

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071100- «Геодезия»

Орынбасарова Эльмира Орынбасаровна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЙ ПОДГОТОВКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ОСЕДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИЙ ТЕНГИЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Использование космических данных для оценки оседания промышленной поверхности, позволяет не только увидеть сегодняшнюю геодинамическую ситуацию на исследуемой территории, но и заглянуть на 30-40 лет назад. Информация извлеченная из архивных космических снимков позволяет оценить основные тренды в смещении земной поверхности и получить устойчивые деформационные характеристики. При этом, применение спутниковых данных не исключает необходимость планирования наземных наблюдений, но позволяет их более точно локализовать и выполнять более разреженно во времени и в пространстве. Однако, на сегодняшний день, один из классических методов обработки данных SBAS имеет множество недостатков и может дать не совсем верный результат.

Потенциальным решением является метод прерывистой малой базовой линии (ISBAS), который является модификацией алгоритма SBAS. Модификация учитывает прерывистый характер когерентности динамического земного покрова (например, лугопастбищных угодий, лесов, сельскохозяйственных полей), значительно увеличивая плотность измерений в негородских районах, чтобы обеспечить более повсеместный охват. Метод ISBAS ранее использовался для определения и количественного определения поверхностного движения из-за забора подземных вод, подземной добычи угля, оползней и состояние торфяников. Этот метод также был применен к газовым месторождениям в регионе Алкмар в Нидерландах, где он был успешно проверен по традиционным данным нивелирования. Это исследование предоставило ценную возможность для проверки, учитывая, что подходящих данных о достоверности земли для негородских районов часто мало. Однако более широкое применение метода ISBAS для глобального мониторинга нефтегазовых операций в частях мира с различными экологическими и климатическими условиями еще предстоит продемонстрировать.

Тенгизское нефтяное месторождение с его динамичным полузасушливым ландшафтом и отсутствием населенных пунктов представляет собой тип местности, для которой комплексный мониторинг деформации грунта может быть проблематичным с использованием некоторых методов DInSAR. Тем не менее, поскольку добыча углеводородов является единственным доминирующим фактором деформации грунта и, как правило, недостаточного

густого растительного покрова, нефтяное месторождение было ранее исследовано с использованием нескольких методов DInSAR, таких как SBAS и SqueeSAR, что делает его отличным примером для изучения. Соответственно, это исследование направлено на оценку эффективности метода ISBAS для предоставления подробной, всеобъемлющей характеристики деформации над месторождением Тенгиз. Во-первых, измерения движения грунта, полученные с использованием ISBAS, проверяются путем сравнения с данными для обычной методики SBAS, результатами предыдущих исследований DInSAR и данными нивелирной съемки. Затем метод ISBAS применяется к современным данным SAR, чтобы представить новую перспективу недавней деформации над нефтяным месторождением, демонстрируя ее потенциал для поддержки геодинамического мониторинга в регионе. Также, в данной работе приводятся методы конфигурации критических параметров и обеспечения качества обработки в ключевых моментах обработки радарных данных в виде рекомендаций.

Все эти вопросы регламентируются указом Президента Республики Казахстан, имеющего силу закона от 29.01.96 г №2828 “О недрах и недропользовании”, и законы РК “О нефти” и “Об охране окружающей природной среды”, где на нефтегазодобывающие предприятия возложено проведение мониторинга за состоянием массива подрабатываемых объектов и инженерных коммуникаций для обеспечения нормальной работы предприятия.

Работа выполнена в компании Geomatic Ventures и в Ноттингемском Университете (Англия) под руководством зарубежного научного консультанта Эндрю Соутер, где докторант принимала участие в выполнении темы. Космические снимки ENVISAT ASAR были предоставлены на основе заявки для проведения исследовательской работы Европейским Космическим Агентством.

Объектом исследования является территория нефтяного месторождения Тенгиз, расположенного в Атырауской области.

Предметом исследования является деформации и смещения земной поверхности, происходящие в результате длительной и интенсивной разработки нефтяного месторождения.

Цель исследования заключается в совершенствовании методики комплексной подготовки и использования данных радиолокационной синтезированной аппаратуры для оценки оседания промышленной поверхности.

Идея работы заключается в использовании радарных данных Envisat Asar, предоставленные Европейским Космическим Агентством, данных РСА Sentinel-1 свободного доступа, данных нивелирования заданной территории, геологических данных по скважинам.

Поставленная цель достигается путем решения **следующих задач:**

- выполнить анализ современных методов наблюдений за деформацией земной поверхности

- определить деформацию и анализировать динамику изменения над месторождением Тенгиз с применением классического метода дифференциальной интерферометрии SBAS.

- выполнить апробацию инновационного метода ISBAS для обработки данных с диапазона при мониторинге смещений Тенгизского месторождения.

- произвести оценку точности проведенных исследований.

- разработать критерии выбора PCA данных для задач мониторинга

- совершенствовать обобщенную методику вычисления мульды оседания для нефтяных месторождений с применением данных PCA.

Методологическая база исследования

К числу основных методов исследований и анализов, применяемых при выполнении диссертационной работы, относятся:

- анализ доступных радарных данных ENVISATASAR на данную территорию с помощью программного обеспечения EOLISA;

- Анализ доступных на заданную территорию данных Sentinel-1 и скачивание снимков.

- Обработка радарных данных ENVISATASAR и Sentinel-1 в программном обеспечении Punset с применением классического метода обработки SBAS и инновационного метода ISBAS, включая:

а) Конфигурация критических параметров, обеспечения качества обработки в ключевых моментах.

б) Развертка фазы методом Statistical-cost, Network-flow Algorithm.

с) Устранение топографической ошибки с помощью ЦМР SRTM

- Визуализация и классификация результатов в программном комплексе ArcGIS;

- Анализ динамики изменений земной поверхности

- Оценка точности проведенных измерений.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Критерии оценки и выбора космических снимков, позволяющая получить качественные радарные данные для дальнейшей обработки.

2. Методика обработки космических снимков с конфигурацией критических параметров в ключевых моментах обработки, исключающую интерферограммы с низкой когерентностью.

3. Инновационный метод ISBAS, позволяющая применять произвольную опорную точку для расчета смещения земной поверхности.

Научная новизна работы: В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны критерии для оптимального выбора радарных данных для задач оценки оседания земной поверхности в условиях эксплуатации Тенгизского месторождения.

2. Усовершенствован метод обработки космических снимков с радиолокационной синтезированной апертуры С диапазона, позволяющая производить мониторинг деформационных процессов в техногенно нагруженных зонах.

3. Установлено, что применение инновационного алгоритма ISBAS позволяют исключать ошибки связанные с выбором опорной точки при мониторинге смещений.

Сведения о метреологическом обеспечении диссертации.

