

Казахский национальный исследовательский технический университет им.  
К.И.Сатпаева

УДК 528.87

На правах рукописи

## **ОРЫНБАСАРОВА ЭЛЬМИРА ОРЫНБАСАРОВНА**

Совершенствование методики комплексной подготовки и использования космических снимков в задачах оценки оседания промышленной поверхности в условиях эксплуатаций Тенгизского месторождения

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научный консультант  
академик НАН РК,  
доктор технических наук  
профессор  
Курманкожаев А.А.

Зарубежный консультант,  
Доктор, профессор  
Эндрю Соутер (Англия)

**Алматы, 2019**

## Содержание

СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	12
1.1 Характеристика месторождения нефти и газа Тенгиз	12
1.2. Мировой опыт применения радарных данных для оценки деформации нефтяных месторождений	17
1.3. Отечественный опыт применения радарных данных для оценки деформации земной поверхности	27
1.4. Выводы	32
2. МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕГИОНАХ С ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ	33
2.1. Основы радиолокационной интерферометрии	33
2.2. Метод устойчивых отражателей и малых базовых линий (SBAS)	38
2.3. Проблемные задачи методики интерферометрического анализа и факторы влияющие на получение качественной интерферограммы	43
2.4. Выводы	50
3. ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ISBAS ПРИ ОЦЕНКЕ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТЕНГИЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	51
3.1. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности на территории Тенгизского месторождения с применением космических снимков С-диапазона КА ENVISAT	51
3.1.1. Радарные данные ENVISAT	52
3.1.2. Обработка радарных данных ENVISAT с применением алгоритма SBAS и инновационного метода ISBAS	54
3.2. МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТЕНГИЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ISBAS И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С-ДИАПАЗОНА КА SENTINEL	60
3.2.1. Обработка радарных данных Sentinel-1 с применением алгоритма SBAS	63
3.3. Результаты обработки и оценка точности	65
3.4. Сравнение результатов с наземными инструментальными наблюдениями и данными сейсмологии	71
3.5. Выводы	75
4. Совершенствование методики комплексной подготовки и использования радарных данных для мониторинга смещений земной поверхности в условиях эксплуатаций Тенгизского месторождения	76
4.1. Разработка критерии оценки и выбора космических снимков	76

4.2.Рекомендации для обработки радарных данных.	84
4.3. Перспективы мониторинга деформации	89
4.4. Выводы	91
Заключение	92
Литература	95

## СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

РСА	Радиолокационная синтезированная аппертура
ТШО	Тенгизшевройл
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
DInSAR	Дифференциальная радиолокационная интерферометрия
SBAS	Метод малых базовых линий
ISBAS	метод прерывистой малой базовой линии
НДС	Напряженно-деформированное состояние;
СДЗП	Современные движения земной поверхности;
GNSS	Глобальные Навигационные Спутниковые Системы
ДЗЗ	Дистанционное зондирование земли
КА	Космический аппарат
СУГ	сжиженного углеводородного газа
ПУУД	Проект управления устьевым давлением
ПБР	Проект будущего расширения
ГЕОДИНАМИКА	Наука о природе глубинных сил и процессов, возникающих в результате планетарной эволюции Земли, планеты и обуславливающих движение вещества и движение энергии внутри Земли.
МОНИТОРИНГ	Непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта, в сравнении с заданными критериями

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты.

1. ГОСТ 7.1-2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления

2. ГОСТ 7.9 - 95 (ИСО 214—76) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования  
ГОСТ 7.12-93 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила

3. ГОСТ 7.54-88 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах. Общие требования

4. ГОСТ 8.417-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин

## ВВЕДЕНИЕ

**Оценка современного состояния решаемой научной и научно-технической проблемы:** Казахстан известен большим количеством месторождений полезных ископаемых, в числе которых, углеводородные месторождения западных и южных регионов страны. Хотя добыча данного вида сырья является выгодной с экономической точки зрения, но в экологическом плане, имеет ряд негативных последствий, к одной из которых относится смещение земной поверхности.

Добыча нефти и газа изменяет геодинамическое состояние окружающей среды путем изменения подземного порового давления и напряжений, в результате чего пласты уплотняются, а поверхность деформируется [1]. Деформация нефтяных и газовых месторождений может иметь неблагоприятные последствия для окружающей среды, инфраструктуры, местного населения и экономики через оседание грунта [2], вызывающую сейсмичность [3] и разрушение скважин [4]. Поэтому систематический мониторинг имеет решающее значение для своевременного предупреждения потенциальных угроз и принятия мер по предотвращению опасных геодинамических последствий.

Для глубокого изучения и анализа данной техногенной проблемы, в Казахстане построены ряд геодинамических полигонов, и ведутся многолетние комплексные наблюдения. В частности, на территориях нефтяных и газовых месторождениях в Каспийском регионе, с целью оценки деформационных и сейсмических опасностей [5]. При этом, комплексные наблюдения включают в себя несколько традиционных наземных методов: гравиметрические исследования для мониторинга уплотнения пласта; GNSS и точные нивелирные съемки для картографирования деформации грунта; и сейсмологические исследования для мониторинга частоты и распространения естественной и антропогенно-индуцированной сейсмичности. Мониторинг осуществляется путем развертывания сенсорной сети по всему полю и повторных измерений в выбранных местах [6].

В космическом радарном мониторинге существуют многочисленные алгоритмы DInSAR для поддержки наблюдения перемещения грунта, и их можно в целом сгруппировать в две основные категории [7]: Persistent Scatterers [8]; и когерентные рассеиватели, наиболее распространенным из которых является метод малого базового подмножества (SBAS) (например, [9]. Интерферометрия постоянных рассеивателей (PSI) измеряет смещение точечных целей, характеристики рассеяния которых, остаются постоянными в последовательности радиолокационных наблюдений, тогда как SBAS фокусируется на измерении смещения области земли, содержащей распределение когерентных рассеивателей. Подход PSI наиболее эффективен для мониторинга локализованной деформации, связанной с точечными структурами, тогда как SBAS считается более подходящим для регионального

мониторинга деформации в не городских районах [10]. Однако, как и PSI, SBAS наиболее эффективен на участках, демонстрирующих высокую отражательную способность и когерентность на всех радиолокационных изображениях, что характерно для городских и каменистых районов [11]. Для более динамичных неместных (то есть растительных) типов растительного покрова SBAS обычно обеспечивает лишь разреженный охват и не дает подробного представления о региональных процессах деформации грунта [12].

**Обоснование и исходные данные для разработки темы:** Основанием для разработки темы диссертационной работы является геодинимический мониторинг земной поверхности, проводимый на территории Тенгизского месторождения, с применением РСА данных.

В качестве исходных данных для разработки темы исследований выбраны: радарные данные Envisat Asar, предоставленные Европейским Космическим Агентством, данные РСА Sentinel-1 свободного доступа, данные нивелирования заданной территории, геологические данные, данные про локацию скважин.

**Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы:**

Для эффективной и безопасной разработки нефтегазовых месторождений необходимо исследовать воздействие природных и техногенных факторов на развитие деформационных процессов, что позволит оценить возможности регулирования их влияния на породный массив, земную поверхность и инженерные сооружения. Таким образом, одной из актуальных проблем при интенсивном ведении добычи полезных ископаемых, особенно в сейсмоактивных регионах, является изучение техногенных движений земной поверхности.

В зависимости от размера месторождения, геологии и объемов добычи, деформация грунта может распространяться на большие территории и выходить за пределы самого месторождения. Соответственно, над таким гигантским нефтяным месторождением как Тенгизское, региональный мониторинг деформации является объективной необходимостью. Однако традиционные наземные методы нецелесообразны и дорогостоящи для обеспечения такого охвата с достаточной детализацией. Потенциально экономически эффективным по времени и региональному решению для мониторинга деформации грунта является спутниковый дифференциальный интерферометрический радар с синтезированной апертурой (DInSAR). Этот метод определяет субсантиметровые скорости смещения грунта на больших площадях путем вычисления разностей фаз между изображениями SAR, полученными в двух разных временных точках. В связи с этим совершенствование данной методики с целью улучшения качества получаемых карт смещений земной поверхности, открывает новые возможности обработки радарных данных.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, патентных исследованиях и выводы из них определяются полнотой**

проведенного обзора патентного поиска по проблеме методик обработки радарных данных.

В диссертационной работе приведены результаты научного анализа современного состояния научно-технической проблемы и исследований, методов обработки данных радиолокационной синтезированной апертуры. Выявлено, что существующие универсальные методики не включают в себя четких критериев при выборе радарных данных, и нет алгоритма обработки данных Sentinel-1.

#### **Сведения о метрологическом 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 геодезического метода мониторинга-данные нивелирования.

**Актуальность темы.** Использование космических данных для оценки оседания промышленной поверхности, позволяет не только увидеть сегодняшнюю геодезическую 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 необходимости планирования наземных наблюдений, но позволяет их более точно локализовать и выполнять более разреженно во времени и в пространстве.

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.

Согласно указу 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”, компаниям нефтегазовой сферы



обязательно проведение мониторинга за состоянием массива подрабатываемых объектов.

Тенгизское нефтяное месторождение с его динамичным полусухим 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.

**Научная новизна темы.** В работе получены следующие новые научные результаты:

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

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

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

#### **Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами**

Мониторинг деформаций с применением метода ISBAS была выполнена в компании Geomatic Ventures и в Ноттингемском Университете, Англия под руководством Эндрю Соутер, разработчика метода ISBAS и основателя данной компании. Космические снимки ENVISAT ASAR были предоставлены на основе заявки для проведения исследовательской работы Европейским Космическим Агентством.

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

**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.

#### **Задачи исследования**

1) Выполнить анализ современных методов наблюдений за деформацией земной поверхности

2) Определить деформацию и анализировать динамику изменения над месторождением Тенгиз с применением классического метода дифференциальной интерферометрии SBAS.

3) Выполнить апробацию инновационного метода ISBAS для обработки данных С диапазона при мониторинге смещений Тенгизского месторождения.

4) Произвести оценку точности проведенных исследований.

5) Разработать критерии выбора PCA данных для задач мониторинга

6) 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 ENVISAT ASAR на данную территорию с помощью программного обеспечения EOLISA;

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

- Обработка радарных данных ENVISAT ASAR и Sentinel-1 в программном обеспечении Punnet 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.

в) Устранение топографической ошибки с помощью ЦМР SRTM

- Визуализация и классификация результатов в программном комплексе ArcGIS.

- Анализ динамики изменений земной поверхности.

- Оценка точности проведенных измерений.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Критерии оценки и выбора космических снимков, позволяющие получить качественные радарные данные для дальнейшей обработки.

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

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

**Практическая значимость диссертации** состоит во внедрении в учебный процесс во время прохождения дисциплины, таких как Дистанционное Зондирование Земли. Также, разработанная методика подготовки и обработки космических снимков может быть применена нефтегазовым месторождением Тенгиз и научно-исследовательскими организациями для выполнения деформационного мониторинга с применением данных Sentinel-1 и ENVISAT ASAR.

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

**Публикации и апробация работы.** 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; 8 статей в сборниках международных конференций, форумов и конгрессах.

**Структура и объем диссертации:** диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 86 наименований и приложений. Работа изложена на 103 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 9 таблиц.

# 1. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## 1.1 Характеристика месторождения нефти и газа Тенгиз

Тенгизское нефтяное месторождение расположено примерно в 150 км к юго-востоку от города Атырау в западной части Республики Казахстан и протяженностью более 400 км<sup>2</sup> (Рисунок 1). Это одно из крупнейших месторождений мирового класса в Прикаспийском бассейне и представляет собой изолированный карбонат на атолле, образованный путем образования мелководных осадочных последовательностей. По оценкам, водохранилище содержит до 25 миллиардов баррелей нефти (из которых извлекается 6-9 миллиардов баррелей) и находится на глубине 3885-5117 м, что делает Тенгиз самым глубоким супергигантским хранилищем в мире. Область исследования данной работы составляет около 1700 км<sup>2</sup> и охватывает Тенгизское нефтяное месторождение и непосредственное окружение.

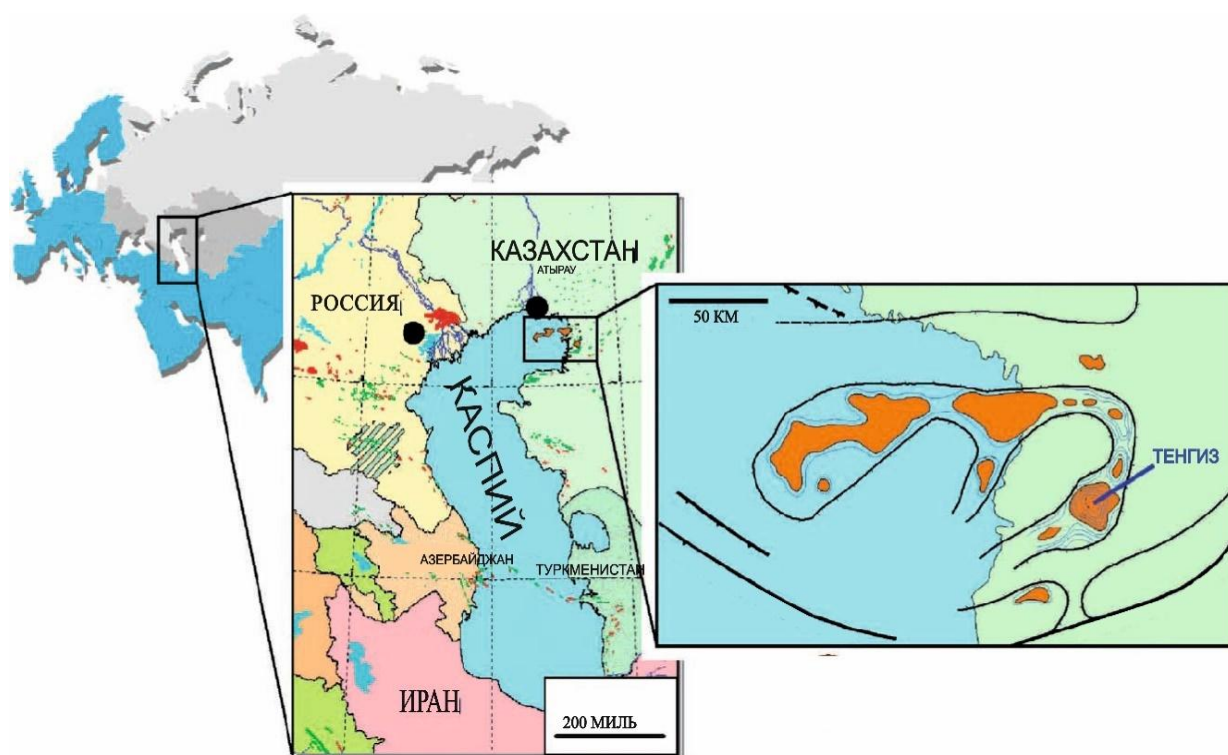


Рисунок 1 - Расположение области исследования

В апреле 1993 года Казахстан (в лице государственной компании Казахойл, ныне Казмунайгаз) и американская компания Chevron создали совместное предприятие Tengizchevroil (ТШО). Правительство Казахстана предоставило ТШО эксклюзивное 40-летнее право на разработку Тенгизского и Королевского месторождений углеводородов[17].

В лицензионный участок проекта входит внушительное по размерам Тенгизское месторождение и поменьше размером, но обладающее большими запасами месторождение «Королевское». Участниками ТШО являются компании АОНК «КазМунайГаз» (20%), «Шеврон» (50%), «ЭксонМобилКазахстан» (25%), СП «ЛукАрко» (5%). К числу основных видов деятельности ТШО относится геологоразведка, добыча и реализация углеводородного сырья. Нефтяная продукция ТШО является очень «легкой» и пользуется высоким спросом на мировом рынке, благодаря своему высокому качеству [18].

ТШО начало производство сухого газа с 2000 года для собственных нужд и для продажи и объем добычи составляет 5.8 млрд м<sup>3</sup> на 2019 год.

Помимо сухого газа, сырой нефти в Тенгизском месторождении также идет производство сжиженного углеводородного газа (СУГ). До 2000 года ТШО сжигал большую часть попутного газа из-за осложнений с примесями (такими как сера). В 2000–2001 годах консорциум модернизировал существующие производственные мощности с целью производства больших объемов нефти, а также высококачественного сухого газа и СНГ. В результате ТШО увеличил добычу нефти на 30%, при этом добывая около 2500 тонн сжиженного нефтяного газа в день и 2,5 млрд кубометров газа в год. К 2006 году валовая добыча газа ТШО достигла почти 7 миллиардов кубометров, половина из которых была продана в качестве продажного газа.

В процессе очистки сырой нефти от сероводорода производится сопутствующий продукт – элементарная сера. За годы эксплуатации и производства ТШО выработало достаточно большое количество серы, которое хранилось в виде монолитных твердых блоков на серных картах [19]. Тенгизшевройл элементарную серу получают путем применения модифицированного процесса Клауса, то есть процесса окисления сероводорода с получением серы на установке У-400, которая протекает в две последовательные стадии - термическую и каталитическую [20].

В зависимости от вида обработки, элементарные серы разделяются на множество подгрупп, а в месторождении Тенгиз производятся следующие виды серы:

- чешуйчатая;
- жидкая;
- гранулированная.

Компания ТШО относится к активно развивающимся компаниям, которые совершенствуют технологии для увеличения производительности производства.

