На рис.4. также изображена граница модели пласта по ширине ($2a=30$ км). Примечательно, что максимумы горизонтальных смещений наблюдаются на границах модели пласта.

В соответствии с рядом нормативных документов (СП 11-104 – 97; СП 47. 13330. 201 и др.) за весь период эксплуатации сооружений, предельно допустимые деформации не должны превышать: относительное горизонтальное сжатие или растяжение - 10^{-3} , наклон - $3 \cdot 10^{-3}$, относительная неравномерность осадок земной поверхности - $6 \cdot 10^{-3}$. Естественно, что эти величины математически выражаются в форме горизонтальных градиентов горизонтальных или вертикальных смещений, соответственно. При этом следует иметь ввиду, что часто градиент горизонтальных смещений именуется горизонтальной деформацией, а градиент вертикальных смещений – наклоном.

Для перехода к формализованным оценкам геодинамической опасности, а именно к градиентам смещений, впервые получены выражения для 3-d распределения наклонов (горизонтальных градиентов вертикальных смещений) и 3-d распределений относительных горизонтальных деформаций (горизонтальных градиентов горизонтальных смещений). Для этого формула для вертикальных смещений (Кузьмин Ю.О., 1999) была продифференцирована по x и по y , и полученные выражения приведены к модулю полного вектора $\sqrt{(d/dx)^2 + (d/dy)^2}$. Представим полученные формулы в следующем виде. Формула для 3-d распределений модуля полного вектора наклонов земной поверхности:

$$\varphi = \sqrt{\mathbf{G}^2 + \mathbf{H}^2}, \quad (3)$$

где:

$$G = A(i, j, k) + B(i, j, k) + C(i, j, k) \mid\mid\mid_{i_1 j_1 k_1}^{i_2 j_2 k_2} - \text{формула (1)}$$

продифференцированная по **х**

$$H = D(i, j, k) + E(i, j, k) + F(i, j, k) \mid\mid\mid_{i_1 j_1 k_1}^{i_2 j_2 k_2} - \text{формула (1)}$$

продифференцированная по **у**

$$A = \frac{-(a-x)^2}{R*(b-y+R)} - \ln(b-y+R);$$

$$B = \frac{-(b-y)}{R};$$

$$C = \frac{d^2*R^2*(b-y)-d^2*(b-y)*(a-x)^2}{d^2*R^3+R*(a-x)^2*(b-y)^2};$$

$$D = \frac{-(a-x)}{R};$$

$$E = \frac{-(b-y)^2}{R*(a-x+R)} - \ln(a-x+R);$$

$$F = \frac{-d^2}{d^2+(b-y)^2} - \frac{d^2*(a-x)*(b-y)^2-d^2*R^2*(a-x)}{d^2*R^3+R*(a-x)^2*(b-y)^2};$$

$$R = \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + d^2}$$

Пределы интегрирования i_2, j_2, k_2 и i_1, j_1, k_1 соответствуют переменным a_2, b_2, d_2 и a_1, b_1, d_1 соответственно. A, B, C, D, E, F – компоненты формулы для объемного распределения наклонов.

Формула для 3-d распределений относительных горизонтальных деформаций была представлена аналогичным образом:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \sqrt{\mathbf{L}^2 + \mathbf{M}^2}, \quad (4)$$

где:

$$L = A'(i, j, k) + B'(i, j, k) + C'(i, j, k) \mid\mid\mid_{i_1 j_1 k_1}^{i_2 j_2 k_2} - \text{формула (2)}$$

продифференцированная по **х**

$$M = D'(i, j, k) + E'(i, j, k) + F'(i, j, k) \mid\mid\mid_{i_1 j_1 k_1}^{i_2 j_2 k_2} - \text{формула (2)}$$