Достоверность полученных результатов подтверждается с проведенным анализом по оценке точности. Нефтяное месторождение было ранее исследовано с использованием нескольких методов DInSAR, таких как SBAS и SqueeSAR. Также на данное месторождение имеются данные наземного геодинамического метода мониторинга данные нивелирования.

Научное значение работы заключается в развитии представлений о механизме деформирования массива при разработке месторождений нефти и газа, в том числе в теоретическом и экспериментальном обосновании методики комплексной подготовки и использования снимков в задачах оценки оседания промышленной поверхности в условиях эксплуатаций Тенгизского месторождения.

Практическая значимость работы состоит во внедрении в учебный процесс разработанной методики подготовки и обработки космических снимков на нефтегазовом месторождении Тенгиз и научно-исследовательские организации для выполнения деформационного мониторинга с применением данных Sentinel-1 и ENVISAT ASAR, а также учебный процесс во время прохождения дисциплины, таких как Дистанционное Зондирование Земли.

Также практическая значимость диссертации можно обосновать статьей вышедшим в журналах с высоким импакт-фактором, входящих в базу web of science, Scopus и т.д. Хирша данной статьи -1.

Достоверность полученных результатов выводов и рекомендаций подтверждается значительным объемом исследований процессов взаимодействия природных и техногенных факторов в зоне влияния нефтегазопровода с использованием элементов системного анализа, а также практическим применением разработанной методики в производстве и учебном процессе МОК.

Публикации Публикации включают одну статью в рейтинговом журнале «International Journal of Applied Earth observation and Geoinformation» (база web of science), 4 статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и МОН РК;

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 98 наименований и приложений. Работа изложена на 103 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 9 таблиц.

Во введении представлена общая характеристика работы. Сформулированы актуальность темы, цель и задачи исследования, изложены научные положения, выносимые на защиту и практическая значимость работы.

В первой главе было представлено описание объекта исследования-месторождения УВС Тенгиз, которое считается одним из гигантских месторождений в мире и представляет научный интерес для изучения. Месторождение разделено на три области, которые были разграничены в

соответствии со структурным рельефом по всему полю: платформа, бортовая (рим) и склон. Подавляющее большинство добывающих скважин расположено на платформе и предназначено для добычи углеводородов в литофациальных структурах из зернистого и пакстонового камня Верхне-Визейского, Серпуховского и Башкирского водохранилищ. Анализ нефтяного месторождения Тенгиз выполнен с целью изучения текущего состояния разработки, что является важным аспектом при мониторинге деформаций земной поверхности.

Также, в данной главе был проведен анализ применения космических снимков, в том числе радарных. Широкое применение данных космической съёмки открыло новые перспективы для мониторинга изменения состояния окружающей среды и процессов происходящих на поверхности земли. Идею использования смещения фазы в отраженном сигнале данных дистанционного радиолокационного зондирования для интерференции впервые высказал Д. Ричман в 1971 (США). Однако первые практические результаты по предложенной методике были получены только в 1986-1989гг. исследователями Р.М. Голдстейном и Х.А. Зибкером. А первой опубликованной работой об использовании дифференциальной интерферометрии была работа Д. Массоннета в 1993г., в которой были оценены смещения земной поверхности после землетрясения. На сегодняшний день, данные радарной съёмки применяются в различных отраслях мировой экономики, такие как сельское хозяйство, мониторинг ледяных покровов, лесоводство, морские ветры и т.д. Применение космической информации в задачах мониторинга изменений земной поверхности в условиях горнодобывающей и нефтегазовой промышленности, а также при мониторинге деформаций зданий и сооружений широко распространяется последние десятилетия в странах СНГ и РК. Также было выявлено, что основной методикой для обработки космических радарных данных в целях мониторинга деформаций земной поверхности в нашей стране является классический метод SBAS.

Во второй главе приведены основные теоретические аспекты радиолокационной синтезированной аппертуры, в том числе представлено подробное описание классического метода DInSAR SBAS. Технология SBAS представляет собой хорошо зарекомендовавшую себя методику DInSAR (Дифференциальная радиолокационная интерферометрия), позволяющую определять деформацию земной поверхности, и что, самое главное, анализировать ее развитие во времени.

В частности, данная технология основана на использовании большого количества собранных данных при помощи радиолокатора с синтезированной аппертурой (SAR) и позволяет комбинировать многовыборочные интерферограммы с использованием методики DInSAR, рассчитанные на специализированном ПО, в конечном счете, позволяя разрабатывать карты осредненной скорости смещений земной поверхности.

Кроме того, рассмотрены основные проблемы применения радарной интерферометрии, которые возникают из теоретических основ и во время использования классических алгоритмов обработки радарных данных. К

основным факторам, влияющих на получение качественного результата можно отнести отражающую способность поверхности, большое количество растительности, влажный климат, выбор опорной точки, при отсутствии наземных опорных точек, «экран» атмосферной фазы, изменение геометрии изображений, влияние ЦМР и т.д. Многие из этих факторов влияют на получение когерентной картины, в то время как другой фактор-избыточность снимков-увеличивает время на создание интерферометрических пар, а также во время анализа влияния шумов. Рассмотрение вышеперечисленных источников ошибок является важным аспектом данной исследовательской работы, так как целью данной диссертации является совершенствование существующих методов обработки РСА данных.

Третья глава описывает экспериментальную часть, данной диссертационной работы. Для расчета средней вертикальной деформации поверхности в исследуемой области за отрезок времени были использованы тридцать три нисходящих изображения РСА (SAR), полученные в период с 21-го июля 2004 года по 25-ое февраля 2009 года. Изображения были получены с помощью усовершенствованного радиолокатора с синтезированной апертурой (ASAR) С-диапазона (длина волны 5,6 см, частота 5,3 ГГц), на борту спутника для исследования окружающей среды ENVISAT Европейского космического агентства. Полный набор изображений ENVISAT ASAR, который охватывает область приблизительно $100 \text{ км} \times 100 \text{ км}$ с пространственным разрешением по земле 25 м по дальности и 5 м по азимуту, был обрезан до подмножества $42 \times 40 \text{ км}$, охватывающего исследуемую область затем обрабатывался с использованием методов Анализа Дифференциальной РЛС с интерферометрической синтезированной апертурой (DInSAR).

Перед обработкой изображения были совместно зарегистрированы с точностью до субпикселя по главной сцене, полученной 16 февраля 2005 года. Для уменьшения шума и повышения когерентности были применены многовариантные коэффициенты 4 по дальности и 20 по азимуту, в результате чего были получены пиксели, соответствующие наземному разрешению приблизительно $100 \text{ м} \times 100 \text{ м}$. Как и в случае небольших фоновых исследований ENVISAT, интерферограммы были получены с 4-летним ограничением по временной исходной линии и 250 м на перпендикулярной исходной линии, в результате чего был получен набор из 135 многовариантных дифференциальных интерферограмм. Данные ограничения сводят к минимуму временную и пространственную декорреляцию в интерферограммах, тем самым повышая качество фазы и когерентность, одновременно уменьшая влияние погрешностей в цифровой модели рельефа, используемой для генерации дифференциальных интерферограмм.