Например, в 2000 году ТШО на заводе комплексных технологических линий (рис.2) завершил Проект Нитки 5, а в 2001 г. - проект Программы 12. Эти объекты позволили увеличить добычу нефти до 13 млн. тонн в год [19]. В 2008 году ТШО завершил проект Закачки сырого газа и Завод второго поколения (ЗСГ/ЗВП), за счет чего добыча нефти приблизилась к 75 тоннам в

сутки, производство природного газа— 22 млн куб. м в сутки. Завод второго поколения—крупнейшая в мире единая комплексно-технологическая линия, где нефть стабилизируется и из нее удаляются все серосодержащие компоненты [21].



Рисунок 2 - Тенгизское месторождение и завод первого поколения

На сегодняшний день, идет строительство завода третьего поколения, в котором в отличие от завода второго поколения применяются модульный тип строительства, в котором объекты привозятся на строительную площадку в готовом виде и площадь завода третьего поколения увеличена на 30% чем площадь завода второго поколения. Также, третий завод не предполагает производство серы, за счет обратного закачивания газа. Обратное закачивание газа, также способствует поддержанию пластового давления. Завод третьего поколения рассчитан на работу в течение 30 лет. Предполагается, что в конце 2022 —в 2023 году он будет полностью запущен.

**История производства.** Тенгизское нефтяное месторождение было открыто в ноябре 1979 года Министерством нефтяной промышленности Советского Союза обнаружением скважины глубина которого достигло 4095 м [22]. К числу первооткрывателей месторождения Тенгиз относятся Жолдаскали Досмухамбетов, Булекбай Сагингалиев, Булат Еламанов, Асабай Хисметов, Кумар Балжанов, Валентин Авров, Махаш Балгимбаев, Орынгазы Исказиев[23]. Все названные лица были награждены Государственной премией Республики Казахстан. После обширных исследований, проведенных в период с 1976 года по начало 1980-х годов, в 1985 году было создано производственное объединение «Тенгизнефтегаз» с целью разработки месторождения. Строительство Тенгизского завода по переработке нефтегазового комплекса началось в начале 1986 года и было введено в действие 6 апреля 1991 года, что ознаменовало начало коммерческой производственной деятельности на площадке. С 1993 года Тенгизшевройл, совместное предприятие между Республикой Казахстан и корпорацией Chevron, отвечает за разведку и разработку Тенгизского нефтяного месторождения. Значительная модернизация

перерабатывающего комплекса в 1997 году увеличила годовую добычу нефти до 7 миллионов тонн, а несколько параллельных проектов способствовали дальнейшему увеличению производственных мощностей до 12 миллионов тонн к 2001 году.

К концу 2005 года общее количество скважин, пробуренных в Тенгизском водохранилище, превышало 115 [24]. В 2008 году был завершен проект по расширению завода по закачке кислого газа / второго поколения, что почти удвоило производственные мощности в течение трехлетнего периода (Рисунок 3).

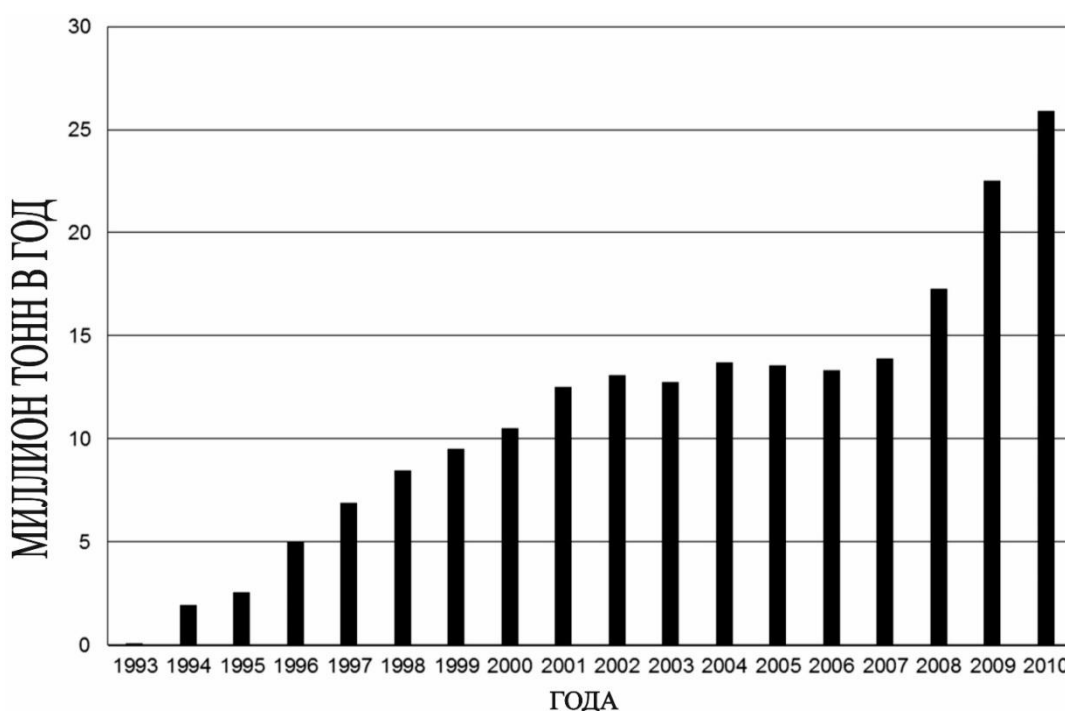


Рисунок 3 - Темпы добычи нефти на месторождении Тенгиз в течение 1993–2010 гг.

**Геология Тенгизского месторождения.** На месторождении Тенгиз добывается нефть из залежей изолированного карбоната в юго-восточном Прикаспийском бассейне, который относится к девонскому и каменноугольному периоду. Крутые склоны образовались в результате агрегации череды платформ позднего фаменского периода до раннего башкирского (Рисунок 4. Модифицировано после Collins et al. [24]) с последующей серпуховской проградацией и укрытием в толстом слое кунгурских солей [24]. Исторически поле разделено на три области, которые были разграничены в соответствии со структурным рельефом по всему полю: платформа, бортовая (рим) и склон [25]. Структура Тенгиз по кровле продуктивной толщи (кровля башкирских отложений) представляет собой высокоамплитудную изометричную структуру размерами 22x23 км и амплитудой до 1100 м. Свод поднятия плоский, крылья структуры крутые, углы

наклона достигают 20-25°. Вблизи начала крутого склона северо-западную, северную и северо-восточную части осложняет цепочка локальных поднятий амплитудой 100-200 м, образующая «рим». 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 [22]. Относительно мало скважин было пробурено в преимущественно микробном пограничном камне и брекчии, которые составляют боковые области.

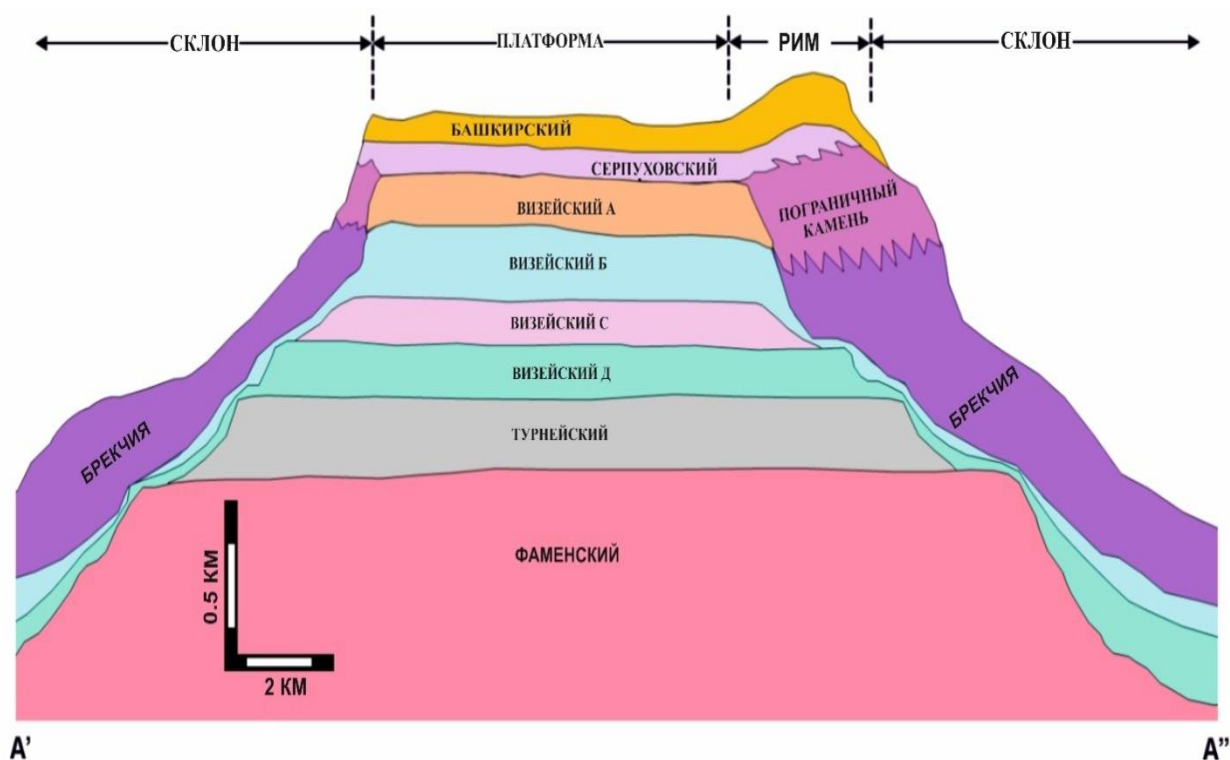


Рисунок 4 - Геологический разрез юго-запад-северо-восток через нефтяное месторождение Тенгиз

Карбонатный массив, представляющий собой единую гидродинамическую систему, подразделён на 3 стратиграфических объекта:

- объект I включает башкирские, серпуховские и окские отложения;
- объект II включает нижневизейско-турнейский комплекс пород;
- объект III включает девонские отложения.

По содержанию кальцита (79-100%) породы относятся к известнякам. На Тенгизе характерна частая и неравномерная по площади смена условий седиментации, однако, это не повлияло на унаследованный характер развития структуры от верхнего девона до соленосных отложений кунгурского яруса верхней перми.



Климат в регионе полузасушливый, с температурой до 40 °С летом и -30 °С зимой и среднегодовым уровнем осадков 100–200 мм [26], который в основном выпадает весной и осенью. По данным климатического районирования СНиП 2.01.07–85 «Инженерные изыскания для строительства» территория относится: по весу снегового покрова – к 3-ей зоне; по средней скорости ветра в зимний период – к 5-ой зоне; по давлению ветра – к 4-ой зоне; по толщине стенки гололеда – к 4-ой зоне. Нормативная глубина сезонного промерзания грунтов на территории согласно СНиП РК 5.01–01–2002 «Основания зданий и сооружений» равна 1,3м, максимальная глубина сезонного промерзания грунтов – 1,45м.

Местность в пределах исследуемого района обычно характеризуется низким топографическим рельефом, хотя ландшафт сильно изрезан и расчленен впадинами и каналами, которые сезонно накапливают воду в результате таяния снега и сильных осадков. Впоследствии вода испаряется, образуя грязевые болота и солончаки, создавая ландшафт, в котором преобладают поверхностные покрытия солончаковых (засоленных) почв и тонкий гуминовый горизонт.

Растительность в этом районе типична для полузасушливого климата, состоящего в основном из вездесущих кустарников и кустарников высотой до 0,5 м и различной степени плотности. Распространенные типы растительности, обнаруженные в развитых районах нефтяного месторождения, включают

В целом, по сложности геологического строения, тектоническим и морфологическим признакам Тенгизское месторождение относится ко 2-ой подгруппе 2-ой группы под названием «Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых»[27].

## **1.2. Мировой опыт применения радарных данных для оценки деформации нефтяных месторождений**

С развитием космических технологий, применение данных полученных с космоса в области наук о Земле стало началом развития дистанционного зондирования Земли. Космические снимки открыли новые перспективы для мониторинга изменения происходящих на поверхности земли. В результате процесс создания карт земельных и водных ресурсов, мониторинга окружающей среды, в том числе геодинамических процессов, техногенного характера значительно упростился[28].

Существует два основных способа дистанционного получения информации о поверхности Земли: оптические системы, использующие солнечный свет (пассивные системы) и радарные системы с собственным источником излучения (активные системы). Радиолокационная съёмка (РЛС) является одним из наиболее перспективных способов получения данных дистанционного зондирования. Это связано с такими ее особенностями, как удобное и быстрое получение данных с помощью спутников, а так же с помощью быстрой и качественной обработки данных.

Первое применение радарных данных в практических целях было выполнено в 1986-1989 гг. зарубежными учеными Зебкером Х.А. и Голдстейном Р.М., но идея измерения сдвига фазы в сигналах ДЗЗ данных принадлежит исследователю из США Ричману Д.

Начиная с 90-х годов ведущими учеными в области дифференциальной интерферометрии были ученые Франции Массонет Д. и Фейгл К. В своих опубликованных работах они оценивали возможности РСА данных в задачах мониторинга деформаций земной поверхности после землетрясения [29]. На протяжении 90х годов Массонет оставался одним из главных ученых, который внес существенный вклад в развитие методов обработки данных космической радарной интерферометрии. Исследования по прикладному применению дифференциальной интерферометрии для оценки деформационных процессов были инициированы А.К. Гэбриэлом. Кроме того, исследования по влиянию атмосферы на качество результатов радарной интерферометрии активно проводились Зебкером Х.А. [30]. Кроме публикаций в журналах, в 2001 году вышла книга Ханссена Р. «Radar Interferometry», которая является результатом пяти с половиной лет исследований, посвященных изучению радиолокационной интерферометрии, относительно новой в то время космической геодезической техники для определения рельефа Земли и ее деформации [31].

Кроме того, активно велись разработки и совершенствования программных обеспечений для обработки данных радарной интерферометрии в различных задачах. Среди разработчиков-ученых можно выделить швейцарских специалистов Вернер Ч. и Вегмюллер У.

В настоящее время во многих странах мира идет активное применение радарных данных в целях мониторинга, но в странах таких как Италия, Англия, Нидерланды, США, Германия, Япония, Швейцария идет прогрессивное развитие и модификация методики анализа и интерпретации радарных данных. Разработки в области радарной интерферометрии в США происходят в рамках научных работ Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), а в странах Евросоюза – ЕКА [30]. В качестве известного примера активного пользования радарными данными можно привести результаты исследовательской работы выполненных до и после известного землетрясения произошедшего 2003 году в иранском городе Бам. В результате обработки радарных данных было возможно оценить серьезные изменения земной поверхности в прилегающих к городу территориях и разрушения в жилых районах.

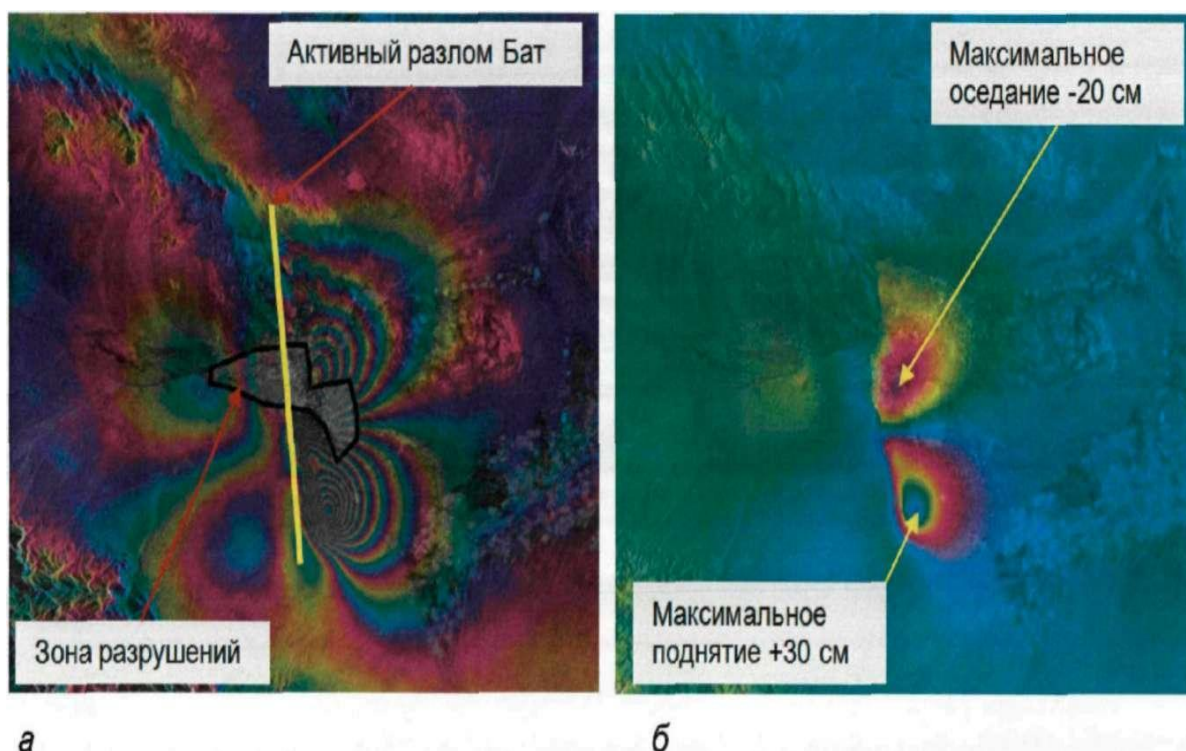


Рисунок 5 - Результаты дифференциальной интерферометрической обработки радарных данных; а - дифференциальная интерферограмма; б карта вертикальных смещений

Однако массовое применение радарных данных последние 4 года стало возможным с появлением радарных данных Sentinel-1, которые находятся в открытом доступе. В статье автора данной диссертационной работы под названием «Возможности использования данных Нового спутника sentinel-1» [32] приведены примеры применения радарных данных Sentinel-1 в разных отраслях жизни (Таблица 1):

Таблица 1 – Применение данных Sentinel-1

Применение	Режим			
	SM	IW	EW	W V
Арктика и морской лед		X	X	
Открытое наблюдение за судами океана		X	X	

Продолжение таблицы 1

Мониторинг загрязнения нефти		X	X	
Морские ветры		X	X	X
Лесоводство		X		
Агрокультура		X		
Картирование городской деформации		X		
Мониторинг наводнений	X	X		
Анализ землетрясений	X	X		
Мониторинг оползней и вулканов	X	X		

Важным спектрами применения данных Sentinel-1 в сельскохозяйственной отрасли являются мониторинг условий посева, свойств почв и картографической обработки почвы, помощи в оценке землепользования, прогнозирования урожая, мониторинга сезонных изменений и содействия в реализации политики устойчивого развития. Эти данные также могут быть полезны для мониторинга изменений сельскохозяйственного производства и продуктивности пастбищ, вызванных засухой, и мониторинга снижения продуктивности земель. Сельскохозяйственные карты позволяют обеспечить независимую и объективную оценку масштабов культивирования в данной стране или вегетационном сезоне, и это свойство может быть использовано для поддержки усилий по обеспечению продовольственной безопасности в уязвимых районах [33]. Приведен пример использования данных Sentinel-1 и Sentinel-2 для мониторинга расширения плантации каучука официальными представителями ЕКА (Рисунок 6). Кроме официальных представителей ЕКА, в странах СНГ Компания ТОО «Совзонд» активно применяет данные спутника Sentinel-1 для задач сельскохозяйственного производства.