продифференцированная по **у**

$$A' = \frac{-d*(a-x)}{b*R-y*R+R^2};$$

$$B' = \frac{-(b-y)*(a-x)}{d*R+R^2};$$

$$C' = \frac{d*(a-x)}{d^2+(a-x)^2} - \frac{d*R^2*(b-y)*(a-x)+d*(b-y)*(a-x)^3}{(a-x)^2*d^2*R*(b-y)^2} - \arctg \left(\frac{d*R-d*(b-y)}{(a-x)*R} \right);$$

$$D' = \frac{d*y-d*R-d*b}{b*R-y*R+R^2};$$

$$E' = \frac{-(b-y)^2}{R*d+R^2} - \ln(d+R);$$

$$F' = \frac{d*(a-x)^2*R^2-d*(a-x)^2*(b-y)^2}{(a-x)^2*R^3+R*d^2*(b-y)^2}$$

A', B', C', D', E', F' – компоненты формулы для объемного распределения относительных горизонтальных деформаций.

По полученным выражениям (3) и (4) для градиентов смещений, применяя все те же геометрические параметры пласта и физические свойства, построены графики (рис.5)

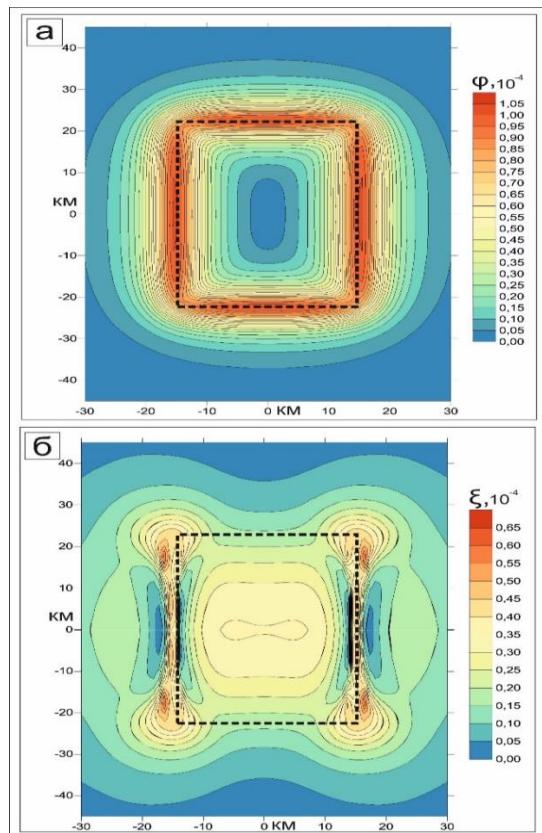


Рисунок 5 - Распределения наклонов земной поверхности (а) и относительных горизонтальных деформаций (б) в объемной постановке задачи.

Красным цветом на рис.5 показаны максимальные области значений градиентов смещений. Видно, что наклоны достигают величин порядка 10^{-4} , а максимальные значения относительных горизонтальных деформаций достигают $0,6*10^{-4}$. Стоит заметить, что эти максимальные значения снова

сосредоточены на границах пласта. Этого и следовало ожидать, поскольку, когда речь идет о градиентах, то они всегда имеют наибольшие значения в местах наибольшего перепада распределения величин. Для более наглядной иллюстрации распределения наклонов и относительных деформаций объемной модели, на рис.6 они сопоставлены с плоской задачей, в виде профильных графиков.

Важно отметить что наклоны, проходя через точку 0, меняют свой знак, и кривая носит асимметричный характер. Как и в случае сравнения смещений на рис.4, здесь также заметно, что в случае плоской задачи (рис.6а) максимальные значения наклонов и деформаций немного завышены. Поэтому наиболее точными являются значения, полученные в рамках объемной задачи (рис.6б).