Стандартный анализ когерентного рассеивателя был реализован на основании многовариантных данных, следуя базовой процедуре, описанной Lanari и др. (2007), так что обрабатывались только пиксели со средней когерентностью ≥ 0.25 на каждой интерферограмме. В настоящем документе данный подход будет называться техникой SBAS. Напротив, метод ISBAS определяет подходящие пиксели для анализа путем включения минимального

стандарта качества наряду с когерентностью. В частности, пиксель сохраняется, если он имеет когерентность $\geq 0,25$ в минимальном количестве интерферограмм, что позволяет анализировать элементы, которые периодически когерентны в стеке изображений. Минимальное количество пороговых значений интерферограмм позволяет найти компромисс между пространственным охватом и точностью полученных измерений деформации, с большим количеством интерферограмм, что приводит к более точному результату с более редким распределением измерений. Оптимальный порог можно определить из эмпирической зависимости между среднеквадратической погрешностью решений по скорости ISBAS и количеством интерферограмм. В этом случае минимальное количество интерферограмм для метода ISBAS было установлено равным 60.

Топографическая фаза была удалена из дифференциальных интерферограмм с помощью 90 м цифровой модели рельефа Полета Многоцветного транспортного космического корабля для отработки радиолокационной топографии (Shuttle Radar Topography Mission) (SRTM), как и любые орбитальные скаты, до того, как алгоритм сетевого потока статистических расходов был применен для развертывания когерентных (т. е. SBAS) и прерывисто когерентных (т. е. ISBAS). Затем была рассчитана средняя скорость движения для каждого пикселя относительно контрольной точки, которая была тщательно выбрана для обеспечения того, чтобы она оставалась когерентной по всем интерферограммам и стабильной на протяжении всего периода анализа DInSAR. Контрольная точка расположена на построенной конструкции в пределах завода по переработке нефти и газа по координатам $53,4^\circ$ с.ш., $46,2^\circ$ в.д.

В конечном итоге, в отсутствие достаточных данных ENVISAT с нисходящей орбиты для стереоанализа, средние скорости на линии прямой видимости радара (LOS) были преобразованы в эффективные вертикальные скорости путем деления на косинус угла падения для каждого пикселя. Это преобразование было выполнено для обеспечения возможности сравнения как с данными выравнивания, так и с более поздней деформацией, полученной из SAR. Посредством конвенции положительные эффективные вертикальные скорости представляют поднятие поверхности (или подъем), тогда как отрицательные скорости указывают на оседание грунта.

Вышеуказанная процедура ISBAS была также применена к данным SAR Sentinel-1 для 52 восходящих изображений, полученных в период с 11 ноября 2016 года по 29 сентября 2017 года, чтобы точно определить очертания недавней деформации грунта над месторождением Тенгиз. Sentinel-1 - это радиолокационная миссия с двумя спутниками, на которой установлен прибор SAR в диапазоне C (C-Band) (5,405 ГГц). Sentinel-1a и Sentinel-1b были запущены в апреле 2014 года и апреле 2016 года соответственно, и в настоящее время два спутника поддерживают бесконфликтный повторный проход до 6 дней. 1-летняя временная исходная линия и 150-метровая перпендикулярная базовая линия позволили получить 1179 многовариантных интерферограмм. Минимальное количество порогов интерферограмм было установлено равным

430. Опять же, из-за недостаточного количества изображений нисходящей орбиты Sentinel-1 в отношении того же периода времени измерения прямой видимости радара (LOS) были преобразованы в вертикальные скорости с использованием косинусной коррекции, чтобы нормализовать различные геометрии между Sentinel -1 и ENVISAT для сравнения

Средняя и максимальная вертикальная скорость оседания ISBAS на платформе и области обода составляет -5,5 мм / год и -15,7 мм / год соответственно. Как также указывается в результатах SBAS, самое большое оседание приходится на северную часть месторождения, где наибольшее количество эксплуатационных скважин и дислокация порового давления. Хотя метод ISBAS не распознается с помощью SBAS, он позволяет полностью охарактеризовать данную деформацию как чаша оседания. Это полностью согласуется с наличием чаши оседания, ранее вычисленной с помощью геомеханического моделирования, выполненного Comola и др. (2016). Кроме того, скорость оседания сильно коррелирует с различными областями порового давления, выявленными Дагистановой и др. (2011), что дает прямое полуколичественное понимание геомеханических характеристик пласта в течение настоящего периода (Рисунок 1). Также очевидна более слабая вторичная корреляция с глубиной в пласте, когда связанные с этим изменения напряжений легче передаются на поверхность через более тонкие слои покрывающего грунта над центральной и внешней платформой.

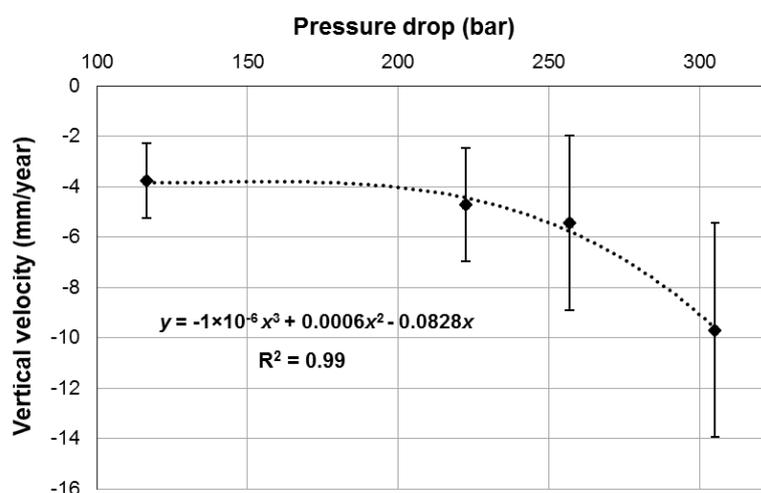


Рисунок 1. Корреляция между снижением давления и средней скоростью оседания, полученной из ENVISAT ISBAS в пределах областей давления, определенных Дагистановой и др. (2011). Планки погрешностей представляют стандартное отклонение вертикальных скоростей внутри регионов.