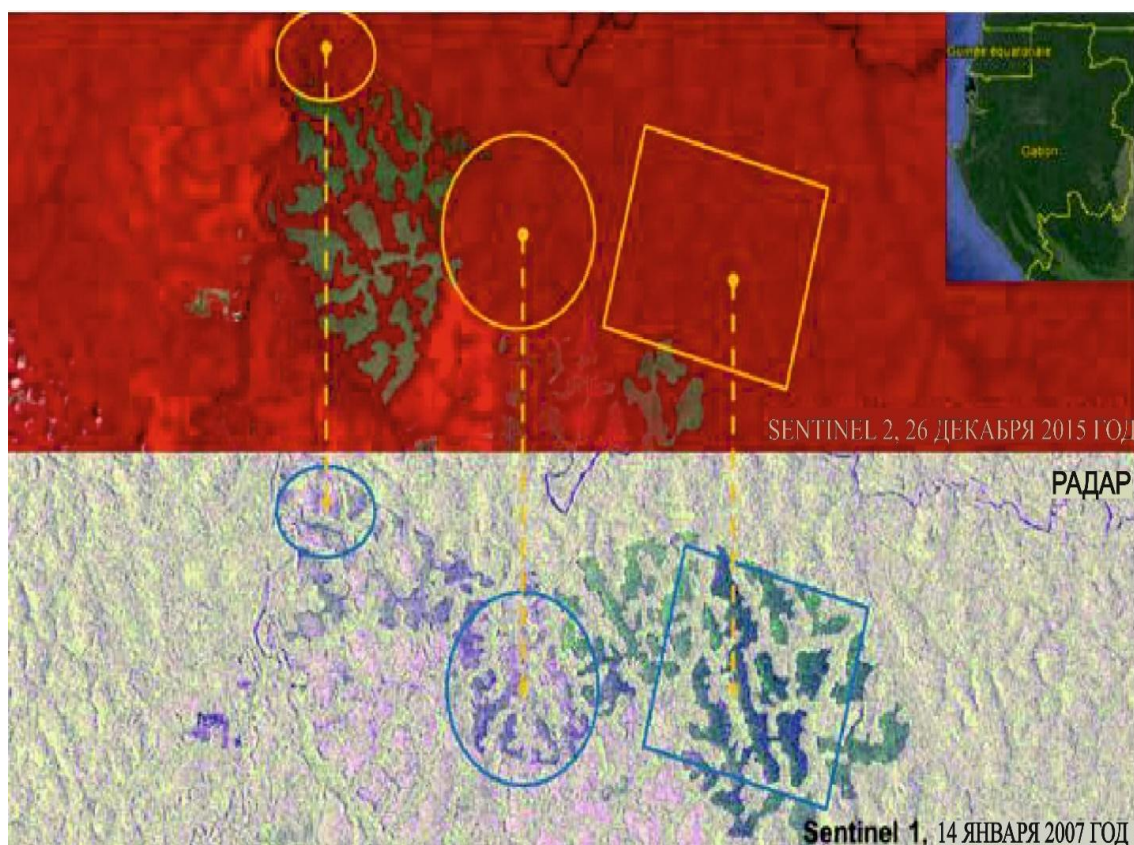


Рисунок 6 - Мониторинг расширения плантации каучука

Исследователи ТОО «Совзонд» установили пригодность радарных снимков Sentinel-1 для регулярного космического мониторинга сельскохозяйственного производства, для дешифрирования основных группы сельскохозяйственных культур и при разработке алгоритмов автоматизированного классифицирования отдельных типов сельскохозяйственных культур.

Радарные данные также успешно применяются в области предоставления данных о классификации льда и айсберга национальным береговым охранникам, флотам и судоходным компаниям, для обеспечения безопасной круглогодичной навигации в ледяных арктических и субарктических зонах; информацию о концентрации льда, степени, типе, толщине и скорости дрейфа, местоположении, размера айсбергов. Данные двойной поляризации Sentinel-1 могут значительно улучшить классификацию и дискриминацию льда[33].

Также доступность снимков Sentinel-1 дает возможность применять данные в учебных-исследовательских целях. На рисунке 7 приведен результат обработки данных для мониторинга льда[34]. Исследование было проведено в качестве магистерской работы студента Университета Исландии Мелиссы Ариэль Петерсон под названием «Оценка изображений Sentinel-1 для морского льда. Мониторинг в проливе Дании». В результате проведенных исследований исследователь отметил, что Sentinel-1 предлагает высокое разрешение, доступность с открытым доступом, частый пересмотр, полярные и субполярные

изображения, что делает его отличным выбором для использования в мониторинге льда. И также отмечает трудности во время обработки, в частности, что требуется больше работы, чтобы определить, как наилучшим образом моделировать и как автоматизировать классификацию радиолокационных изображений.

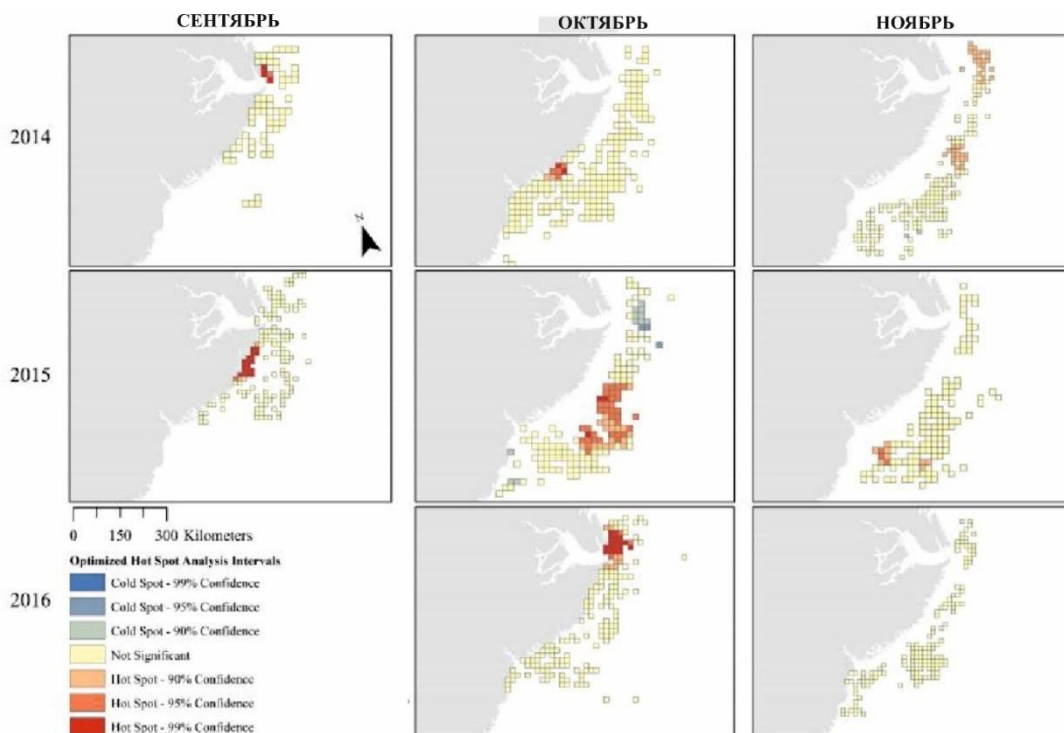


Рисунок 7 - Пример применения для мониторинга льда: ежемесячное сравнение основных точек нового морского льда

Кроме вышеперечисленных моментов, данные Sentinel-1 применяются в классификаций типа леса, оценке биомассы или частичном обнаружений нарушений. Для мониторинга изменения климата, картирование лесных пожарных шрамов может быть важной частью сопоставления истории углерода в лесу и играет критически важную роль в оценке выбросов углерода. Карты земного покрова могут использоваться для поддержки управления лесами и мониторинга незаконного заготовки древесины во всем мире.

РСА чувствительна к пространственно меняющимся формам шероховатости поверхности, вызванным ветрами на поверхности океана. Морские продукты Sentinel-1 в сочетании с глобальными моделями океанских волн помогают определить направление, длину волны и высоты волн на открытых океанах и помочь в прогнозировании погоды, судовых транспортных и волновых энергетических применениях. Оценки ветрового поля также играют важную роль в мониторинге разливов нефти, чтобы помочь выявить похожие факты из реальных разливов.

На рисунке 8 приведена скорость ветра, полученная из данных Sentinel-1 над Typhoon Megi, обработанная как часть проекта ESA(EKA) / SEOM 4 Science / Ocean Study # EO4Society учеными из EKA[33].

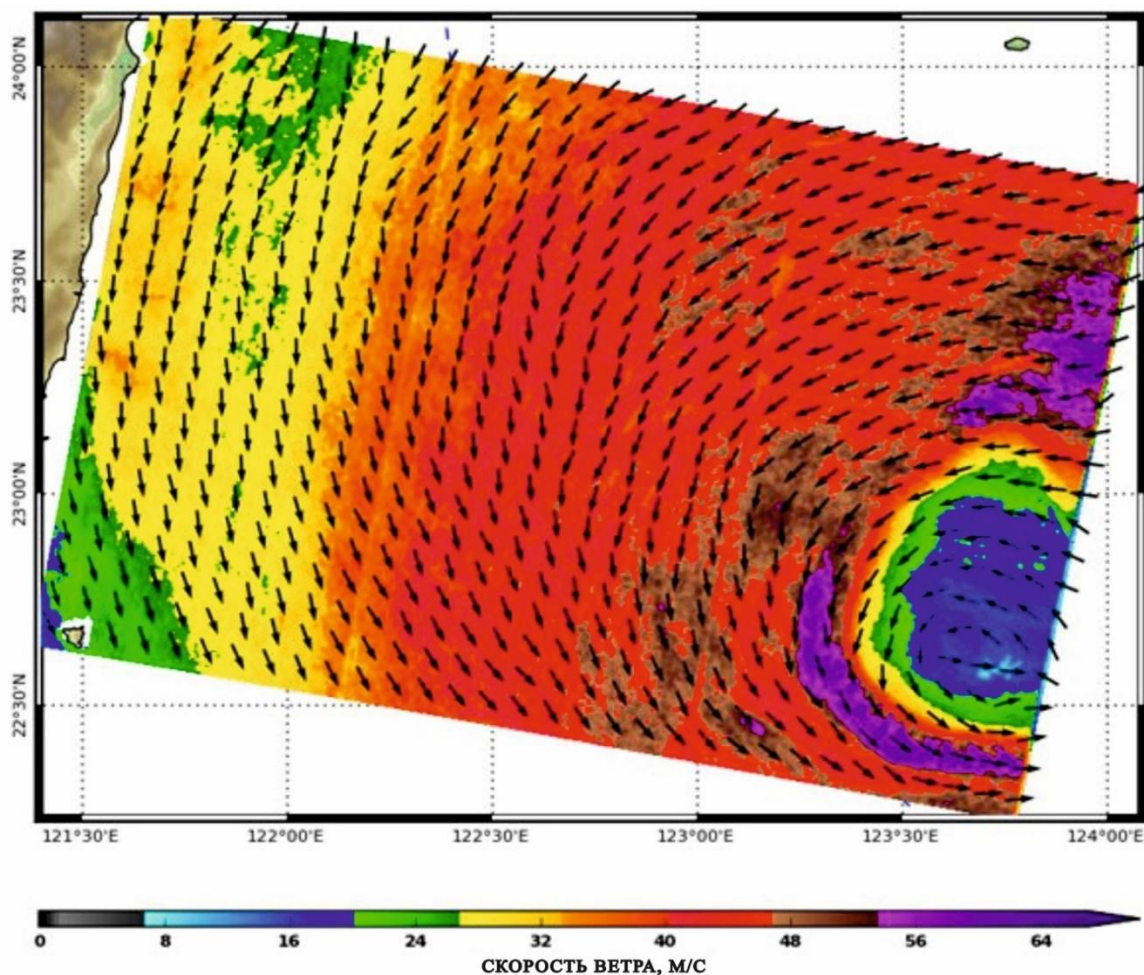


Рисунок 8 - Скорость ветра

В нефтегазовой сфере Дифференциальный интерферометрический спутниковый радар с синтезированной апертурой (DInSAR) зарекомендовал себя как бесценный инструмент для мониторинга движения поверхности земли, способный мониторить большие площади при низких затратах и в пространственных масштабах, недостижимых при традиционных метода измерения (GPS-съемки, наклонные инклинометры, измерители наклона, акселерометры, тензодатчики и термисторы). DInSAR в состоянии предоставить качественные данные в области разведки, оценки и добычи полезных ископаемых. Во время разведки, амплитуда PCA данных способствует обнаружению морской нефти. Например, просачивание нефти служит индикатором наличия углеводородов[35]. Инструменты *Sentinel-1* предназначенные для обнаружения нефти используются в качестве подтверждения незаконных сбросов, а также анализа распространения разливов

нефти и разведки запасов УВС путем выделения естественного просачивания. На изображениях SAR нефтяные пятна отчетливо читаются в виде темных следов. Причиной появления большинства таких пятен является затопление судов. Определение источников разлива нефти для привлечения к судебной ответственности правонарушителей могут быть скоррелированы при помощи автоматической идентификационной системы (AIS) или широкополосной передачи данных (LRIT) с судов. Данные, относящиеся к мониторингу разливов нефти (Рисунок 9), передаются спутником в режиме реального времени для приема местными наземными станциями, поддерживаемыми европейскими и национальными службами.

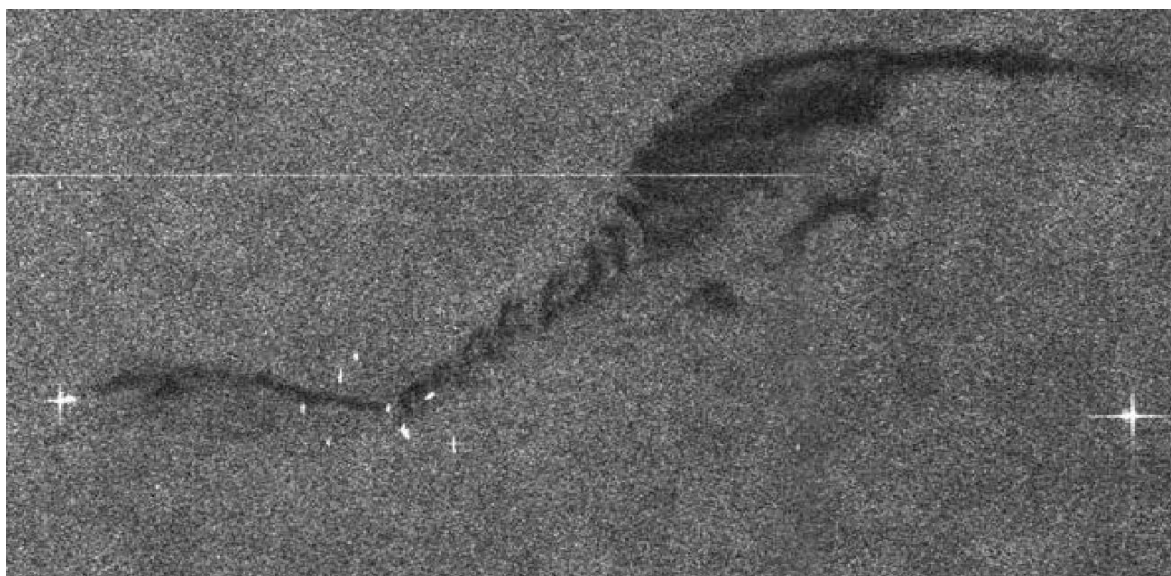


Рисунок 9 - Разливы нефти, наблюдавшиеся у бельгийского побережья вблизи Зебрюгге 10/10/2015 после столкновения между двумя судами

Аналогичным образом, обнаружение естественного просачивания нефти со дна океана может дать ключ к поиску нефти.