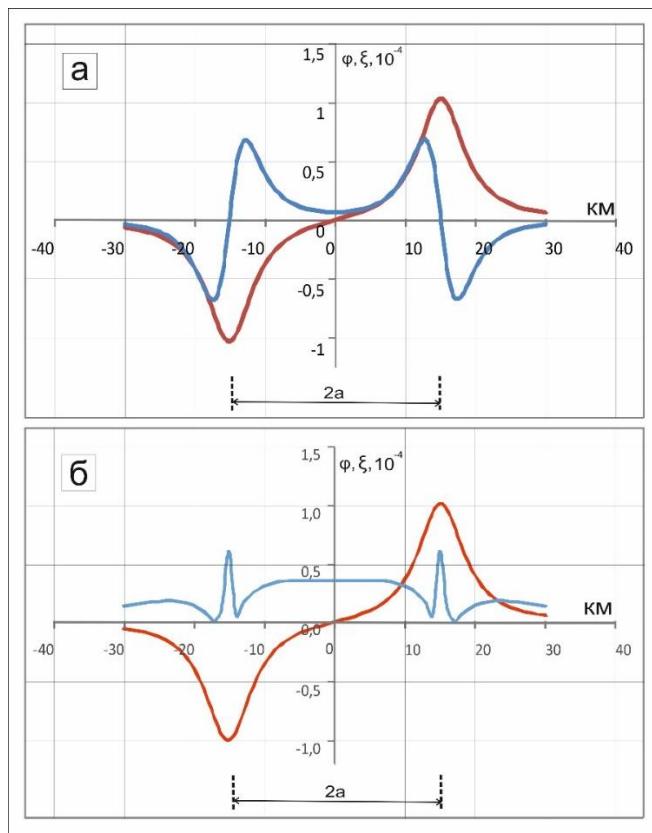


Рисунок 6 - Профильные графики наклонов (красная кривая) и относительных горизонтальных деформаций (синяя кривая) в условиях плоской задачи (а) и объемной задачи (б).

Как отмечалось выше, полученные значения градиентов смещений можно сопоставлять с предельно-допустимыми параметрами, которые определены нормативными документами как опасные деформации.

Выявление разломных зон и их идентификация по кинематическому типу, морфологии и степени активности, является одной из главных задач при определении геодинамической опасности в окрестности разрабатываемых месторождений.

Исследована взаимозависимость геометрических параметров модели разлома при установленной канонической кривой (оседание 1 см на расстоянии 1 км), описывающей деформацию земной поверхности в зоне разлома. При определении т.н. канонической кривой использовалась теория параметрической (индукционной) модели разлома.