Ряд предыдущих исследований DInSAR был проведен с целью выявления деформации над нефтяным месторождением Тенгиз. При сравнении этих результатов с результатами, полученными здесь, важно признать, что некоторое несоответствие в величинах скорости и охвате измерения неизбежно, даже когда используется один и тот же метод, из-за различий в параметрах обработки (например, временных и перпендикулярных исходных линиях) и периода времени, охватываемого данными. Кроме того, использование

косинусной поправки для преобразования измерений прямой видимости радара (LOS) в эффективные вертикальные скорости налагает предположение, что поле деформации является полностью вертикальным по своей природе. Хотя конверсионный подход был необходим для сравнения с данными нивелирования и результатами Sentinel-1, данное предположение может быть не совсем точным, и поэтому важно понимать, что полученные здесь вертикальные скорости являются ограниченной приближительной точностью истинного движения земли.

Жантаев и др. (2012) применили анализ SBAS к данным ENVISAT ASAR и ALOS РЛС диапазона L с синтезированной апертурой и фазированной антенной решёткой (PALSAR), полученным за периоды 2004–2009 и 2007–2010 гг. соответственно. Оба результата показывают характер деформации, соответствующий результату ISBAS, в котором преобладает чаша оседания над северной частью месторождения с максимальной скоростью движения грунта до -20 мм / год в прямой видимости радара LOS. С точки зрения охвата, результат ALOS SBAS Жантаева и др. (2012) предоставляет больше измерений движения грунта, чем результаты ENVISAT SBAS, представленные здесь, что, вероятно, связано с тем, что было идентифицировано больше когерентных пикселей, учитывая, что сигнал ALOS с большей длиной волны (L-диапазон, 23,6 см) менее чувствителен к временным изменениям состояния поверхности. Тем не менее, результат ALOS SBAS Жантаева и др. (2012) визуально, как предоставляется, обеспечивает значительно меньшее количество измерений по всей исследуемой области, чем получено для подхода ISBAS, применяемого к данным в диапазоне C ENVISAT. Хотя в районах с растительным покровом данные L-диапазона позволяют обеспечить когерентное восстановление фазы в течение более длительных временных исходных линий по сравнению с C-диапазоном, когерентность все еще может снижаться до $<0,25$ для временных интервалов менее одного года.

Следовательно, без применения минимального временного исходного уровня для анализа ALOS SBAS, возможно, что некоторая временная декорреляция неизбежно произойдет на растительных участках нефтяного месторождения. Следовательно, пиксели, демонстрирующие любую степень временной декорреляции, будут немедленно отбрасываться в анализе ALOS SBAS, тогда как периодически когерентные пиксели сохраняются в анализе ISBAS, что учитывает дополнительные измерения движения грунта, наблюдаемые здесь, несмотря на использование данных C-диапазона. Comola и др. (2016) также обработали данные ENVISAT за 2004-2007 гг., чтобы определить параметры для оптимизации их геомеханического моделирования. Данные были обработаны с использованием метода SqueeSAR, в котором используются как постоянные, так и распределенные рассеиватели для повышения плотности измерений движения грунта в не городских районах. Результаты SqueeSAR дополнительно подтверждают результаты ISBAS, обнаруживая четко определенную чашу оседания над пластом со скоростями смещения в прямой видимости радара (LOS) до -20 мм / год, которые предполагаются почти полностью вертикальными, учитывая небольшой угол

падения. Comola и др. (2016) также сообщают о сильных западно-восточных компонентах (8–10 мм / год) в области перемещения грунта, однако это невозможно проверить в настоящем исследовании из-за отсутствия достаточных данных с нисходящей орбиты за 2004 -2009 гг. Визуально метод SqueeSAR обеспечивает сопоставимый охват пласта с охватом ISBAS, в то время как сообщенные средние плотности для постоянных и распределенных рассеивателей составляют 33 измерения / км² и 50 измерений / км², соответственно, что приводит к ~ 150 000 измерениям.

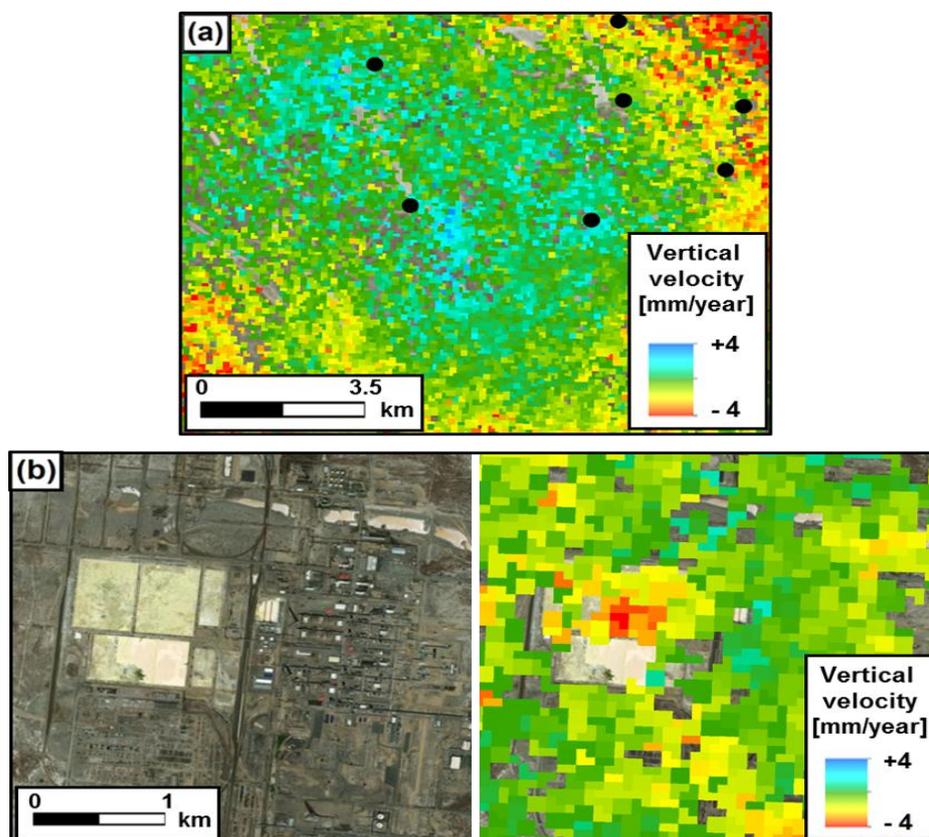


Рисунок 2. Локализованная деформация, выявленная с помощью метода ISBAS, примененного к ENVISAT. (a) Зона стабильности и поднятия, наблюдаемая на юго-восточной стороне нефтяного месторождения Тенгиз, и (b) проседание над серными площадками. Черные круги представляют собой расположения скважин.

Хотя плотность измерений может показаться ниже, чем полученная с использованием ISBAS, сравнение нецелесообразно из-за внутренних различий между двумя методами (т. е. тип данных - точки против пикселей) и протяженностью зоны и периодом времени ENVISAT.