В процессе оценки, выявление движения поверхности земли в нефтедобывающих площадках может снизить риск потенциальной реактивации зоны разлома или обнаружить возможный отказ скважины на ранней стадии. Во время производства, DInSAR измерения можно применить для определения равномерного распределения уровня давления впрыска и оценки стабильности при хранении, так как миллиметровое поднятие поверхности может быть одним из индикаторов потенциальной утечки при хранении. DInSAR может способствовать повышению эффективности при производстве углеводородов. Наконец, радиолокационный мониторинг наземного движения может потенциально использоваться для предупреждения о потенциальных рисках для трубопроводов и терминалов сжиженного природного газа в районах, подверженных оползням или оседаниям. Поэтому, сегодня можно найти очень много примеров применения РСА для цели



мониторинга. Первая демонстрация этой возможности была применена в Алжире, с которого началась добыча газа в 2004 году [36]. Произведенный природный газ с отдельных месторождений в Салахе был не чистым метаном. В нем до 10% присутствовал углекислый газ, который должен был быть ликвидирован до продажи газа. Компания British Petroleum и ее партнеры решили проводить обратную закачку сепарированного газа CO<sub>2</sub> вместо выброса парникового газа в атмосферу, накапливая газ под землей в тех же пластах, откуда добывается природный газ, на безопасном расстоянии от участков добычи газа. По мере увеличения объемов закачки CO<sub>2</sub>, типичные образцы вспученной почвы были обнаружены при помощи радиолокационной интерферометрии. Радарные данные предоставили уникальную и критическую информацию для создания 4D модели коллектора (пространственной и временной), который был невидим для обычных сейсмических исследований предпринятые в то же время.

Учеными из Англии Дэвидом Ги, Эндрю Соутером и т.д. были проведены также ряд исследований для мониторинга деформаций земной поверхности над нефтегазовым и горнодобывающим месторождением, в результате были выявлены деформации над данными месторождениями, а полученные результаты сопоставлялись с наземными данными для оценки точности результата (Рисунок 10) [37]. Получив удовлетворительный результат, они пришли к выводу, что данные радиолокационные снимки вполне пригодны для задач мониторинга.

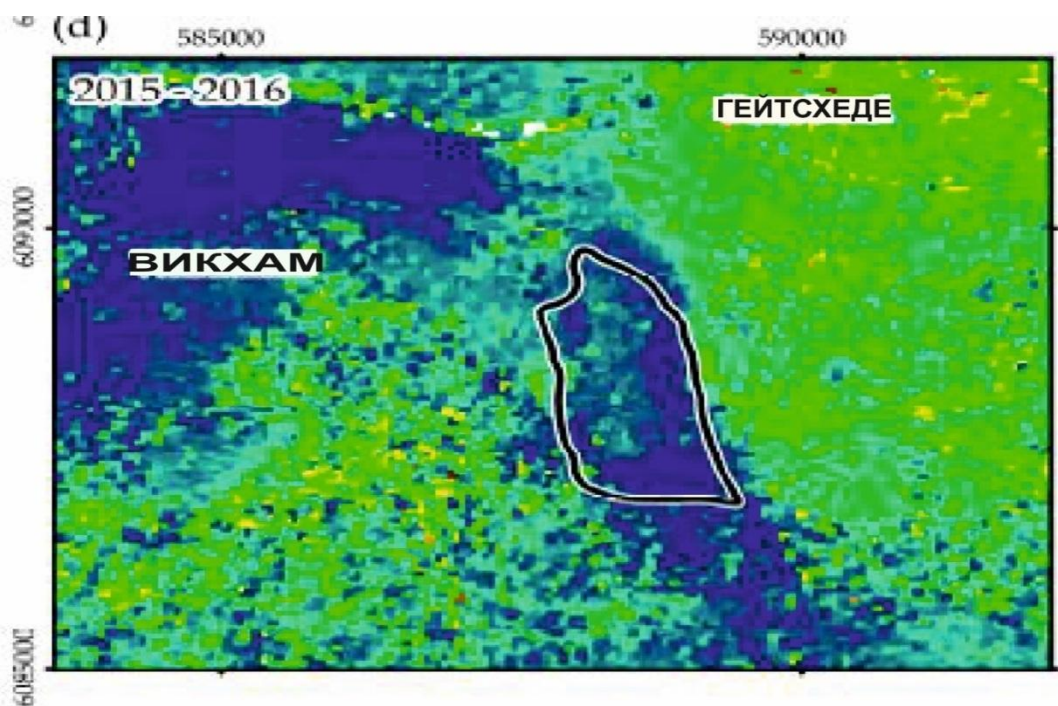


Рисунок 10 - Вертикальное смещение над одним из горных месторождений Великобритании

Сегодня наряду с перечисленными зарубежными странами и в странах СНГ можно заметить активное применение космических снимков в целях мониторинга смещений земной поверхности при добыче, в том числе активное использование метода дифференциальной радарной интерферометрии все чаще можно встретить для Казахстана и РФ. К примеру, Технический Университет Клаусталия исследователи российских ВУЗов с 2007 года активно ведут мониторинг за смещением земной поверхности после подтопления местного рудника в городе Березник. В результате была получена карта смещений с существенной деформацией земной поверхности, которые подтвердились наземными данными (Рисунок 11) [31].

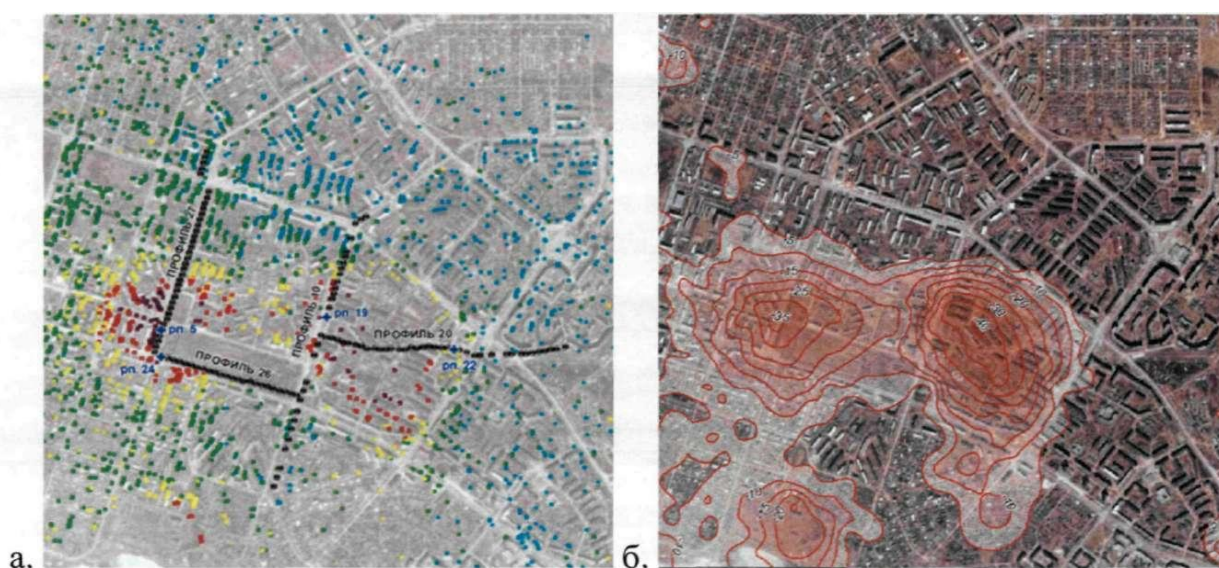


Рисунок 11-Карта смещений для города Березник

Также, на территории Губкинского и Самотлорского нефтяного месторождений проводятся ряд геодинимических мониторинговых работ, включая метод радарной интерферометрии.

Другим примером использования данных радарного интерферометрии является мониторинг смещений Восточного и Анненского рудников, где в 2004 и 2006 гг. произошли обрушения. Дело в том, что на поверхности в этом районе не были заложены профильные геодезические линии из-за рядом находящегося карьера и отвалов на поверхности. Также этот район не был покрыт в достаточной мере сетью сейсмического мониторинга. Систематический анализ материалов космического радарного мониторинга позволил проконтролировать развитие оседаний над этим районом и их взаимосвязь с горными работами. Развернутая сеть временных реперов (нацеленных по данным радарных наблюдений) на отвалах горных пород показала, что происходит оседание земной поверхности, вызванное подземной добычей, а не деформацией отвалов. Поэтому работы на 81 участке Анненской шахты в октябре 2012 г. были прекращены, и разработана программа подземного мониторинга деформаций и

разрушений этого участка массива горных пород. Особенности этого участка состоят в том, что здесь расположены наклонные рудные залежи, и достаточно трудно применить разработанные ранее критерии обрушений. Следует отметить, что отсутствие космического мониторинга могло усугубить и так непростую ситуацию в Анненском районе. В целом, технология радарного интерферометрического мониторинга показала высокую эффективность, ее применение полностью себя оправдало [30].

### **1.3. Отечественный опыт применения радарных данных для оценки деформации земной поверхности**

Результаты радарной интерферометрии могут обеспечивать информацией об истории вертикальных смещений точек земной поверхности. В случае правильной интерпретации данных, таким образом можно получать сведения об изменениях скоростей оседаний в точках. Такая информация может служить материалом для ближайшего прогнозирования процессов оседаний, основанного на изменениях динамики процессов оседаний [30].

Основными отличительными особенностями радиолокационных данных сверхвысокого разрешения с КА нового поколения являются их пространственное разрешение до 1 м, возможность съемки с различной поляризацией и последующей интерферометрической обработки для получения высокоточных [38] цифровых моделей рельефа и выявления подвижек земной поверхности.

На территории нашей Республики, использование радарных данных для решения задач мониторинга сдвижения земной поверхности приобретает все большую популярность.

В столице Казахстана в городе Нурсултан с целью наблюдения оседания и деформаций зданий и сооружений проводился мониторинг с применением радарных данных (рисунок 12,13).

По результатам интерферометрической обработки радарных данных со спутников COSMO-SkyMed-1-4 на территорию Нурсултан получены независимые дистанционные данные о смещениях и деформациях земной поверхности и сооружений с миллиметровой точностью[39]. По результатам данного исследования были установлены отдельные оседающие и/или деформирующиеся здания и сооружения, в том числе выявлены деформации одного из мостов и выявлены оседания отдельных сооружений Акмолинской ТЭЦ-2, вероятно, вызванные добычей грунтовых вод [39].

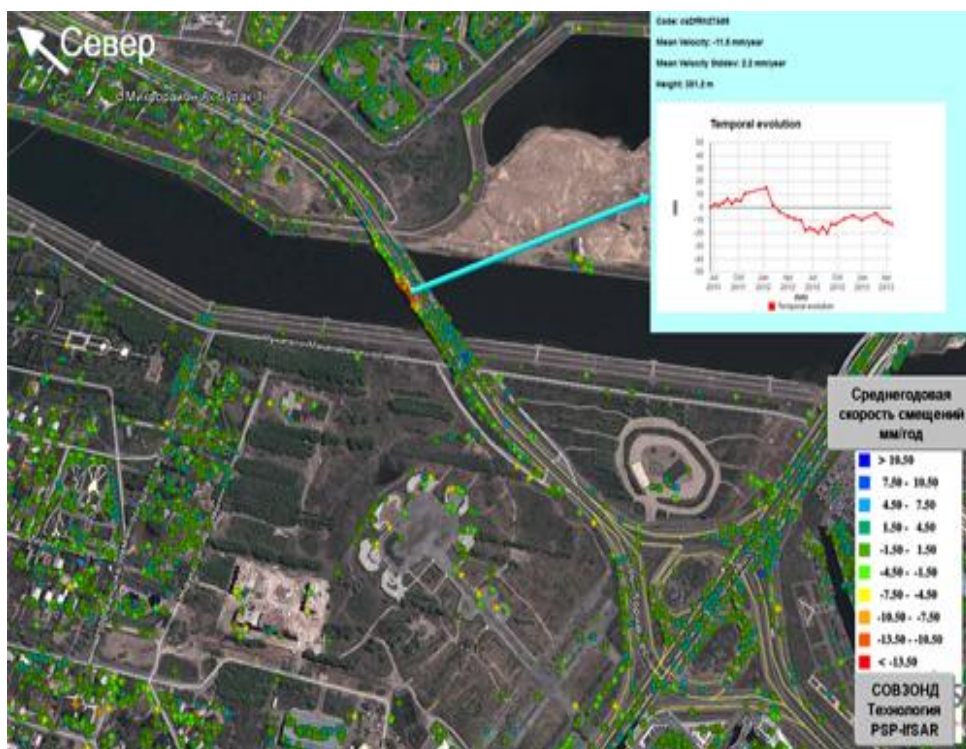


Рисунок 12 - Деформации центральной северо-западной части моста на ул. Шалкыма в Астане



Рисунок 13 - Постоянные рассеиватели в центре Астаны

Стабильные здания дома министерств (по центру), верховного суда (слева сверху), парламентского комплекса и администрации президента (высотные здания на втором плане) и резиденции президента Казахстана (на заднем плане). Также стабильны отражатели вдоль набережной[39]

Следующим примером отечественного применения является ежемесячный мониторинг над Жезказганским медным месторождением компанией «Совзонд» для «Корпорации Казахмыс» с 2011г. Внедрение на базе корпорации технологии космической радарной интерферометрии позволило проводить более частый контроль поверхности над выработанными пространствами на большей территории, чем ранее (мониторинг осуществляется по площади 50x50 км каждые 24 дня – полный цикл повторения орбиты спутника Radarsat-2). Кроме этого, в результате ранее произошедших обрушений большое количество реперов и профильных линий было потеряно либо нарушено, что осложняет наземные наблюдения. Спутниковые радарные наблюдения были полезны в сочетании с сейсмическим мониторингом и позволили снизить риск возникновения чрезвычайных ситуаций и планировать горные работы в проблемных областях месторождения. Для этого же месторождения, при помощи использования радарной интерферометрии были определены деформаций бортов и уступов карьер с миллиметровой точностью. К тому же плотность точек постоянных рассеивателей довольно высок – к примеру на участке 10x10 км более 2 000 000 рассеивателей [40].

В статье Ф. К. Низаметдинова (КарГТУ, Казахстан), Д. В. Мозера (КарГТУ, Казахстан), А. С. Туякбая (КарГТУ, Казахстан), А. Д. Каранеевой (КарГТУ, Казахстан) на тему «Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна» был выполнен геотехнический расчет, определены смещения земной поверхности методом нивелирования и спутниковой радарной интерферометрии. По результатам обработки серии радарных снимков был построен график оседаний земной поверхности по точкам максимального оседания, из которого видно, что максимальное оседание за период наблюдения составило более 150 мм (рис. 14). После получения результатов обработки радарных данных был произведен геотехнический расчет смещения земной поверхности, подработанной горными выработками в районе шахты им. Т. Кузембаева[41]. На рис. 14 видно, что максимально возможная величина оседания составляет 123 см.

Эффективность применения РСА данных для мониторинга смещений земной поверхности в нефтедобывающих отраслях Казахстана также можно подтвердить статьей Ю. И. Кантемирова(компания «Совзонд», Россия), А. Т. Камза (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан), А. М. Бермухановой (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан), А. Ж. Тогайбекова (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан), М. А. Сапарбековой (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан), С. Э. Никифорова (МГГУ, Россия) на тему «Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан». В этой работе приведены результаты космического радарного мониторинга смещений земной поверхности на одном из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан.

Продуктивная залежь месторождения — относительно неглубокого залегания (менее 500 м).