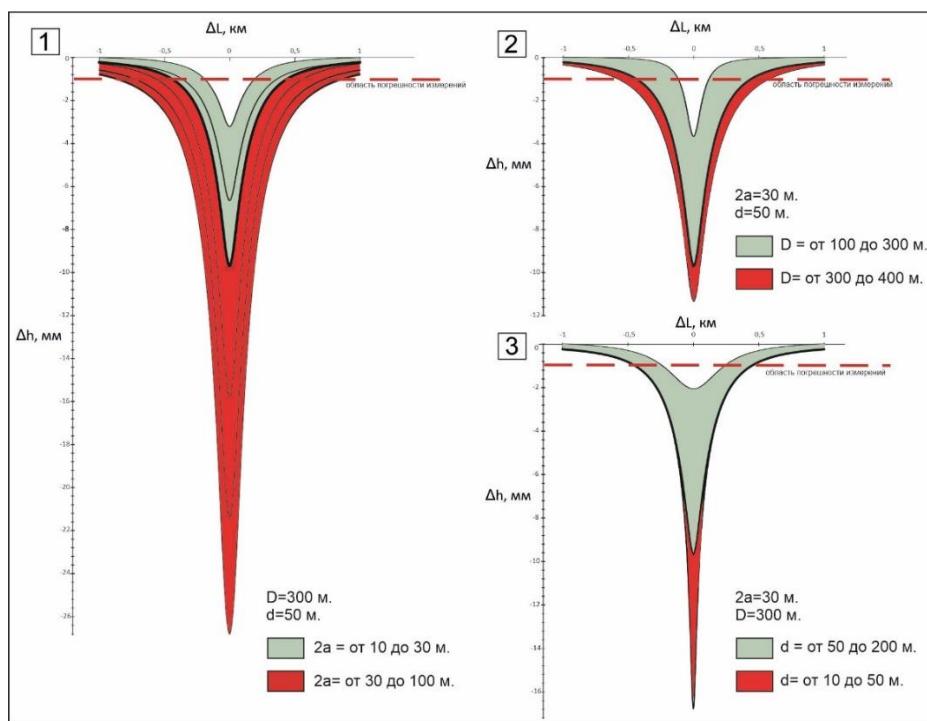


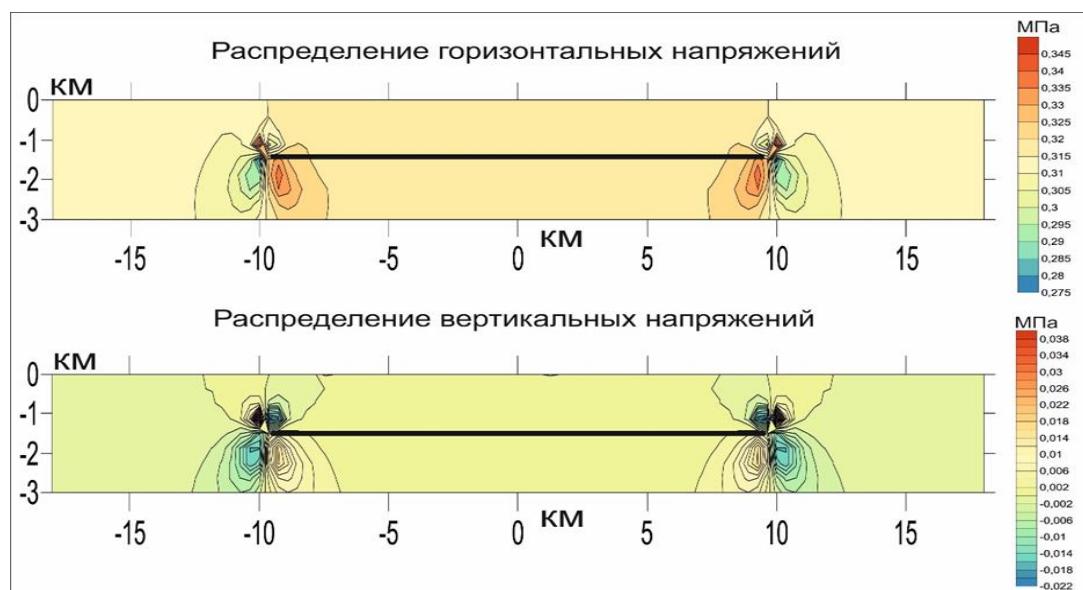
Рисунок 7 – Моделирование вертикальных смещений при различных геометрических параметрах разломной зоны. 2а –ширина модели разлома; d –глубина верхней кромки разлома; D-глубина нижней кромки разлома.

Смоделированные на рис.7 диапазоны вертикальных смещений верны для построения аналитических кривых, схожих с большинством наблюдавшихся кривых на полигонах, шириной аномалии около 1 км. Следует учитывать, что с течением времени деформации накапливаются по нелинейной зависимости, поэтому необходимо оценивать геодинамические риски при разных соотношениях ширины разлома к его глубине.

В третьей главе дана оценка напряженного состояния недр на разрабатываемых месторождениях нефти и газа.

Необходимо рассматривать любое месторождение УВ как динамическую систему. При этом важно подчеркнуть, что напряжения (силы) и деформации (смещения) есть отражение двух форм (силовой и кинематической) единого процесса – движения. В связи с этим, представляет интерес, наряду с деформационными процессами, детально изучить поле напряжений в пласте или активном разломе, возникающее при его разработке.

Приняв за основу модель, полученную синтезом моделей (Кузьмин Ю.О., 2002) и (Segall, 1985), автором диссертационной работы были рассчитаны локальные вертикальные и горизонтальные напряжения в окрестности пластов шельфовых месторождений им. Ю.Корчагина и им. В. Филановского, и в окрестности активного разлома Ромашкинского нефтяного месторождения. Пример реализации модели для разрабатываемых пластов приведен на рисунке 8.



Четвертая глава диссертационной работы посвящена практической реализации разработанных методов при анализе результатов маркшейдерско-геодезического мониторинга нефтегазовых месторождений.