Расширенный охват, предоставляемый ISBAS, объясняет другие интересные особенности деформации, которые не были упомянуты ранее. Примечательный пример расположен к юго-западу от месторождения, где наблюдается область стабильности, чередующаяся с локализованными пятнами легкого поднятия (<3,5 мм / год) (рис. 2а). Эта область перекрывает фланг пласта, который, в отличие от областей платформы и обода, подвергался бессистемному снижению давления в течение второй половины периода

времени, охватываемого анализом DInSAR. Фактически, сообщалось, что в течение этого времени в скважинах в этом регионе не наблюдалось никаких изменений или небольшое увеличение порового давления, что, вероятно, объясняет наблюдаемую деформацию.

Кроме того, небольшая зона проседания наблюдается над серными площадками на нефтегазоперерабатывающем заводе (рис. 2b). Сера образуется в качестве побочного продукта процесса нефтепереработки, и движение свидетельствует о неуклонном уменьшении высоты отвала, либо путем осадения, либо в результате действий по удалению всех отвалов с площадки в течение 2007–2015 годов. Отсутствие измерения скорости над площадкой непосредственно к югу от оседания присутствует из-за длительной потери когерентности вследствие быстрых изменений характеристик рассеяния площадки с течением времени - скорее всего, из-за быстрого удаления значительных количеств накопленного материала.

Таблица 1. Прямое статистическое сравнение между уровнями деформации (2001-2005) и ENVISATISBAS (2004-2009).

Тип измерения	ми	мак	Среднее	Средняя	Стандартное
	минимал (мм / год)	симал (мм / год)			
Нивелирование	-1.0	-9.9	6.1	-	2.1
ISBAS	-2.7	13.7	8.7	-	3.6

Количество измерений = 25
 Средняя абсолютная погрешность = 2.71 мм / год
 среднеквадратическая ошибка (RMSE) = 3.18 мм / год

Прямое сравнение показывает разумный уровень соответствия между высокоточным нивелированием и измерениями ISBAS со среднеквадратичной ошибкой (RMSE) 3,18 мм / год и средней абсолютной погрешностью 2,71 мм / год (Таблица 1). Измерения на периферии пласта показывают большее соответствие посредством RMSE 0,64 мм / год. Различия в скорости оседания являются самыми большими к центру пласта, где максимальные скорости составляют -13,7 мм / год и -9,9 мм / год для метода ISBAS и выравнивания, соответственно. Предполагается, что это расхождение обусловлено, прежде

всего, временным смещением между двумя наборами измерений, что означает, что они не отражают одинаковые условия эксплуатации в полевых условиях. Например, измерения нивелирования охватывают период 2001–2005 годов, когда добыча нефти была относительно низкой и устойчивой (см. Рисунок 3), тогда как анализ DInSAR фиксирует существенный рост добычи нефти после 2007 года, который, вероятно, привел к увеличению уплотнения пласта и деформации грунта.

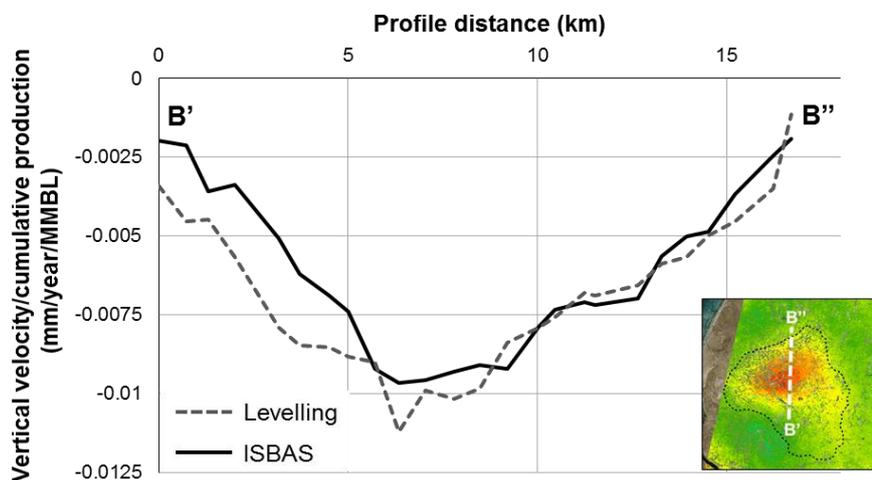


Рисунок 3. Сравнение нормированных по продуктивности скоростей деформации Тенгизского пласта, измеренных с использованием нивелирования (за период 2001–2005 гг.) и ISBAS (2004–2009 гг.). Расположение профиля указано на вставке и на Рисунке 1.

Сравнение с данными нивелирования. Для объяснения данного несоответствия, два набора измерений движения грунта были нормализованы к совокупной добычи между 1993 и концом каждого периода измерения (то есть кумулятивная добыча за 1993–2005 и 1993–2009 годы для нивелирования и данных DInSAR, соответственно). Это приводит к более высокому уровню соответствия между тенденциями деформации, что четко подтверждает наличие чаши оседания над пластом (рис. 3). Более того, это подтверждает, что рабочий дебит является основным фактором, определяющим скорость деформации, наблюдаемой на нефтяном месторождении. Любое незначительное остаточное расхождение между двумя наборами данных будет вызвано другими факторами, включая сравнение точечных и площадных измерений, использование различных опорных точек для измерения скорости смещения поверхности и другими изменениями в полевых условиях

эксплуатации.