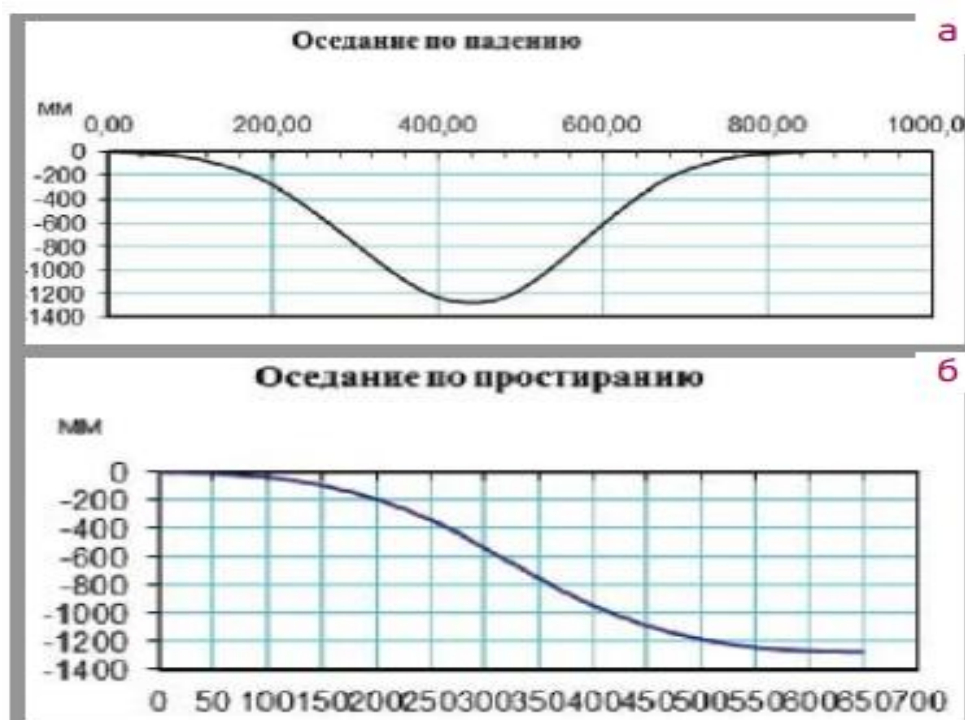


Рисунок 14 - Мульды оседаний земной поверхности: а) вкрест простирания пласта; б) по простиранию пласта

Добыча ведется в основном за счет вытеснения нефти водяным паром и горячей водой, которые закачиваются в продуктивный нефтяной пласт нагнетательными скважинами. Мониторинг смещений был выполнен с использованием данных радарных съемок территории месторождения со спутника ALOS/PALSAR (JAXA, Япония), проведенных в период с 2007 по 2011 г. Интерферометрическая обработка данных многопроходных космических радарных съемок выполнялась без наземных контрольных точек и без использования данных наземных наблюдений. В качестве опорного рельефа при интерферометрической обработке радарных данных использовалась глобальная общедоступная цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM. Визуализация результатов и оформление карт смещений земной поверхности выполнялись в программном обеспечении ArcGIS (ESRI, США) и в свободно распространяемой программе Google Earth. В рамках проведения работ создавались карты смещений земной поверхности по состоянию на дату каждой съемки. За поверхность, относительно которой рассчитывались смещения, была принята поверхность, отражающая радарный сигнал на момент первой по порядку съемки в мультитременной серии радарных съемок ALOS/PALSAR (Рисунок 15). Выявлялась вертикальная компонента смещений в миллиметрах, после чего анализировалась динамика выявленных смещений с учетом промысловой и геолого-геофизической информации. Результирующие

продукты обработки (карты смещений) создавались в обменных растровых и векторных форматах[43].

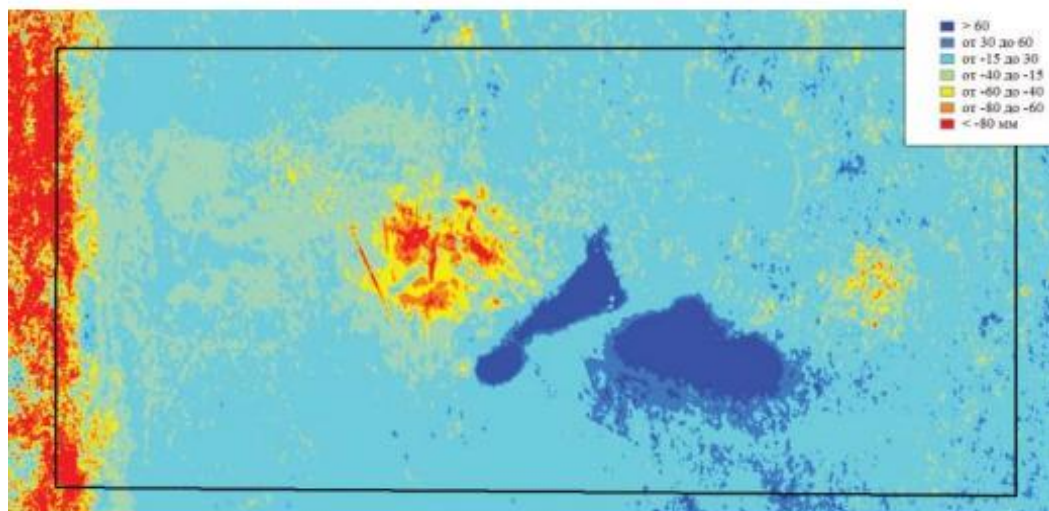


Рисунок 15 - Изображение вертикальных смещений земной поверхности на нефтяном месторождении за период с 16.01.2007 г. по 19.07.2011 г. в цветовом кодировании

Проанализирована динамика смещений земной поверхности на месторождении за 2007–2011 гг. и сопоставлена основные выявленные очаги смещений земной поверхности на месторождении с пространственным местоположением реперов наземного нивелирования и дифференциальных GPS-станций, авторы сделали вывод, что значительная часть выявленных по радарным данным локальных очагов наиболее интенсивных оседаний и поднятий расположена между профилями нивелирования — там, где наземные наблюдения не проводятся. В пределах некоторых очагов смещений находятся GPS-станции, но их расположение слишком неравномерно и не позволяет построить столь неоднородную карту смещений, выявленных по радарным данным (Рисунок 15)[42].

На территорию исследуемого объекта данной диссертации - на месторождение Тенгиз были проведены исследования с применением радарных данных. Работа была выполнена совместно с Российской компанией «Совзонд» и отечественной АО «НЦ КИТ». Результаты данного исследования приведены в статье Ж. Ш. Жантаев (АО «НЦ КИТ»), А.В. Иванчукова (АО «НЦ КИТ»), А.Г. Фремд (АО «НЦ КИТ»), С.М. В результате были получены следующие данные:

- Карта смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2010 г., установлена взаимозависимость между происходящими оседаниями земной поверхности, геодинамически активными разломами, структурными особенностями месторождения и отборами углеводородов из месторождения (Рисунок 16).

- Сравнительный анализ результатов интерферометрической обработки двух независимых серий радарных снимков, полученных с различных спутников: ALOS (Япония) и ENVISAT (Европа). Результаты хорошо коррелируются друг с другом, что говорит об объективном характере технологии радарной интерферометрии в целом.

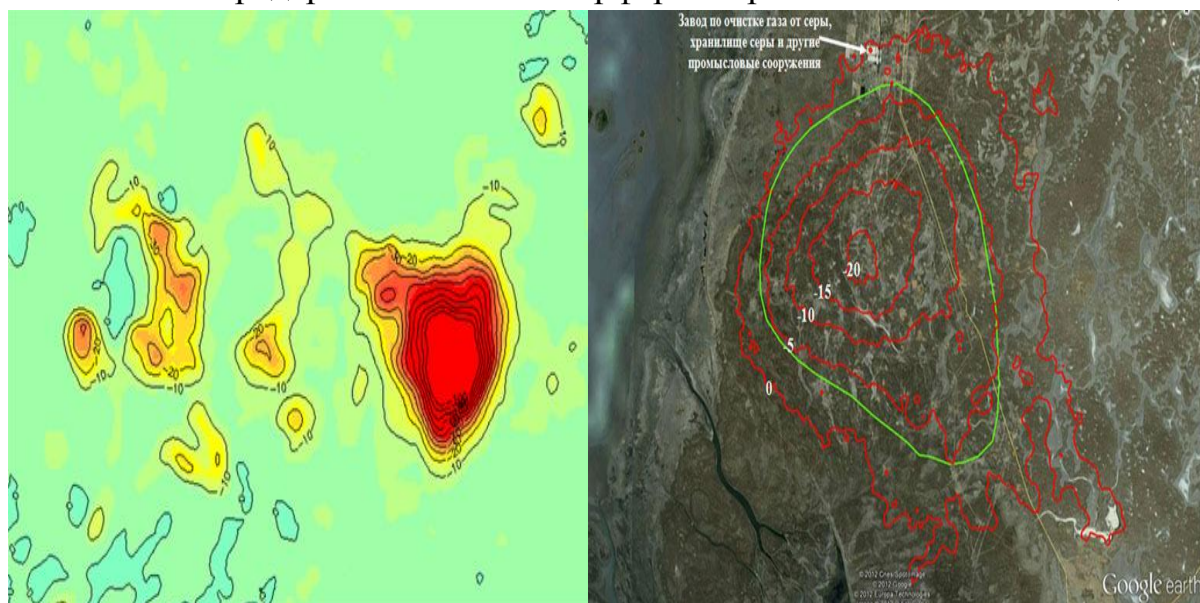


Рисунок 16. Карта смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз.

Последнее время на территории нашей Республики, использование данных Sentinel-1 для мониторинга деформаций земной поверхности приобретает все большую популярность. Например, авторами Джунисбекова В. и Кузнецова И. данные снимки были применены для изучения смещений земной поверхности месторождения в Каспийском регионе методом «Устойчивых рассеивателей».

#### 1.4. Выводы

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. Первое применение радарных данных в практических целях было выполнено в 1986-1989 гг. зарубежными учеными Зебкером Х.А. и Голдстейном Р.М., но идея измерения сдвига фазы в сигналах ДЗЗ данных принадлежит исследователю из США Ричману Д.

Начиная с 90-х годов ведущими учеными в области дифференциальной интерферометрии были ученые Франции Массонет Д. и Фейгл К. В своих опубликованных работах они оценивали возможности РСА данных в задачах мониторинга деформаций 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.

В следующей главе данной диссертационной работы будут рассмотрены основные теоретические аспекты радиолокационной синтезированной аппертуры, и классический метод DInSAR и подробно рассмотрен метод SBAS. Будут проанализированы минусы и проблемные моменты подготовки и обработки радарных данных, включая вышеприведенный метод обработки.

## **2. МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕГИОНАХ С ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКОЙ**

### **2.1. Основы радиолокационной интерферометрии**

Само слово «радар» является аббревиатурой от радиолокационного зондирования и определения дальности. Радарные системы были разработаны в первой половине 20-го века, чтобы определить положение или курс движущегося объекта, такого как океанское судно или самолет. Методы обработки сигналов со сжатием импульсов традиционно использовались для улучшения соотношения сигнал/шум, а затем для определения местоположения

объекта с ошибкой в несколько метров [45]. Радар с синтезированной апертурой (SAR) является продолжением картографического радара, который создает высоконаправленный луч, используя сложную обработку сигналов, чтобы объединить информацию из множества эхо-сигналов, чтобы также точно определить азимутальное положение цели [46].

Радары с синтезированной апертурой, устанавливаемые на борту самолета или космического летательного аппарата, как правило, включают в свой состав фиксированную антенну бокового обзора параллельно земной траектории движения чувствительного элемента, испускающего определенную серию монохроматических микроволновых импульсов (рисунок 18). Направление полета платформа называется азимутальным направлением, а направление главной передающей антенны называется пеленгующим направлением.

Антенна, во время неактивной фазы между испусканием импульсов, используется в режиме приема рассеянных отраженных сигналов ранее излученных импульсов от отраженной поверхности. Согласно теории антенн, зона отражения земной поверхности является обратно пропорциональной физической форме и размерам антенны. Следовательно, для получения разрешающей способности по азимуту в радиолокационных станциях с реальной апертурой, понадобится очень длинная антенна.

Радар с синтезированной апертурой является альтернативным техническим решением, используемым вместо физически длиной антенны. Концепция радара с синтезированной апертурой предусматривает выделение двух целей на одном и том же расстоянии, но с различными азимутальными положениями в пространстве, перемещающимися с различными скоростями относительно следящей платформы, летящей в космосе. Монохроматические волны, отраженные от двух различных засветок в одном и том же луче развертки, отличаются разными смещениями или фазами согласно эффекту Доплера, характерными для них. Зная траекторию движения платформы изображения, мы можем рассчитать точные фазы движения каждой точечной цели на земной поверхности.

Комбинируя информацию, поступающую от множества отраженных сигналов, можно создать длинную синтезированную апертуру для различения целей, отслеживаемых в одном луче развертки. Разрешение зависит от общего объема данных по фазам движения, полученных по каждой цели. Чем дальше цель снимается, тем лучше степень разрешения.

Таким образом, система радара с синтезированной апертурой позволяет получать изображения с высокой степенью разрешения при помощи использования небольших по размеру антенн. Многочисленные рассчитанные алгоритмы можно использовать для обработки записываемых отраженных сигналов, чтобы получать изображения с высокой степенью разрешения при помощи радара с синтезированной апертурой.

Геометрические выкладки обработки визуальной информации, показанные на Рисунке , называют полосовым режимом обзора РЛС, получившим наиболее широкое применение. Современные антенны с фазированной решёткой предусматривают сложные операции сбора данных, например, система сканирования ScanSAR и узконаправленная антенна радара с синтезированной апертурой, чтобы добиться увеличения участка, отслеживаемого с бортовой радиолокационной установки.

Выходной сигнал алгоритма обработки данных радара с синтезированной апертурой представляет собой одноразовое амплитудное изображение с набором сложных чисел в двух измерениях обработанных выборок РЛС, означающих яркость и фазу смещения отраженных рассеянных сигналов на земной поверхности.

Показатели пикселей на матрице представляют собой азимут и координаты отраженных рассеянных сигналов по отношению к исходной точке наблюдения на траектории движения РЛС.

Радиолокационная съёмка выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C-, L- и P-диапазоны (Таблица 2). Съёмка в каждом из вышеперечисленных диапазонов имеет свои плюсы и минусы. Для задач мониторинга смещений земной поверхности, зданий и сооружений по каждой конкретной территории подбираются данные в одном или нескольких из этих диапазонов исходя из типа рельефа, типа растительного покрытия, ожидаемых величин смещений и т.д. [46].

Таблица 2 - Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5.20 – 10.90	2.75 – 5.77 (2.4 – 3.8)	USGS SLAR, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed 1-4
C	3.9 – 6.2	3.8 – 7.6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR; RADARSAT-1,2
L	0.39 – 1.55	19.3 – 76.9 (15 – 30)	SIR-A,B, ALOS PALSAR
P	0.225 – 0.391	40.0 – 76.9 (30 – 100)	AIRSAR

В случае обработки данных ENVISAT-ASAR, подобранных для территории месторождения Тенгиз, критическое значение перпендикулярной

пространственной базы для каждой пары снимков может быть вычислено по следующей формуле:

$$B_{n,cr} = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{2R_r} \quad (1)$$

где:

$B_{n,cr}$  – критическая базовая линия;

$\lambda$  – длина зондирующей волны радиолокатора;

$R_r$  – пространственное разрешение в направлении наклонной дальности;

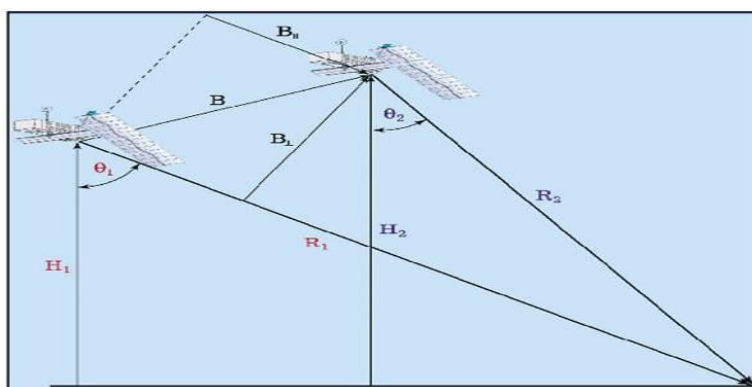


Рисунок 17 - Схема космосъёмки интерферометрической пары радиолокационных изображений

$H_1$  и  $H_2$  – высота орбиты радиолокатора;  $R_1$  и  $R_2$  – дальность (путь зондирующей волны);  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы между дальностью и высотой;  $B^\perp$  и  $B^\parallel$  – перпендикулярная и параллельная составляющие базовой линии;  $B$  – результирующая базовая линия

Исходя из этой формулы, критическая перпендикулярная базовая линия для используемых данных ENVISAT-ASAR Image Mode составляет порядка 900 - 1500 м, а оптимальная для расчета смещений база, в таком случае, колеблется в диапазоне 0 – 100 м. С другой стороны, базы в 100 – 300 м также пригодны для мониторинга смещений. У пар снимков с базами более 300 м в интерферограммах слишком преобладает рельефная компонента и для мониторинга смещений они не являются оптимальными. Именно пары снимков с базами до 300 метров были в основном выбраны для построения интерферограмм [30].

РЛС с интерферометрической синтезированной апертурой (InSAR) является примером использования мультипликативных помех. Почти монохромный характер рассеянных отраженных сигналов позволяет скомбинировать информацию по фазе смещения двух и более изображений,

полученных при помощи радара с синтезированной апертурой в одном и том же диапазоне излучения одновременно либо в разное время. Два изображения на радаре с синтезированной апертурой, как правило, получаются с немного различающимися друг от друга геометрическими параметрами. Вторичное одноразовое амплитудное изображение должно точно повторно регистрироваться и повторять размер первичного одноразового амплитудного изображения по геометрическим параметрам.

После чего фаза интерференционного смещения рассчитывается путем умножения первичного одноразового амплитудного изображения на комплексно сопряженный элемент совместно регистрируемого вторичного одноразового амплитудного изображения. Получаемое в результате сложное изображение с множеством параметров называется интерферограммой (IFG). Не беря в расчет какие-либо задержки по времени в работе аппаратного оборудования получения изображений, можно считать, что искомая интерференционная фаза прямо пропорциональна длине расстояния до цели от РЛС слежения в направлении линии прямой видимости.

Карта интерференционных фаз, можно разделить на следующих составляющие элементы:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_n; \quad (2)$$

где  $\Phi_{\text{base}}$  это сдвиг по фазе, возникающий из-за разных исходных положений спутника, соответствующих двум полученным изображениям,  $\Phi_{\text{topo}}$  – поправка на топографию местности,  $\Phi_{\text{defo}}$  – поправка на деформацию земной поверхности,  $\Phi_{\text{atm}}$  – поправка на задержку сигнала из-за влияния атмосферы, а также  $\Phi_{\text{noise}}$  – шумовые помехи, возникающие из-за других факторов, включая ионосферу и шум системы.