Так, на примере Касимовского ПХГ решена обратная задача геодинамики и с помощью математического моделирования определены параметры источника аномальных деформаций (рис.9).

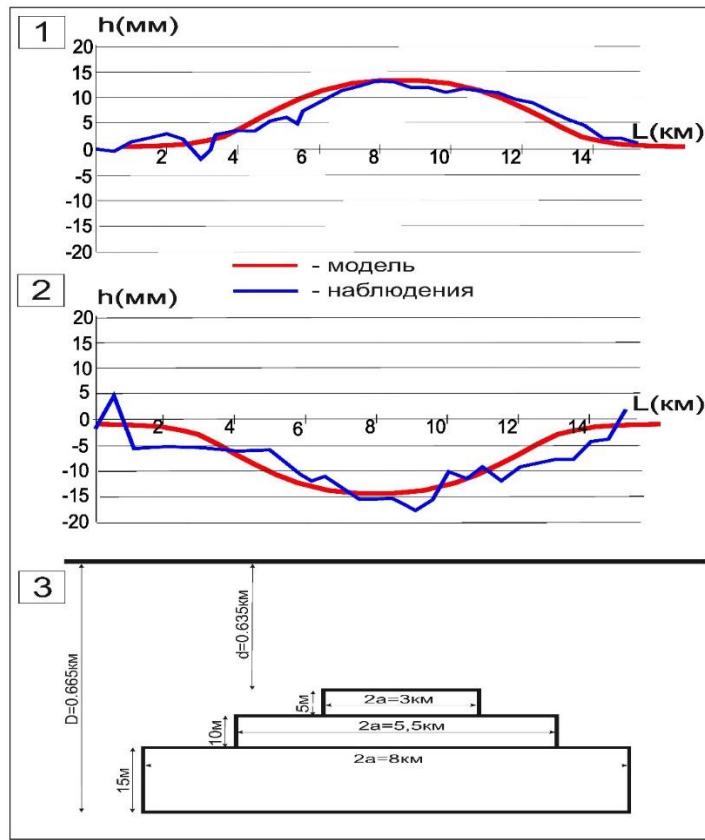


Рисунок 9 - Сопоставление наблюдаемых и расчетных вертикальных смещений земной поверхности в период закачки (1) и отбора (2) газа на Касимовском ПХГ. Вычисленные геометрические параметры пласта (3).

На рис. 9(1) и 9(2) показаны деформации земной поверхности в цикле закачки и отбора газа, полученные по данным высокоточного повторного нивелирования. Видно, что кривая нивелирования в цикле закачки имеет амплитуду меньше чем в цикле отбора. Теоретическая амплитуда смещений в обоих циклах остается неизменной, поскольку изменения пластового давления ΔP были одинаковы в обоих циклах и равнялись примерно 4 МПа. Это объясняется действием веса части пород, расположенных над деформируемым пластом, который затрудняет поднятие поверхности и способствует ее оседанию. На рис. 9 (3) показана конфигурация того объема водоносного пласта, который замещался и вытеснялся закачиваемым и отбиаемым газом,

соответственно. Этот результат позволил уточнить положение и размеры зоны газо-водяного контакта, который и определяет истинные «динамические» размеры газохранилища.

Похожая задача решалась применительно к одному из месторождений сверхвязкой нефти юго-востока Татарстана. С помощью данных о геометрическом строении пластов удалось смоделировать поднятие земной поверхности с 2013 по 2018гг. на 5см, что соответствует данным повторных геодезических наблюдений за отчетный период.

На примере Ромашкинского нефтяного месторождения продемонстрирован метод определения зон потенциальной аварийности скважин. Путем решения обратной задачи геодинамики, удалось вычислить значения градиентов смещений в местах расположения скважин.

На рисунке 10 видно, что аварийные скважины расположены именно в зонах максимальных значений горизонтальных градиентов вертикальных смещений (наклонов) земной поверхности.