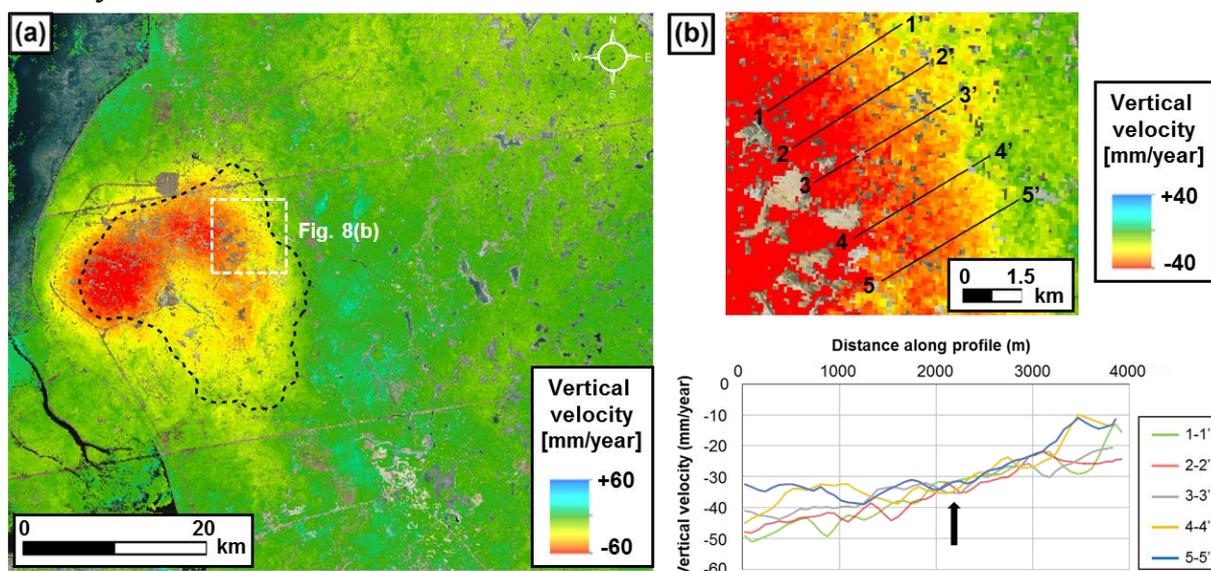


Рисунок 4. (а) Недавняя карта деформации грунта исследуемой области, показывающая вертикальные скорости, вычисленные по данным Sentinel-1 (2016–2017) с использованием метода ISBAS. (б) Масштабированное подмножество карты деформации и профилей поперечного сечения на восточной окраине нефтяного месторождения. Черная стрелка указывает на потенциальный тонкий уклон.

Недавняя деформация грунта Метод ISBAS, примененный к данным Sentinel-1 (2016–2017), дает новое представление о недавней деформации грунта над месторождением Тенгиз (рис. 4а). Карта деформаций, выходящая за рамки анализа ENVISAT, показывает, что ранее признанная чаша оседания превратилась в более широкую область оседания, охватывающую весь пласт. Фактически, оседание простиралось до 3 км за пределы области платформы и обода и во фланги со всех сторон, кроме восточной стороны, которая, по-видимому, связана с северо-западно-юго-восточными сдвиговыми разломами по этому краю. Потенциальный, хотя и тонкий, северо-западно-юго-восточный линеамент, образованный разрывом в скорости проседания вкостр простирания, может обнаруживаться в данной области (Рисунок 4б).

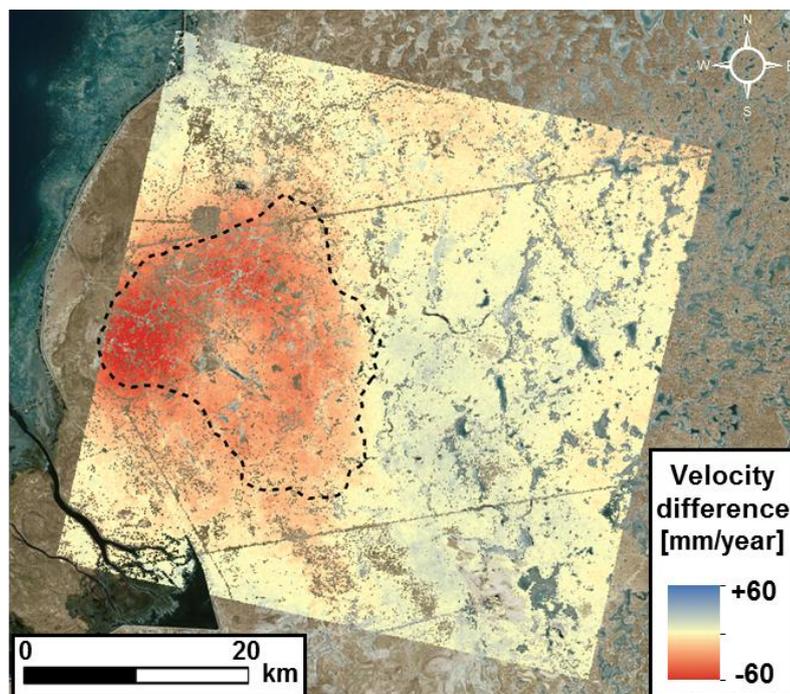


Рисунок 5. Разница в скорости вертикальной деформации грунта между периодами 2016–2017 гг. (Sentinel-1) и 2004–2009 гг. (ENVISAT). Отрицательные различия в скорости представляют собой увеличение скорости оседания с 2004 по 2009 год.

Средние и максимальные скорости оседания, наблюдаемые в районе платформы и края, составляют $-36,1$ мм / год и $-79,3$ мм / год соответственно. Это представляет собой существенное увеличение оседания в 6,6 раза и в 5 раз по сравнению с периодом 2004-2009 гг. Наибольшее увеличение скорости оседания наблюдается на северном, восточном и западном краях месторождения (рис. 5), совпадающих с зонами сверхпроницаемости. Такие районы были подвержены недавней разработке месторождений из-за их высокой плотности трещин, и впоследствии являются самыми высокопродуктивными зонами. Деформация на севере и западе ускорилась больше всего, при этом оседание, с увеличением, как правило, на 50–60 мм / год по сравнению с темпами 2004–2009 гг. Скорость оседания в центральной и южной частях возросла примерно на 50% по сравнению с севером и западом месторождения (то есть на 20–30 мм / год). Центр платформы менее подвергся разрывам, чем по краям, хотя в 2008 году для повышения нефтеотдачи в этом конкретном регионе была использована технология закачки кислого газа. Исходя из результатов ISBAS Sentinel-1, потеря чистого объема над основной платформой и областью обода только на период 2016–2017 гг. оценивается в $5,61 \times 10^6$ м³ / год. Ожидается, что такие потери объема и проседания будут связаны со значительным истощением давления и уплотнением на месторождении - это, вероятно, является одним из ключевых факторов недавнего Проекта будущего расширения - Проект управления устьевым давлением, который призван увеличить добычу на месторождении.

В четвертой главе приведены разработанные критерии по выбору снимков и усовершенствованные рекомендации для обработки радарных данных.

1. Для получения качественной интерферограммы нужно применить ограничение 4 года по временной базовой линии и 250 м по перпендикулярной базовой линии. Данные ограничения сводят к минимуму временную и пространственную декорреляцию в интерферограммах, тем самым повышая качество фазы и когерентность (Gee и др., 2017), одновременно уменьшая влияние погрешностей в цифровой модели рельефа, используемой для генерации дифференциальных интерферограмм.

2. Для уменьшения шума и повышения когерентности для данных ENVISAT и ERS лучше применять многовариантные коэффициенты 4 по дальности и 20 по азимуту, для получения пиксели, соответствующие наземному разрешению приблизительно $100 \text{ м} \times 100 \text{ м}$.

3. В то время для пространственного усреднения пикселей интерферограмм, созданных от данных Sentinel-1, устанавливаются коэффициенты 6 и 30 в направлениях азимута и диапазона дальности соответственно. Это можно обосновать тем, что формат SLC Sentinel-1 сильно отличается от формата ERS и ENVISAT: Sentinel-1 генерируется с использованием процессора TOPS, тогда как ERS и ENVISAT генерируются с использованием обработки Stripmap.