Для составления картографической топографии, все величины, кроме  $\Phi_{\text{base}}$  и  $\Phi_{\text{topo}}$ , считаются шумом.

Интерферометрическую фазу можно вычислить только по коэффициенту  $2\pi$ . Для получения сплошной интерферометрической карты, потребуется интегрирование дифференциальной фазы между всеми соседними пикселями изображения. Этот процесс называется «развертка фазы» и подробно рассматривается в Главе 3. Развернутую фазу можно преобразовать в топографию путем преобразования уравнения.

С точки зрения исследования деформации коры, интерес представляет только величина  $\Phi_{\text{defo}}$ , а во все прочие величины вносится поправка на шум или их принято считать шумовыми помехами. Величину  $\Phi_{\text{base}}$  можно рассчитать, исходя из точной орбитальной информации и эллиптической или сферической модели земной поверхности. Немного отличающиеся друг от друга

геометрические параметры изображения также приводят к возникновению смещения, если на участке имеются топографические условия.

Цифровая модель рельефа (DEM) [48], полученная после полётов многоразового транспортного космического корабля для обработки радиолокационной топографии (SRTM)[49] или другая интерферограмма одного и того же участка земной поверхности может использоваться для определения величины  $\Phi_{\text{торо}}$ . Эта технология называется «дифференциальная интерферометрия» или D-InSAR.

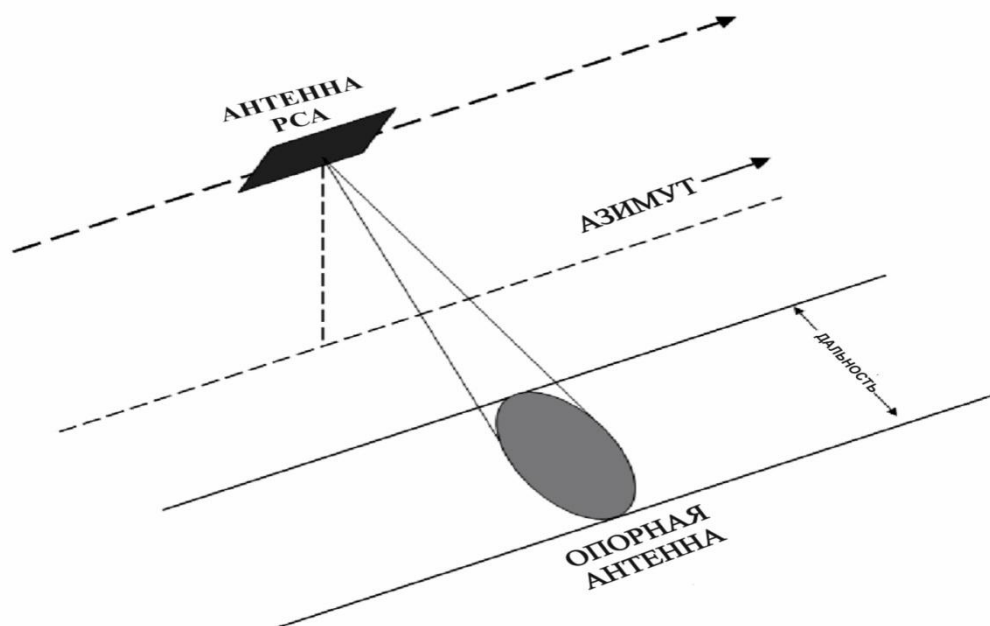


Рисунок 18 - Геометрия РСА

## 2.2. Метод устойчивых отражателей и малых базовых линий (SBAS)

Дифференциальная радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой (DInSAR) представляет собой микроволновую технику дистанционного зондирования, позволяющая исследовать деформацию поверхности с точностью от сантиметра до миллиметра и с большим пространственным покрытием. В частности, методика DInSAR использует разность фаз, часто называемую интерферограммой, между двумя SAR изображениями, относящиеся к временно разделенным наблюдениям исследуемой области и обеспечивает измерение проекции деформации грунта вдоль линии радарной съемки. Технология DInSAR играет важную роль для анализа поверхности и мониторинга смещений, а также имеет ограничения, из-за воздействия шума на интерферограммы, называемые явлениями декорреляции. Декорреляции могут быть вызваны изменениями отражательной способности зоны, которые произошли между двумя периодами (временная декорреляция) или различиями направления изображения из-за пространственного разделения между двумя орбитами съемки

(пространственная декорреляция). Также фактические сценарии SAR в основном задействует датчики, работающие в С-диапазоне (центральная частота 5,3 ГГц, соответствующая длине волны 5,6 см) с повторной съемкой около 20–40 дней и с типичным расстоянием между сенсорными орбитами в диапазоне 0–2 км. Соответственно, можно ожидать низкие эффекты декорреляции в основном в урбанизированных и скалистых областях, в то время как места с растительностью, сельскохозяйственные поля, снег или вода резко теряют в качестве под воздействием шума[50]. Методология DInSAR была применена в первую очередь для исследования одиночной деформации местности. Однако в последнее время он также используется для анализа временной эволюции обнаруженных смещений посредством генерации временных рядов деформации. В этом случае временные ряды деформации могут быть решены путем инверсии соответствующей последовательности интерферограмм DInSAR. Интерес к развитию этой методологии подтверждаются несколькими подходами, которые уже были представлены или находятся в стадии разработки.

Базовая техника SBAS была первоначально разработана для исследования больших пространственных смещений с относительно низким разрешением (обычно порядка  $100 \cdot 100$  м), используя отфильтрованные по нижним частотам (многоцелевые) интерферограммы DInSAR. Основой техники SBAS является использование многоцелевой интерферограммы и правильный выбор пары снимков для минимизации пространственной и временной разниц (базовая линия) между орбитами съемки, что снижает значение декорреляции.

Технология SBAS представляет собой методику DInSAR (Дифференциальная радиолокационная интерферометрия), позволяющую определять деформацию земной поверхности, и, самое главное, анализировать ее развитие во времени.

В частности, данная технология основана на использовании большого количества собранных данных при помощи радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR) [51] и позволяет комбинировать многовыборочные интерферограммы с использованием методики DInSAR, рассчитанные на компьютере для получения этих данных, в конечном счете, позволяя разрабатывать карты осредненной скорости деформации и рассчитывать временные ряды.

Алгоритм предусматривает, прежде всего, выбор взаимосвязанных элементов изображения, в которых влияние шума считается незначительным. На полученных элементах изображения происходит выделение деформационной составляющей сигнала из других нежелательных образцов, которые считаются топографическими и атмосферными помехами изображения, путем описания характеристик этих образцов.

В частности, компонент интерферометрической фазы, относящийся к топографическим помехам, приводится к вектору пространственных базовых линий в (а точнее, перпендикулярная составляющая базовых линий по

отношению к линии прямой видимости радара) последовательности интерферограмм; помимо этого, сигналы атмосферной фазы четко коррелируются в пространстве [52], но недостаточно четко во времени. Исходя из полученных характеристик, при использовании процедуры SBAS происходит определение нежелательных сигналов, которые впоследствии отфильтровываются из измеренной интерферометрической фазы, в конце концов, позволяя рассчитать временные ряды деформации. Предположим также, в целях упрощения, что все изображения совпадают с единым образцом для создания общей координатной сетки.

Стартовой точкой применения данной технологии является создание определенного количества, пусть это будет  $M$ , дифференциальных интерферограмм с набором данных  $N + 1$  SAR, обработанных надлежащим образом, чтобы уменьшить влияние декорреляции. Для решения этой задачи, пары изображений SAR, отобранные для генерирования интерферограмм, характеризуются малой пространственной временной базовой линией, а также сдвигом частоты между центроидами Доплера. Также, в результате применения таких требований, изображения SAR, принятые для создания интерферограмм, можно сгруппировать в несколько независимых малых подгрупп базовых линий, которые должны быть соответствующим образом «связаны», чтобы получить временные ряды деформации. Если фазовая информация в рассчитываемых интерферограммах отражает ограничение по модулю  $2\pi$  (свернутого) от первоначального (развернутого) интерферометрического сигнала, то каждая интерферограмма проходит обработку для получения исходной фазы. Эта операция называется разверткой фазы и производится при помощи двухэтапной методики. В частности, применяется алгоритм поиска потока минимальной стоимости, предложенный Константином и Розен в 1999 году; второй этап представлен методом наращивания областей, позволяющим расширить применение развернутых данных в областях с низкой когерентностью данных, т.е. низким соотношением сигнал/шум.

Следующим шагом рассматриваются характерные элементы изображений SAR с азимутом и пределами координат  $(x, r)$  и если, фазовый сигнал каждой развернутой интерферограммы приводится к уровню элемента изображения, характеризуемого высокой когерентностью, с уже известными деформационными свойствами (как правило, он находится в недеформируемой зоне). Выбирать данный исходный элемент изображения SAR следует особенно внимательно, так как любая совершенная ошибка при таком выборе скажется на всех последующих результатах. В этом плане, критически важным становится влияние искажений атмосферной фазы, которые являются пространственно-коррелируемыми, и поэтому их можно спутать с деформационными сигналами.

Выражение характерной  $j$ -ой интерферограммы, рассчитанной по результатам, полученным с радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR), в моменты времени  $t_B$  и  $t_A$ , в соответствии с данными, полученными Берардино с соавторами (2002 год) представляет собой формулу:



$$\begin{aligned}
\delta\varphi_j(x, r) &= \varphi(t_B, x, r) - \varphi(t_A, x, r) \\
&\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] + \frac{4\pi B_{\perp j} \Delta z}{\lambda r \sin\vartheta} \\
&+ \frac{4\pi}{\lambda} [d_{atm}(t_B, x, r) - d_{atm}(t_A, x, r)] + \Delta n_j, \forall j = 1, \dots, M
\end{aligned} \quad (3)$$

где  $\lambda$  это длина волны по центру передаваемого сигнала,  $\varphi(t_B, x, r)$  и  $\varphi(t_A, x, r)$  представляют фазы двух изображений, использованных для генерирования интерферограммы, а  $d(t_B, x, r)$  и  $d(t_A, x, r)$  являются проекциями накопленной деформации на линию прямой видимости радара в моменты времени  $t_B$  и  $t_A$ , по отношению к начальному моменту времени  $t=0$ , принятым за исходную точку, т.е. подразумевается, что  $\varphi(t_0, x, r) = 0, \forall(x, r)$  Помимо этого, в части, касающейся правой стороны уравнения (1), второй член отображает топографические искажения  $\Delta z$ , которые могут быть в Цифровой модели высот (DEM), используемой для генерирования интерферограмм; эта величина зависит от перпендикулярной составляющей базовой линии [52] (которая также называется пространственной базовой линией), а также расстояния до датчика  $r$  и угла обзора  $\vartheta$ . Члены  $d_{atm}(t_A, x, r)$  и  $d_{atm}(t_B, x, r)$  представляют собой возможные искажения атмосферной фазы а последний член  $\Delta n_j$  – эффекты декорреляции.

Выражение (3) позволяет определить систему уравнений  $M$  в неизвестных областях  $N$ ; ,  $\varphi(t_i, x, r), \forall_i = 1, \dots, N$  которые можно реорганизовать при помощи матричного формализма в следующем порядке:

$$A\phi = \delta\phi \quad (4)$$

где  $A$  это матрица инцидентий, напрямую связанная с комплектом интерферограмм, сгенерированных из имеющихся данных. Также технология SBAS подразумевает проведение поэлементного временного анализа; соответственно, зависимость от переменных  $(x, r)$  не учитывается в выражении (2), а данное упрощение используется далее во всем матричном выражении.

В системе уравнений (2) заменяются неизвестные величины на среднюю скорость изменения фазы между ближайшими по времени моментами экспозиции. Соответственно, такие неизвестные величины рассчитываются по формуле:

$$v = \left[ v_1 = \frac{\varphi(t_1, x, r) - \varphi(t_0, x, r)}{t_1 - t_0}, \dots, v_n = \frac{\varphi(t_N, x, r) - \varphi(t_{N-1}, x, r)}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (5)$$

а также, путем замены выражения (4) в выражении (5), в итоге получаем новую систему уравнений:

$$Bv = \delta\phi \quad (6)$$

где  $B$  представляет собой матрицу  $M \times N$ , выраженную по формуле, рассчитанной Берардино [53].

Выше упомянутое выделение данных SAR в отдельные подгруппы приведут к появлению неполного ранга в матрице  $B$ , что в свою очередь, к тому, что у системы уравнений (6) будут бесконечные решения. Однако, применение метода разложения по сингулярным значениям (SVD), который используется в процедуре SBAS, позволяет рассчитать псевдо-инверсию матрицы  $B$ , что дает возможность получить решение системы уравнений (6) по методу наименьших квадратов с минимальной нормой. В данном контексте, ограничение по минимальной норме для вектора скорости  $v$  позволяет сократить число больших разрывов в окончательных результатах, таким образом, гарантируя получение физически логического решения, как показано Ланари [54]; это условие является основанием для преобразования данных, приводя к получению системы (6).

Разумеется, потребуется дополнительный шаг интегрирования для определения решения  $\phi$  из рассчитанного значения вектора  $v$ , хотя это является тривиальной операцией.

После решения системы уравнений (6), представляется расчет топографических искажений  $\Delta z$ , а также расчет атмосферной составляющей сигнала  $d_{\text{atm}}$ . В частности, расчет значений  $\Delta z$  основан на известных характеристиках составляющей топографической фазы, которая считается зависимой от вектора, перпендикулярного базовой линии ( $B_{\perp}, \dots, B_{\perp M}$ ); следует обратить внимание на то, что может показаться, что необходимость в расчете топографического фактора в уравнении (3) отпадает, из-за предположения о малых пространственных интерферограммах базовой линии. Однако, поскольку амплитуда локальных топографических искажений может значительно превышать ожидаемую погрешность цифровой модели высот (DEM), это может привести к существенному ухудшению качества полученных крайностей с использованием метода дифференциальной радиолокационной интерферометрии (DInSAR), если их не корректировать.

В части, касающейся компенсации возможных искажений атмосферной фазы, применяется фильтрующая функция в порядке, описанном выше по тексту, исходя из результатов научных наблюдений за атмосферной составляющей сигнала, который четко коррелируется в пространстве, но недостаточно четко во времени. Соответственно, нежелательные сигналы атмосферной фазы рассчитываются через последовательность этапов низкочастотной фильтрации в двумерной области пространства и временной функции высокочастотной фильтрации.

Помимо этого, данная методика позволяет выявлять орбитальные пики, появляющиеся из-за погрешностей в орбитальной информации, полученной с датчиков SAR. И, наконец, применяется этап фильтрации для удаления обнаруженных атмосферных искажений и орбитальных пиков.

Анализируя вышесказанное можно подвести итог, что технология SBAS, позволяет добиться приведения в соответствие с двумя основными требованиями:

- увеличить до максимума «дискретизацию по времени» получаемых сигналов смещения при помощи использования почти всех групп данных SAR;
- поддерживать работоспособность системы, чтобы разрабатывать пространственно- подробные карты деформации, которые является основной функцией стандартной интерферометрии DInSAR, при помощи использования пар данных SAR с ограниченными исходными значениями;

### **2.3. Проблемные задачи методики интерферометрического анализа и факторы влияющие на получение качественной интерферограммы**

Из приведенных теоретических основ метода радарной дифференциальной интерферометрии был выделен ряд проблем, которые возникают во время практического применения данного метода при оценке деформационного состояния техногенно нагруженных территорий. Данные проблемы создают прикладной пробел в радарной интерферометрии, который существует на данный момент между научным обоснованием метода и его практическим использованием. В результате применения описанных теоретических основ использования дифференциальной радарной интерферометрии на практике исследований объектов техногенно нагруженных территорий могут возникать некачественные результаты, обоснованные влиянием следующих факторов. Список представленный ниже освещает недостатки интерферометрических данных и процесса их обработки, которые взяты из разных источников, а также на основе личного опыта при обработке данных[47]:

Во многих нефтегазовых месторождениях поверхность земли имеет низкую отображающую способность, что существенно влияет на получение качественного результата. Большое количество растительности и влажного климата может существенно повлиять на измерения InSAR. Обычные методы InSAR, такие как SBAS, которые в основном используются в большинстве программ, потерпели неудачу в применении к оползням из-за ползучих, пропитанных и покрытых растительностью холмов. Качество оценок деформации, измеряемых величиной, называемой «корреляция», также зависит от природы самой поверхности, которая будет отображаться. Изменение отражательной способности поверхности во времени или «временная декорреляция», вызванное растительностью или таянием снега или другими природными явлениями, значительно коррелирует измерения, делая измерения фазы ненадежными. В результате большинство исследований InSAR, как правило, фокусируются на засушливых и редко растущих регионах, например, на юго-западе США, на Ближнем Востоке и в Тибете.

На рисунке 19 приведены два примера обработки радарных данных ENVISAT ASAR на разные территории с разными отображающими способностями. Данные радарные снимки были обработаны автором с помощью метода SBAS. Как видно на рисунке справа, результат обработки на лесную территорию имеет неудовлетворительную когерентную картину, в то время как

территория городского типа полностью покрыта и имеет высокую степень когерентности [55].