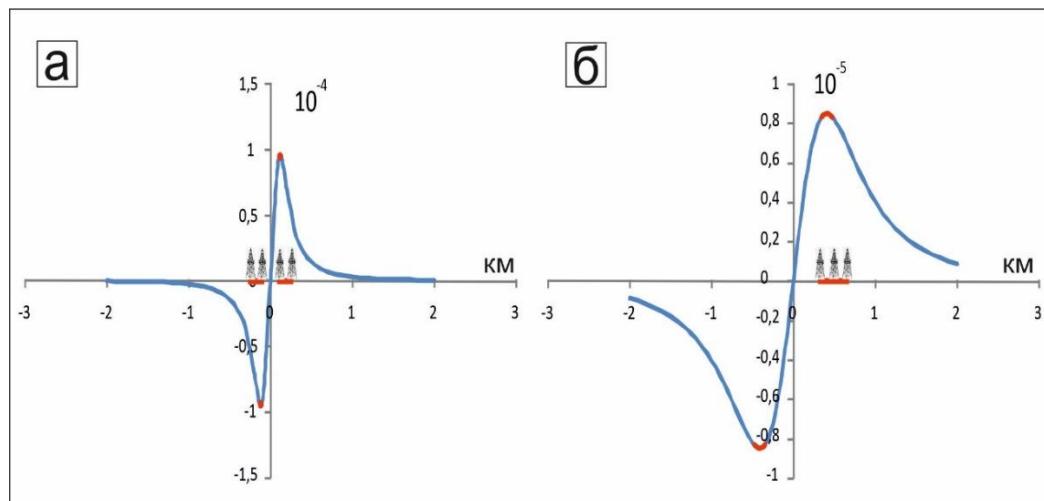


Рисунок 10 – Наклоны земной поверхности по профилю 1-1 в местах разломных зон. Ромашкинское месторождение.

Другой пример практического применения связан с учетом изменения петрофизических параметров пласта (пористость, сжимаемость порового пространства) в течение всего периода разработки на финальную оценку оседаний. В целях более точного прогноза при расчете оседаний Чаядинского нефтегазоконденсатного месторождения были учтены изменения пористости

и сжимаемости порового пространства, сопровождающие рост эффективного давления при разработке месторождения. Полученные экспериментальные данные об изменениях пористости позволили рассчитать изменения плотности образцов и сжимаемости его порового пространства, а также установить зависимость изменения их средних значений от динамики эффективного давления в пласте (Рис.11).

Моделирование показало, что разница между максимальными амплитудами смещений для двух рассматриваемых случаев существенна и имеет накопительный характер. Если к 2037 году она будет составлять порядка 1-5 мм, то уже к 2053 году расхождение достигает величины 30-35мм.