4. Манипулируя файлами подпараметров, можно уменьшить интересующую область, что увеличило бы скорость создания интерферограммы. Эта манипуляция может быть выполнена, если во время обработки появляются какие-либо ошибки (например, после 18 часов обработки) и после обнаружения ошибки и ее устранения, чтобы быть уверенным, что она была устранена, можно использовать манипуляцию с уменьшением площади.

5. Применение метода ISBAS, так как этот метод определяет подходящие пиксели для анализа путем включения минимального стандарта качества наряду с когерентностью (Sowter и др., 2013). В частности, пиксель сохраняется, если он имеет когерентность $\geq 0,25$ в минимальном количестве интерферограмм, что позволяет анализировать элементы, которые периодически когерентны в стеке изображений (рисунок 9).

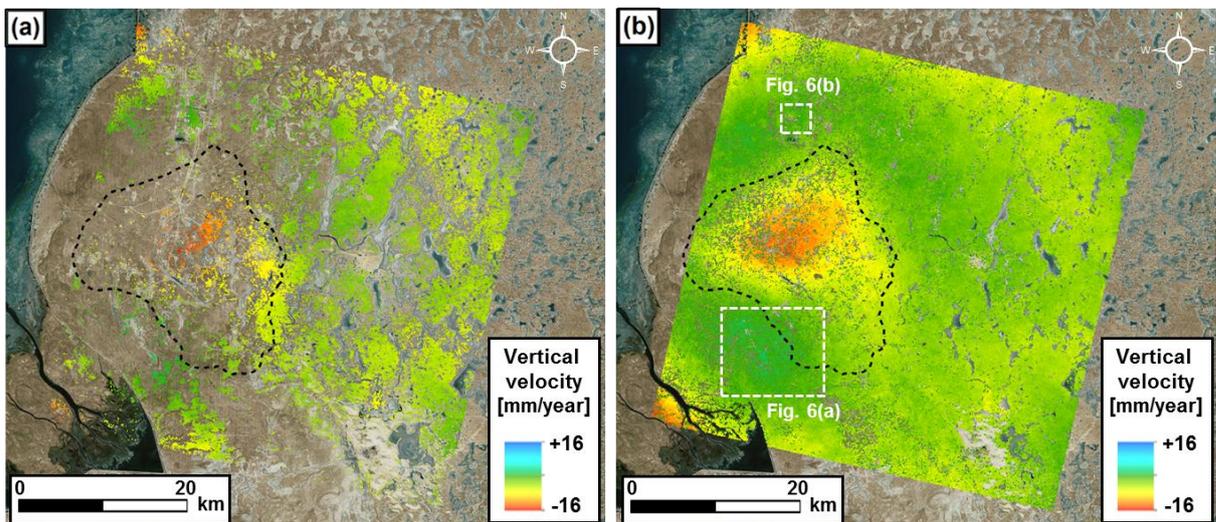


Рисунок 6. Карты деформации грунта, показывающие вертикальные скорости, рассчитанные по данным ENVISAT (2004–2009 гг.) с использованием методов (a) SBAS и (b) ISBAS. Положительные скорости указывают на подъем, а отрицательные скорости указывают на оседание. Пунктирная черная линия показывает протяженность платформы и области обода Тенгизского нефтяного месторождения. Расположение рисунков 6 (a) и (б) показано.

Измерения средней вертикальной скорости, рассчитанные по данным ENVISAT (2004–2009 гг.) с использованием методов SBAS и ISBAS, приведены на рисунке 9. В общей сложности 102 398 когерентных пикселей было идентифицировано с использованием метода SBAS, что соответствует среднему значению ~ 60 измерений / км^2 . Когерентные пиксели имеют тенденцию группироваться вокруг областей, в которых преобладают стабильные рассеиватели, такие как Тенгизский нефтегазовый комплекс прямо к северу от границы платформы, и по блокам с менее рассеченным грунтом в центре и к востоку от площади исследования (Рисунок 6a). Включение в анализ пикселей, которые демонстрируют прерывистую когерентность, заметно увеличивает пространственный охват и плотность измерений движения грунта (рисунок 6b). При 366 842 пикселях число измерений наземного движения ISBAS в 3,6 раза больше, чем для SBAS, что составляет в среднем ~ 215 измерений / км^2 . По сравнению с только 15% охватом, обеспечиваемым SBAS. Дополнительные измерения расположены по типам земного покрова, которые обычно неблагоприятны для обычного анализа DInSAR; особенно места с густым растительным покровом. Такие области часто являются динамическими между наблюдениями в связи с физиологическими изменениями в растительности, и поэтому будут казаться когерентными в одних интерферограммах, а в других нет (Sowter и др., 2013).

Результаты SBAS показывают преимущественно устойчивую почву, за исключением небольшой области проседания вблизи центра месторождения. Максимальная скорость оседания составляет -14 мм / год в северной части платформы. Тем не менее, расширенный охват, предоставляемый методом ISBAS, лучше характеризует пространственную картину деформации,

раскрывая более обширную область оседания, которая разграничивает протяженность пласта.

6. Выбор оптимального минимального количества пороговых значений интерферограмм. Правильный выбор позволяет найти компромисс между пространственным охватом и точностью полученных измерений деформации, с большим количеством интерферограмм, что приводит к более точному результату с более редким распределением измерений. Оптимальный порог можно определить из эмпирической зависимости между среднеквадратической погрешностью решений по скорости ISBAS и количеством интерферограмм (Cigna и Sowter, 2017).

7. Выбор оптимальной опорной точки. Стабильная правильно выбранная опорная точка определяет конечный результат, в том числе наличие деформации земной поверхности в нефтедобывающих отраслях. Однако, применение метода ISBAS нет необходимости развертывания угловых отражателей и использования произвольной контрольной точки, которая не требует абсолютных наземных данных позиционирования, что повышает практичность мониторинга.

8. Независимость значения пикселей от соседних пикселей.

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований

В диссертационной работе изложены *научно-обоснованные технические разработки* по совершенствованию методики комплексной подготовки и использования космических снимков для оценки оседания земной поверхности, *обеспечивающие решение прикладных задач* нефтегазодобывающей промышленности – безопасной и эффективной разработки месторождений, на примере Тенгизского нефтегазового месторождения.

Основные результаты выполненных исследований заключается в следующем:

1. Применена технология ISBAS DInSAR для мониторинга деформации грунта над нефтяным месторождением Тенгиз в Казахстане.

2. Выявлена четко очерченная чаша, с максимальной скоростью оседания -15,7 мм / год, в результате анализа данных ENVISAT SAR за период 2004–2009 гг. что подтверждается данными других исследований DInSAR и подтверждается данными нивелирования.