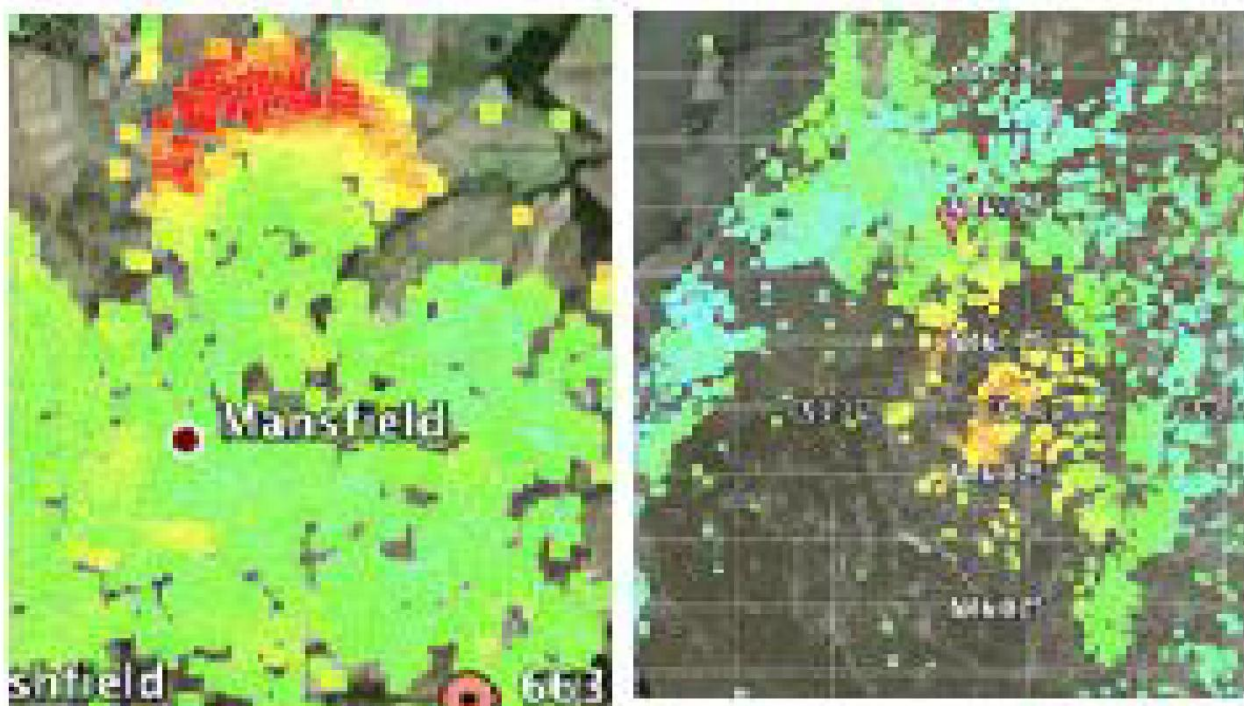


Рисунок 19 - Зависимость результата обработки от качества отражающей поверхности

Также необходимо отметить что, на отображающую способность поверхности имеет сильное влияние наличие снега, водных объектов при обработке радарных данных. В связи с этим, для некоторых регионов применение данных РСА для мониторинга смещений земной поверхности может иметь сезонный характер. Рисунок 20 является прекрасным примером данной проблемы [59]. На этом рисунке показаны шесть карт когерентности, сгенерированных из шести тандемных пар ERS-1 / ERS-2, полученных на вулкане Этна в Сицилии. Временная базовая линия между съемками ERS-1 и ERS-2 составляла всего 1 день во время тандемной миссии ESA. За исключением декабрьской пары, все интерферограммы имеют одинаковые значения  $B_n$  и идентичные  $B_t$ , но значения когерентности значительно меняются: мокрый снег (на вершине вулкана), ветер (над растительностью), а также явления объемной декорреляции (сильнее в отдельные месяцы) могут привести к падению значений когерентности.

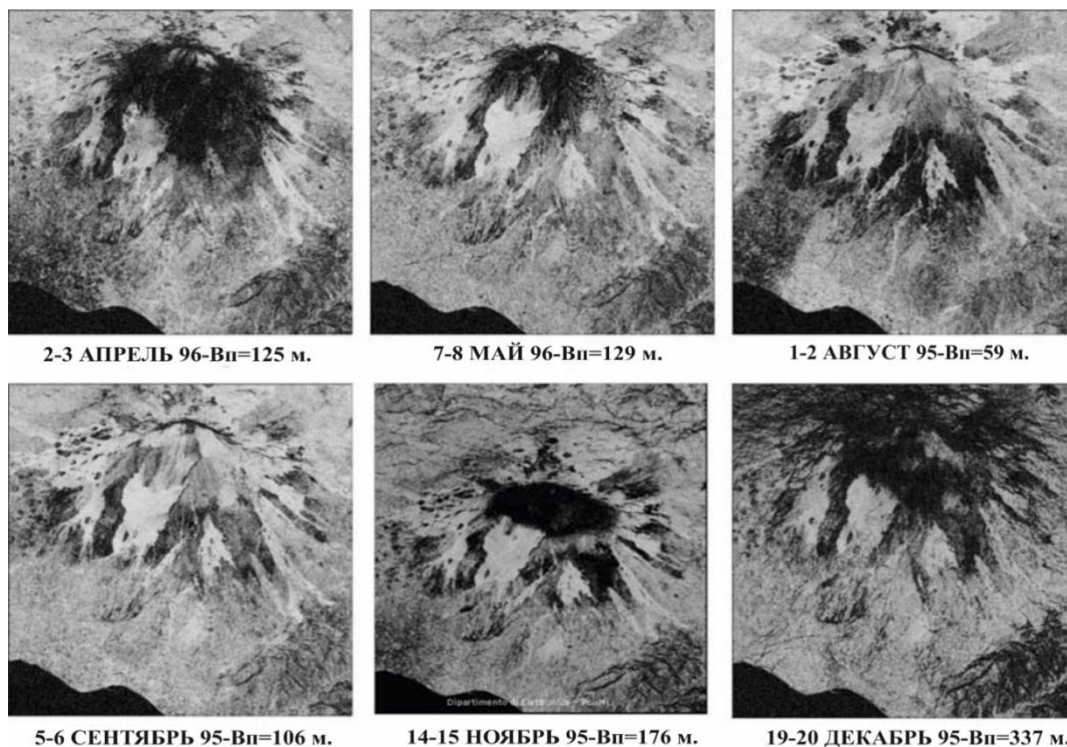


Рисунок 20 - Влияние погодных условий на когерентность

Следующей одной из основных проблем при обработке радиолокационных данных можно назвать атмосферное явление, которое задерживает фазу сигнала и, соответственно, снижает качество получаемого результата.

«Экран» атмосферной фазы (fatm) - это изменение задержки сигнала при его распространении через атмосферу и приводит к изменяющейся фазе на изображении [56]. Большая часть изменений в фазовом члене атмосферы обусловлена изменением распределения водяного пара по сцене и часто коррелирует с рельефом местности [57]. Поскольку получение данных SAR разделено примерно на 30 дней, экран атмосферной фазы при двух сборах SAR практически не коррелирован во времени. Распространенный метод уменьшения воздействия атмосферы состоит в объединении информации из различных интерферограмм с использованием многовременных методов InSAR.

Ошибки в известном положении платформы визуализации влияют на базовые оценки и обычно проявляются как фазовые изменения в конечных интерферограммах. Эти фазовые изменения являются результатом неправильной базы  $\phi$ , используемой на этапе коррекции фазы. Такие изменения можно легко скорректировать, рассчитав частоту полос на плоских участках без ожидаемой деформации и применив коррекцию ко всему изображению. Остаточные ошибки на этапе коррекции линейного изменения фазы нельзя отличить от «экрана» с атмосферной фазой [52], и для смягчения их последствий необходимо использовать мультиметодные методы InSAR.

Четвертая проблема методики - большие базисы КА с синтезированной радиолокационной апертурой. Они снижают возможность точного статистического анализа пар сцен, оставляя для анализа случайные пары сцен, получение информации относительно которых осуществляется за счет

усреднения результатов, которое в свою очередь требует большого количество избыточных данных [47].

Ухудшение качества интерферометрической фазы или декорреляции также происходит из-за изменения геометрии изображения. Разница в углах падения приводит к тому, что вейвлеты от рассеивателей от элемента разрешения на земле складываются немного по-другому, и измерения не воспроизводятся точно. Это называется «пространственной декорреляцией» [58] и увеличивается с увеличением перпендикулярного компонента базовой линии. Аналогичный эффект также наблюдается, когда дорожки визуализации для двух съемок не полностью параллельны, создавая «вращательную декорреляцию». Соответствующий геометрический эффект также возникает из-за изменения угла косоглазия, угла, под которым космический аппарат направлен вперед или назад. Изменение угла косоглазия характеризуется изменением доплеровских частот SAR, что приводит к декорреляции. Хотя многие из этих эффектов декорреляции могут быть минимизированы путем фильтрации, существуют критические пределы для разностей базовой линии и доплеровской частоты, за пределами которых невозможно получить информацию о интерферометрической фазе. Таким образом, число используемых пар интерферограмм ограничено временными и геометрическими эффектами декорреляции, эффективно уменьшающими временное разрешение регулярно получаемых наборов данных SAR.

Следующая проблема, как бы странно не звучало, это избыточность циклов съемок с помощью КА с синтезированной радиолокационной апертурой. Хотя известно, что большое количество снимков предоставляет массу возможностей, особенно учитывая, что для достижения наиболее объективного результата требуется большое количество данных. Однако избыточность циклов съемок всегда ограничена экономической целесообразностью использования радарных снимков. Учитывая, что снимки с КА с синтезированной радиолокационной апертурой стоят недешево, не каждый ученый может позволить себе обработку данных с большим количеством съемок (за исключением, малого количества open source снимков).

Кроме того, срок службы КА с синтезированной радиолокационной апертурой (сточки зрения применимости его данных для интерферометрического анализа) не превышает 7-8 лет. Срок наблюдения деформационных процессов на месторождении, как правило, превышает эту цифру, во-первых, и необязательно совпадает со сроком службы КА, во-вторых.

Поэтому возникает вопрос о совместном использовании данных различных КА на данный момент, однако эти вопросы еще не нашли решения. В качестве примера можно привести обработку данных месторождения Тенгиз, проводимую автором работы для мониторинга за деформациями земной поверхности. Мониторинг производится с 2004 по 2009 года с помощью данных ENVISAT ASAR, однако, в 2012 году данный спутник потерял связь с Землей и данные по этому спутнику для мониторинга больше не доступны. Однако, с

2014 года как продолжение миссии ENVISAT был запущен спутник Sentinel-1, данные которого являются бесплатным. Однако, разность форматов данного снимка не позволяет обрабатывать снимки на тех же программных обеспечениях, что и данные ENVISAT. Например, многие версии Sarscape/ENVI дают возможность обработать снимки ENVISAT, в то время, только версия 5.2 Sarscape/ENVI может быть использована для данных Sentinel-1. Кроме этого, хотя спутник был запущен 2014 году и на заданную территорию исследования съемка началась с конца 2015 года, нужное количество снимков для полноценной обработки данных для использования в целях мониторинга доступна лишь с октября 2016 года.

Также во время обработки РСА данных методом дифференциальной интерферометрии важную роль занимает ЦМР. Влияние возможных ошибок в *априорной* ЦМР и в векторах состояния спутника (ошибки базовой линии) может быть смоделировано как в первой приближённой формуле с использованием Уравнения. Точность ЦМР, которая будет использоваться для создания хорошей дифференциальной интерферограммы, зависит от геометрической базовой линии между двумя спутниковыми орбитами. Фактически, предположим, что вы знаете, что эталонная ЦМР имеет вертикальную точность ( $2\sigma$ ), равную 10 м (если погрешности измерений обычно распределяются со стандартным отклонением  $\sigma_h = 5$  м, то 95% истинных значений высот находятся в пределах интервала  $\pm 10$ м, сведенных к расчетной величине). Затем, в зависимости от нормальных значений базовых линий, получаем [55]:

$$\sigma_\phi \approx \frac{4\pi B_n \sigma_h}{\lambda r_{M0} \sin \theta} \quad (7)$$

и мы можем легко оценить влияние ошибок ЦМР на интерферометрическую фазу. Как правило, точность ( $2\sigma$ ) ЦМР, используемой для генерации дифференциальной интерферограммы, должна составлять не менее 1/4 высоты неопределенности, связанной с исходной интерферограммой. Для случая получаем:

$$2\sigma_h < \frac{1}{4} \frac{\lambda r_{M0} \sin \theta}{B_n} \cong 40m \Rightarrow \sigma_h < 20m \quad (8)$$

не очень требовательное ограничение из-за низкого стандартного базового значения интерферограммы, используемой в данном примере.

Говоря о воздействии возможных ошибок на спутниковых орбитах (то есть в векторах состояния спутника), всегда ссылаясь на уравнение, легко увидеть, что ошибка в оценке стандартной базовой линии интерферограммы не позволит правильно компенсировать компоненты фазы, связанные с базовой линией, оставляя *топографическое рассеяние* даже для областей, где ЦМР является чрезвычайно точной, а также фазовое изменение в направлении диапазона (в

идеальном случае параллельных орбит). Фактически, как показано в первой приближенной формуле, ошибка  $\varepsilon_n$  в оценке  $B_n$  приведет к рассеиванию фазы, что вызвано нескомпенсированными компонентами, как показано ниже:

$$\phi_\varepsilon = \frac{4\pi \varepsilon_n}{\lambda} \frac{\Delta r}{r_{MO} \tan \theta} + \frac{4\pi \varepsilon_n}{\lambda} \frac{h}{r_{MO} \sin \theta} \quad (9)$$

В общем, учитывая непараллельные орбиты и приближенные формулы более высокого порядка интерферометрической фазы, можно продемонстрировать, что ошибки векторов состояния спутника могут генерировать два разных вклада фазы:

- Многочлен низкого порядка, наложенный на интерферограмму;
- Фазовый компонент, смодулированный локальной топографией.

Во время обработки радарных данных, я столкнулась и с другими трудностями. Не имея полного представления про изучаемый объект, особенно наземные данные, по которым можно узнать более или менее стабильную точку, можно получить ошибочный результат.

На рисунке 21 приведен пример обработки одних и тех же данных, одним и тем же методом на одну и ту же территорию. Однако, местоположение выбранных стабильных точек кардинально отличаются, соответственно, на рисунке слева можно увидеть небольшое оседание( красным цветом) и вспучивания основной территории (синим цветом). А на рисунке справа, та же территория является относительно стабильной (зеленый цвет обозначает скорость 0мм в год) и имеет более расширенные границы мульды оседания.

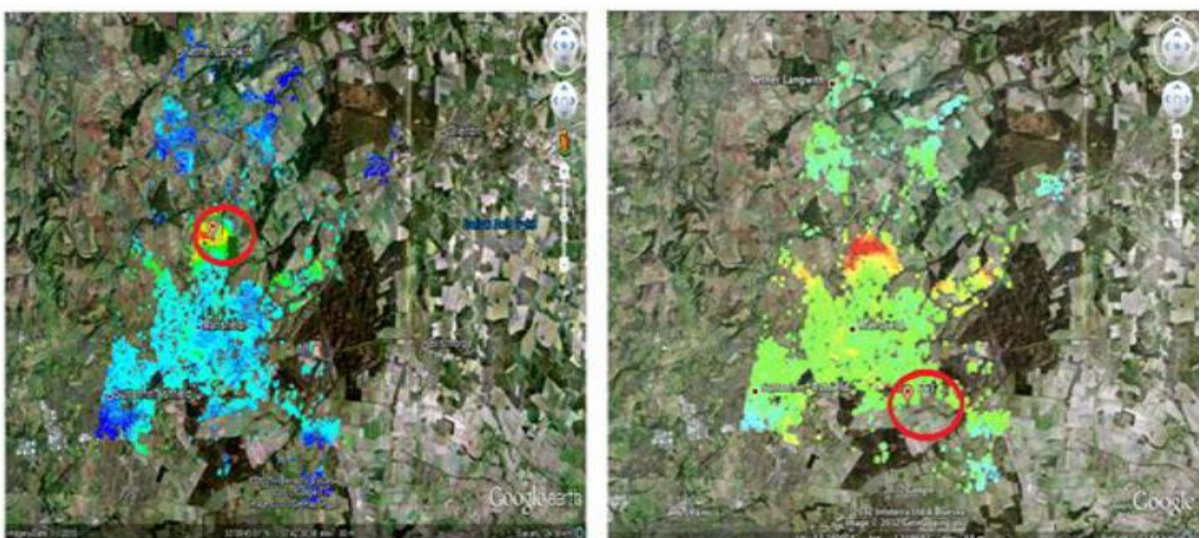


Рисунок 21 - Результат с двумя разными референс точками



Следующая проблема методики обработки снимков-использование больших интервалов между циклами съемки, обусловленные сезонностью съемки или ограничением базисов интерферограмм, могут привести к не правильному развертыванию фазы, и как следствие к ошибочной оценке деформационного состояния объекта.

Рисунок 22 отчетливо показывает, что временные интервалы напрямую влияет на конечный результат. Как видно из рисунка приведенный Ферретти, а также из собственного опыта, короткая базовая линия выдает хорошего качества интерферограммы с меньшим количеством шума. Однако, бывали моменты исключения.