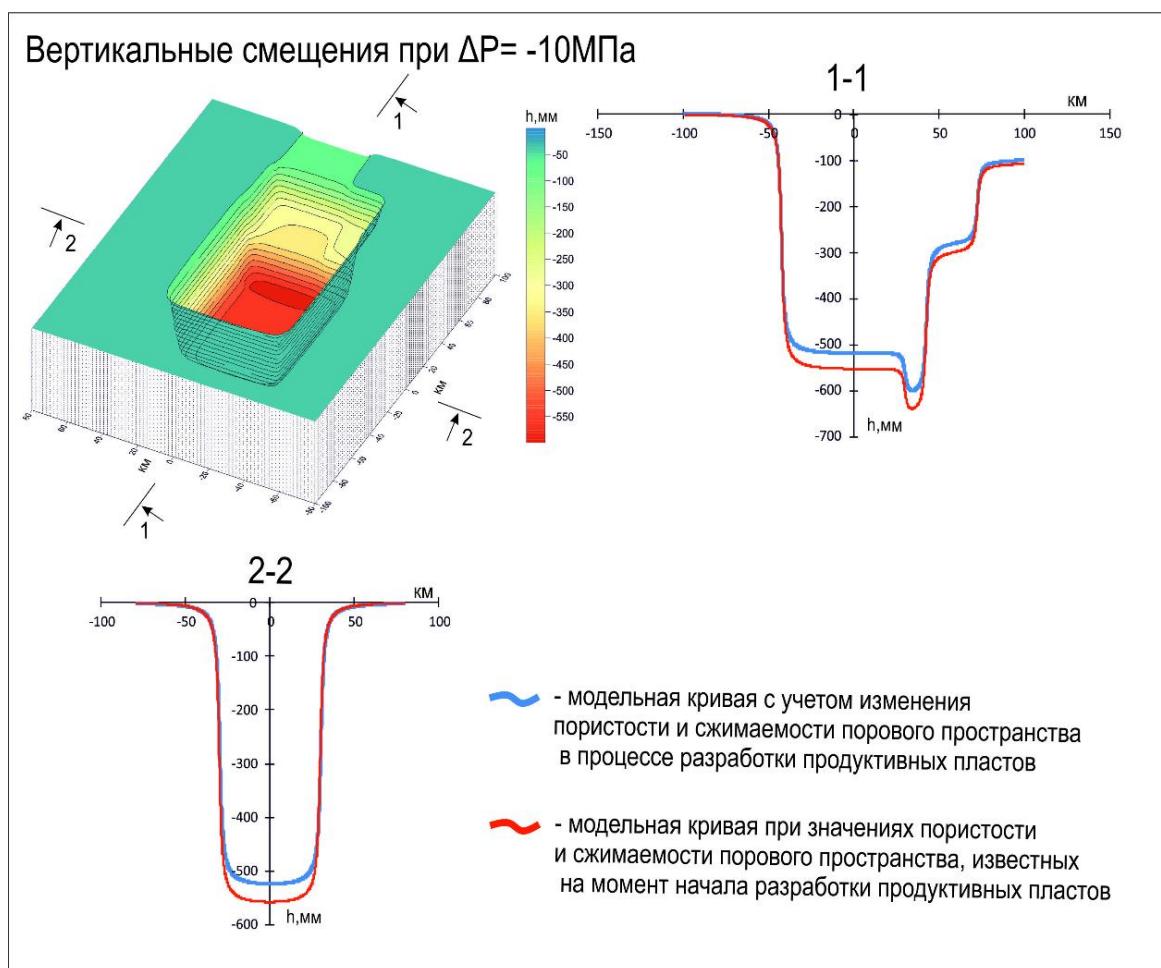


Рисунок 11 - Моделирование вертикальных смещений земной поверхности при $\Delta P_{por} = -10 \text{ МПа}$. Чаядинское месторождение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований содержится решение научной задачи определения зон потенциальной аварийности по результатам геодинамического мониторинга земной поверхности, что имеет важное значения для обеспечения выполнения норм промышленной безопасности при разработке нефтегазовых месторождений.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Проведен обзор состояния изученности проблемы в области исследования современных деформационных процессов, индуцированных разработкой нефтегазовых месторождений и выявления основных пространственно-временных характеристик современного аномального геодинамического состояния недр в пределах разрабатываемых нефтегазовых месторождений.

2. На основании приведенных исследований доказана эффективность использования генетической модели деформационного пласта для оценки оседания земной поверхности на разрабатываемых месторождениях нефти и газа и эксплуатируемых подземных газохранилищах. Максимальная эффективность в применении этой модели достигается в тех случаях, когда учитывается зависимость коэффициента объемной сжимаемости порового пространства пласта-коллектора от изменения пластового давления, вызванного процессом разработки. Это позволяет оценивать оседания на разных временных периодах разработки, поскольку коэффициент объемной сжимаемости пор уменьшается по мере снижения пластового давления.

3. Решена трехмерная задача и получена аналитическая формула распределения горизонтальных смещений поверхности упругого полупространства, содержащего прямоугольное (пластообразное)

пороупругое включение, что в совокупности с данными о вертикальных смещениях демонстрирует возможности геомеханического моделирования деформационной активности земной поверхности на разрабатываемых нефтегазовых месторождениях, а также служит инструментом редуцирования при анализе данных геодезического мониторинга.