3. Получена четкая схема деформации грунта с максимальной скоростью -79,3 мм / год на основе расширенного охвата и плотности точных измерений метода ISBAS, которая достигается без необходимости развертывания угловых отражателей и использования произвольной контрольной точки и не требует абсолютных наземных данных позиционирования, что повышает практичность мониторинга.

4. Установлено, что применение ISBAS, могут предложить более эффективные с точки зрения затрат и времени оперативные средства регионального, долгосрочного мониторинга деформации, чем

обычная наземная сенсорная сеть. Перефразируй сама в общем ключе, плиз.

5. Выявлено, что более подробные и всесторонние измерения движения грунта могут позволить лучше охарактеризовать пласт и контролировать его, а также лучше понять связанный с этим риск, представляемый оседанием грунта и реактивацией тектонического нарушения.

6. Разработана методические указания по подготовке и обработке космических данных, базированная на экспериментальных исследованиях.

Оценка полноты решения поставленных задач:

В диссертационной работе произведен всесторонний анализ отечественного и зарубежного опыта по использованию космических данных для оценки деформации подрабатываемых территорий, что позволило усовершенствовать методику комплексной подготовки и использования космических снимков в задачах оценки оседания земной поверхности в условиях эксплуатаций месторождений углеводородов.

Предложенная методика позволяет обеспечить оперативность и точность результатов оценки геодинамической ситуации на исследуемой территории, обеспечивая эффективность и безопасность освоения месторождения углеводородов.

Таким образом, поставленная задача выполнена полностью, в частности:

- 1) Выполнен анализ современных методов наблюдений за деформацией земной поверхности.
- 2) Определена деформация и анализирована динамика изменения над месторождением Тенгиз с применением классического метода дифференциальной интерферометрии SBAS.
- 3) Выполнена апробация инновационного метода ISBAS для обработки данных С диапазона при мониторинге смещений Тенгизского месторождения.
- 4) Произведена оценка точности проведенных исследований.
- 5) Разработана критерии выбора РСА данных для задач мониторинга
- 6) Совершенствована обобщенная методика вычисления мульды оседания для нефтяных месторождений с применением данных РСА.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов. Методы и последовательность выполнения работы возможно применить при выполнении аналогичных работ для других нефтяных месторождений Казахстана.

Результаты, полученные в диссертационной работе и оформленной в виде статьи в журнале с высоким импакт-фактором была применена при проведении исследований в Албании, что подтверждается цитированием.

Оценка экономической эффективности технологии. При применении предлагаемых методик мониторинга деформаций земной поверхности

повысится безопасность и экономическая эффективность разработки и на других нефтегазовых месторождениях.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области

Выполненный анализ литературных источников, разработанные рекомендации и усовершенствованные методики, представленные в этой работе, позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует современному научно-техническому уровню.

Приведенные результаты достоверны и представляют научную ценность ввиду применения инновационного метода обработки, анализа смещений земной поверхности, что подтверждено публикациями соответствующих научных трудов автора в конференциях дальнего и ближнего зарубежья, а также в журнале с импакт фактором 4.8 входящим в базу web of science.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в международных рецензируемых научных журналах

1. Stephen Grebby, Elmira Orynassarova, Andrew Sowter, David Gee, Ahmed Athab. Delineating ground deformation over the Tengiz oil field, Kazakhstan, using the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Issue 81, pp. 37-49, 2019, ELSEVIER, (ISSN 0303-2434, Web of Science, импакт-фактор **4,846**, **квартиль Q1**), <https://authors.elsevier.com/c/1Z50o14ynSIR0a>

Статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и МОН РК

2. **Орынбасарова Э.** История развития применения космических снимков для мониторинга деформаций земной поверхности. Вестник КазГАСА, ISSN 1680-080X. №2(64), 2017, с.219-224

3. **Орынбасарова Э, Кенесбаева А.** Возможности использования данных нового спутника Sentinel-1. Вестник КазГАСА, ISSN 1680-080X. №2(68), 2018, с.168-173

4. **Орынбасарова Э.** Problematic tasks of interferometric processing. Вестник КазГАСА, ISSN 1680-080X. №2(68), 2018, с.168-177.

Международные научно-практические конференции, Всемирные Конгрессы, Глобальные Форумы

5. **Орынбасарова Э.** Особенности формирования натурно-экспериментальных данных по космическим снимкам Тенгизского месторождения. Международный форум маркшейдеров «Инновационные технологии в маркшейдерии и геодезии», ISBN 978-601-228-810-0. Алматы 2015. – сс. 194-197.

6. Курманкожаев А., **Орынбасарова Э.**, Ержанкызы А. Информационная обеспеченность содержания карты в условиях сложных объектов георесурсов.

Международная конференция «Развитие науки в XXI столетии», Научно-информационный центр «Знание», ISSN 5672-2605. 2018, Харьков, с. 87-93

7. Elmira Orynassarova , Yerkin Kakimzhanov , Anzhelika Kamza, Ainur Yerzhankyzy, Eugene Levin Comparison of digital elevation models generated with open Source software from various satellite imagery. International Multidisciplinary scientific geoconference & EXPO SGEM, ISSN 1314-2704. Issue 2.3, 2018, Bulgaria 2018, pp. 73-80

8. Ainur Yerzhankyzy, Elmira Orynassarova Kamza Anzhelika, Kakimzhanov Yerkin. Efficiency of the radar images application in problems of assessing the deformation of the Earth's surface in the condition of oil&gas production. International Multidisciplinary scientific geoconference & EXPO SGEM, ISSN 1314-2704. Issue 2.3, Bulgaria, 2018, pp. 113-120

9. Anzhelika Kamza, Elmira Orynassarova Eugene Levin , Irina Kuznetsova , Ainur Yerzhankyzy. Investigation of changes in dem, constructed from time to time data from the seabed. International Multidisciplinary scientific geoconference & EXPO SGEM, ISSN 1314-2704. Issue 2.3, 2018, Bulgaria 2018, pp. 449-454

10. Орынбасарова Э., Эндрю Соутер. Особенности обработки и применения радарных снимков Sentinel-1 при деформационном мониторинге земной поверхности на примере нефтяного месторождения Западного Казахстана. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. ISSN 2618-981X. 2018 г., Новосибирск : Пленарное заседание : сб. материалов. – Новосибирск : СГГиТ, 2018. – сс. 69-74

11. Шульц Р., Левин Е., Ержанкызы А., Орынбасарова Э.О. Использование данных аэрофотосъемки для наземного лазерного сканирования. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. ISSN 2618-981X, 2018 г., Новосибирск : Пленарное заседание : сб. материалов. – Новосибирск : СГГиТ, 2018. – сс. 69-74

12. Курманкожаев А., Орынбасарова Э., Ержанкызы А. Цифровая модель в задачах развития современной картографии. Scientific discussion, ISSN 3041-4245. Vol 1, No 22, Prague, 2018, pp.36-40