4. Получены аналитические формулы для градиентов вертикальных и горизонтальных смещений в трехмерной постановке. Наличие подобных формул позволило оценивать пороговые значения относительных деформаций для сопоставления их с нормативными критериями.

5. Разработана технология решения обратных задач современной геодинамики недр, которая построена по аналогии с известными подходами решения таких задач в геофизике, что позволило провести прямое сопоставление локальных аномалий деформационного процесса с областями аварийности скважин на Ромашкинском нефтяном месторождении.

6. В рамках разработанного формализма предложен метод, позволяющий оценивать деформационную устойчивость морских добывающих платформ в режиме реального масштаба времени, используя результаты инклинометрического мониторинга месторождений им. Ю. Корчагина и им. В. Филановского.

7. В рамках установленного формализма разработан метод оценки локальных нормальных (вертикальных и горизонтальных) напряжений в окрестности нефтенасыщенных разрабатываемых пластов, которые служат основой для оценки геодинамической опасности недр на глубине залегания этих пластов.

8. Даны оценка распределения всех компонент плоского тензора напряжений (включая касательные) для уточнения напряженного состояния раздвиговых разломов. Эти данные предложено использовать при планировании и строительстве добывчих и разведочных скважин на Ромашкинском нефтяном месторождении, включая наклонно-направленное и горизонтальное бурение.

9. Разработанный метод определения зон потенциальной аварийности позволил определить наклоны и оседания морского дна и деформации земной поверхности в разломных зонах, что использовалось при оценке геодинамической опасности объектов недропользования на геодинамических полигонах ПАО «Татнефть», ПАО «Газпром», ПАО «Лукойл», что подтверждается соответствующей справкой о об использовании результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К. Моделирование градиентов смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях нефти и газа. // Маркшейдерский вестник. 2019. № 5. С. 56 – 62.

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

3. Кузьмин Д.К. Оценка напряженного состояния недр на разрабатываемых месторождениях нефти и газа. // Маркшейдерский вестник. 2020. № 5. С. 37 – 43.

4. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценка влияния разработки Чаядинского Месторождения на просадки земной поверхности // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22, № 1. С. 73–84.

В изданиях, индексируемых научометрической базой Scopus и Web of Science:

5. Kuzmin Yu. O., Deshcherevski A.V., Fattahov E.A., Kuzmin D.K. et al. Inclinometric observations at the Korchagin deposit // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. Vol. 54. №8. pp. 932 –940.

6. Kuzmin Yu. O., Deshcherevski A.V., Fattahov E.A., Kuzmin D.K. et al. Analysis of the results of deformation monitoring by the inclinometer system at the

Vladimir Filanocsky field // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. Vol. 55, № 11. pp. 1659–1666.

7. R. N. Gatiyatulin, D. K. Kuzmin, E.A. Fattakhov. Analysis of the results of long-term geodetic observations at the ultra-viscous oil field, South-East of Tatarstan // Seismic Instruments. 2022. Vol. 58. № 3. p. 270-282.
8. Kuzmin D.K., Kuzmin Yu.O., Zhukov V.S. Assessment of ground surface subsidence during Chayanda field development with regard to changes in petrophysical parameters of oil and gas reservoirs // Eurasian Mining. 2022. № 2 (38). P. 11-15.

В прочих изданиях:

9. Кузьмин Д.К. Сопоставление моделей деформационной активности раздвиговых разломов с результатами геодинамического мониторинга объектов нефтегазового комплекса // Проблемы недропользования. 2019. №4. С. 18 – 27.
10. Кузьмин Д.К. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем РСА (на примере мониторинга месторождений нефти и газа) // Проблемы недропользования. 2021. №2. С. 94 – 104.
11. Жуков В.С., Кузьмин Д.К. Оценки сжимаемости порового пространства коллекторов Увязовского ПХГ // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. № 3. С. 5-20.
12. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К., Ломоносов М.Д. Анализ современных деформационных процессов на газонефтяном месторождении Центральной Азии // Наука и технологические разработки. 2022. Т. 101. №3. С. 20-32.