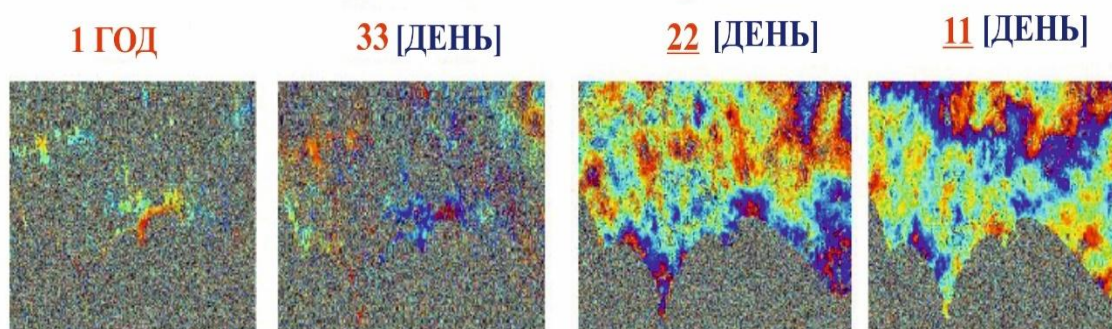


Рисунок 22 - Влияние разных временных интервалов на качество интерферограммы

Один из важнейших моментов обработки является выбор метода обработки в зависимости от многих факторов обрабатываемой территории. На рисунке 23 приведен пример из мирового опыта, когда две разные алгоритмы способны дать кардинально различающую в качестве результат на одну и ту же территорию из одинаковых исходных данных[59]

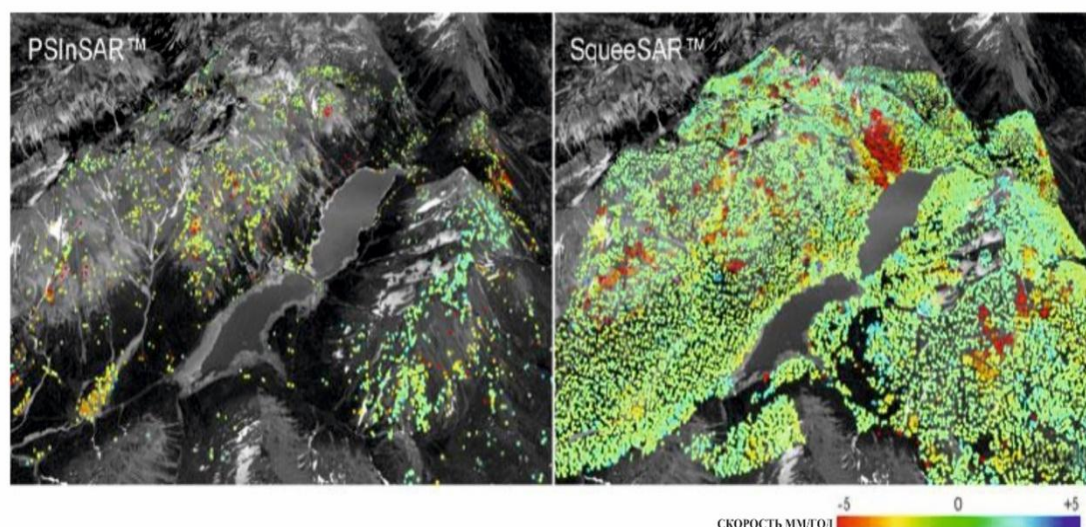


Рисунок 23 - Разница между результатами PSInSAR and SqueeSAR

Кроме выше перечисленных проблем можно привести еще такие факторы как:

- Смещения могут быть измерены только на двухмерных и трехмерных векторах.
- Наблюдение за землей не в режиме реального времени.
- Процесс обработки довольно сложный и длительный. При распаковке и фильтрации возможно потерять некоторые данные.

Таким образом, в заключении хочется сказать, что данные с КА с синтезированной радиолокационной апертурой открывает множество возможностей перед пользователями, которые во многом превосходят наземные технологии. Однако, при обработке этих же данных встречаются проблемы, которые могут существенно повлиять на конечный результат, вплоть до не пригодности результатов. По этому решение этих проблем является одним из главных задач разработчиков алгоритмов обработки и научных специалистов, работающих в этой сфере.

#### **2.4.Выводы**

В данной главе приведены основные теоретические аспекты радиолокационной синтезированной апертуры, 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 апертурой (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 выше перечисленных источников

ошибок является важным аспектом данной исследовательской работы, так как целью данной диссертации является совершенствование существующих методов обработки РСА данных.

В следующей главе представлены результаты обработки РСА данных классическим методом SBAS и инновационным методом ISBAS, на основе которых обосновывались научные положения настоящей диссертации.

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

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

3. Установленный довод, что применение инновационного алгоритма ISBAS позволяет исключать ошибки связанные с выбором опорной точки при мониторинге смещений.

### **3. ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ISBAS ПРИ ОЦЕНКЕ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТЕНГИЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

#### **3.1. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности на территории Тенгизского месторождения с применением космических снимков С-диапазона КА ENVISAT**

Punnet - это программное обеспечение для интерферометрической обработки РСА данных, написанный в виде скрипта в Matlab доктором Эндрю Соутер. В начале работы программа применяла алгоритм SBAS. Однако, с появлением метода инновационного метода ISBAS, программа также успешно применяет данный метод для обработки РСА данных. Для запуска Punnet требуется программное обеспечение Matlab и SNAPHU. SNAPHU - это бесплатное программное обеспечение Стэнфордского университета, которое может работать только на компьютерах с операционной системой Linux или Mac OS. Результат обработанных данных в Punnet может быть показан в Google Earth. Также, развитие ГИС программ таких как ArcGIS и QGIS позволяет применять результаты для дальнейшего анализа [60].

Обработка интерферометрических данных SAR от ENVISAT в этой диссертации была выполнена с использованием двух методов: алгоритмов DInSAR SBAS и DInSAR ISBAS.

Конфигурация PUNNET

создание каталога

вставка файлов с параметрами

настройка Matlab (установить для запуска в каталоге)

запуск программы через команду “punnet \_ set \_ path \_ ENVISAT”  
Запуск “Tengiz subset”  
вычисление “calculate \_ subset \_ ENVISAT”  
создание текстового файла с параметрами “subparams.txt”  
Генерация интерферограмм с запуском команды ” punnet \_ create \_  
interferogram \_ ENVISAT”  
Определение опорной точки  
Создание карты смещений земной поверхности

### **3.1.1. Радарные данные ENVISAT**

Envisat («Спутник окружающей среды») - это большой неактивный спутник наблюдения Земли Европейского космического агентства (ESA), который все еще находится на орбите. Это был крупнейший в мире гражданский спутник наблюдения Земли.

Он был запущен 1 марта 2002 года на борту Ariane 5 из Гайанского космического центра в Куру, Французская Гвиана, на синхронную полярную орбиту Солнца на высоте  $790 \pm 10$  км. Он вращается вокруг Земли примерно за 101 минуту с повторением цикла 35 дней. После потери связи со спутником 8 апреля 2012 года ЕКА официально объявила о завершении миссии Envisat 9 мая 2012 года [61].

Envisat был запущен в качестве спутника наблюдения Земли. Его цель состояла в том, чтобы обеспечить непрерывность полетов европейских спутников дистанционного зондирования, предоставляя дополнительные параметры наблюдений для улучшения экологических исследований [62].

Работая над глобальными и региональными целями миссии, многие научные дисциплины в настоящее время используют данные, полученные от различных датчиков на спутнике [63], для изучения таких вещей, как химия атмосферы, истощение озонового слоя, биологическая океанография, температура и цвет океана, ветровые волны, гидрология. (влажность, наводнения), сельское хозяйство и садоводство, стихийные бедствия, цифровое моделирование рельефа (с использованием интерферометрии), мониторинг морского движения, моделирование атмосферного рассеивания (загрязнение), картография и исследование снега и льда.

Envisat несет в себе набор из девяти приборов наблюдения Земли, которые собирали информацию о Земле (земле, воде, льде и атмосфере) с использованием различных принципов измерения. Десятый инструмент, ДОРИС, обеспечивал руководство и контроль. Некоторые из этих приборов были усовершенствованными версиями приборов, которые использовались в более ранних полетах ERS 1 и ERS 2 и других спутниках. Например, MWR (микроволновый радиометр) был разработан для измерения водяного пара в атмосфере. В то время как, MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) измеряет отражательную способность Земли (поверхности и атмосферы) в солнечном спектральном диапазоне (от 390 до 1040 нм) и передает 15

спектральных полос обратно в наземный сегмент. МЕРИС был построен в Каннском космическом центре Манделье.

Для данной работы были применены данные датчика ASAR. Усовершенствованный радар с синтезированной апертурой (ASAR), работающий в С-диапазоне, ASAR обеспечивает непрерывность с режимом изображения (SAR) и волновым режимом AMI ERS-1/2. Он обладает расширенными возможностями с точки зрения покрытия, диапазона углов падения, поляризации и режимов работы. Эта расширенная возможность обеспечивается значительными различиями в конструкции прибора: антенна с полной активной антенной решеткой, оснащенная распределенными модулями передачи / приема, которая обеспечивает отличные лучи передачи и приема, генерация цифрового сигнала для импульсов «чирп», схема блочной адаптивной квантования, и режим работы ScanSAR путем сканирования луча по высоте.

Для данной исследовательской работы с помощью программного обеспечения Eolisa, с открытым исходным кодом, было идентифицировано количество доступных для Тенгизского месторождения снимков (Рисунок 24). На рисунке 24 интересующая область (Тенгиз) показана эллипсом (главный диаметр 40 км) и квадратами - охват изображений ENVISAT. После чего было подана заявка на бесплатное получение снимков для исследовательской цели в Европейское Космическое Агентство и было получено одобрение [61].

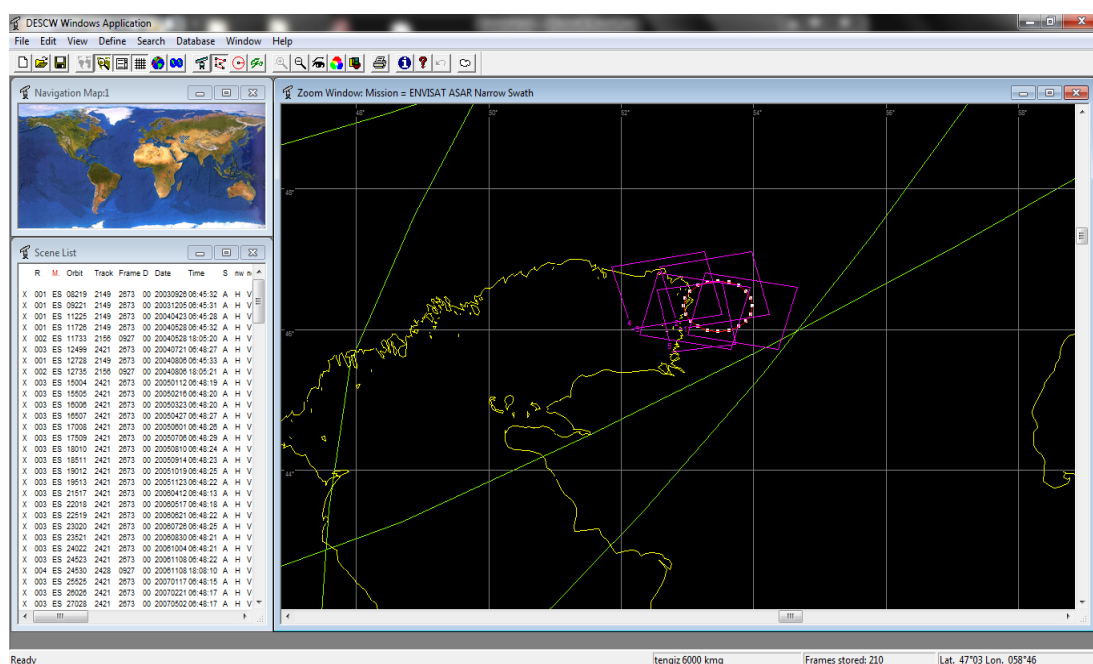


Рисунок 24 - Доступные снимки на заданную область в программном обеспечении Eolisa

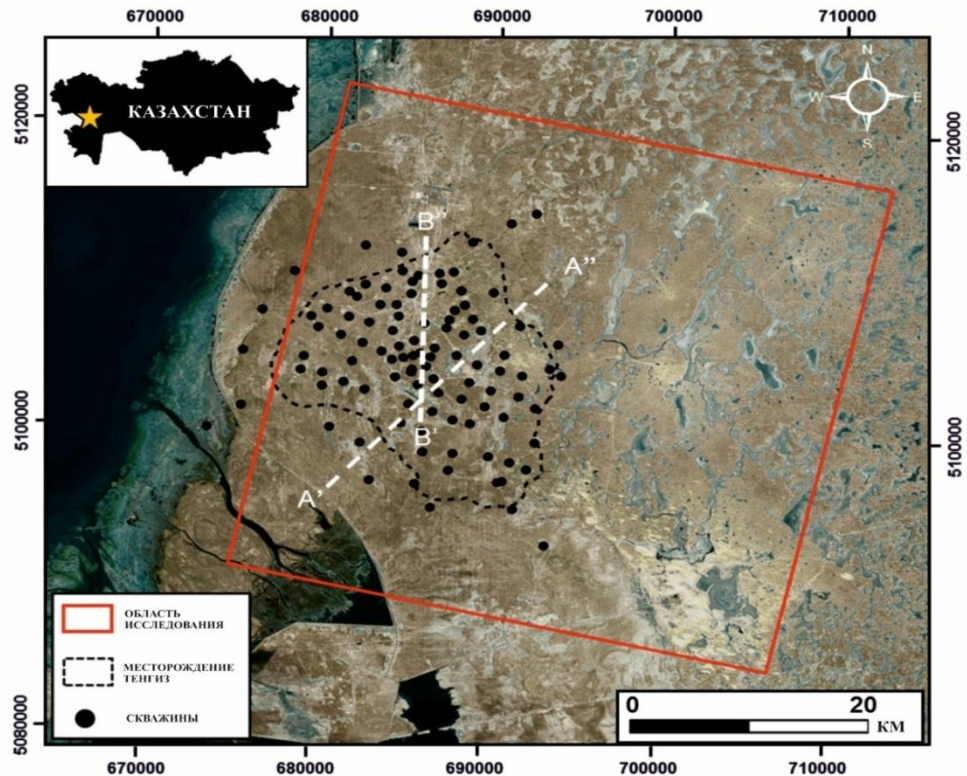


Рисунок 25 - Расположение области исследования и протяженность платформы Тенгизского нефтяного месторождения

В общей сложности 33 нисходящих изображения SAR, полученные в период с 21 июля 2004 года по 25 февраля 2009 года, были использованы для определения средней вертикальной деформации поверхности на исследуемой территории в течение ближайшего пятилетнего периода. Изображения были получены с помощью С-диапазона (длина волны 5,6 см, частота 5,3 ГГц), усовершенствованного радиолокатора с синтезированной апертурой (ASAR) на борту спутника Envisat Европейского космического агентства, находящегося на орбите на высоте 800 км над поверхностью Земли на солнечной синхронная орбита.

Полный набор изображений Envisat ASAR покрывает область приблизительно 100 км × 100 км с пространственным разрешением по поверхности 25 м по дальности и 5 м по азимуту. Однако впоследствии стопка изображений была обрезана до подмножества 42 км × 40 км, охватывающего область исследования (рисунок 25), которая затем была обработана с использованием методов DInSAR.

### 3.1.2 Обработка радарных данных ENVISAT с применением алгоритма SBAS и инновационного метода ISBAS

Радарные данные ENVISAT были обработаны в программном комплексе Punnet. В начале работы с Punnet должен быть создан основной каталог. Для этого проекта был создан каталог с именем «Тенгиз». Эта папка должна

содержать следующие файлы с данными demparams.txt, subparams.txt, sarfiles.txt, configfile, multilook, srtm\_data.

- Configfile.txt - это файл, содержащий информацию о конфигурации для SNAPHU и используемый для процесса развертывания фазы. Этот файл уже существует и предоставляется с помощью скриптов Punnet и не требует каких-либо изменений в нем.

- Файл Srtm\_data.mat содержит преобразованную модель матрицы высот Tengiz, которая была загружена с бесплатного доступного веб-сайта CGIAR (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>).

- Demparams.txt - это файл, который содержит информацию о диапазоне файла DEM и должен содержать минимальные и максимальные широты и долготы области, и он совпадает с максимальными и минимальными координатами при загрузке с веб-сайта.

- Sarfiles.txt - это файл с каталогом космических снимков. Радарные снимки, которые находятся в этом файле имеют такой формат 20040721.N1 по которому можно с легкостью определить дату снимка. На примере, снимок сделанный 21 июля 2004 года. В этом файле находятся тридцать три нисходящих изображения PCA, полученные в период с 21-го июля 2004 года по 25-ое февраля 2009 года, для расчета средней вертикальной деформации поверхности в исследуемой области за отрезок времени. 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 км × 100 км с пространственным разрешением по земле 25 м по дальности и 5 м по азимуту, был обрезан до подмножества 42 x 40 км, охватывающего исследуемую область (рис. 1) и затем обрабатывался с использованием методов Анализа Дифференциальной PCA с интерферометрической синтезированной апертурой (DInSAR).

- Multilook.txt - файл с указанием номеров блока корегистрации, размера в диапазоне и размера по азимуту.

- Subparams.txt - это файл с экстендом интересующей области (Тенгиз), который содержит координаты выбранной области.

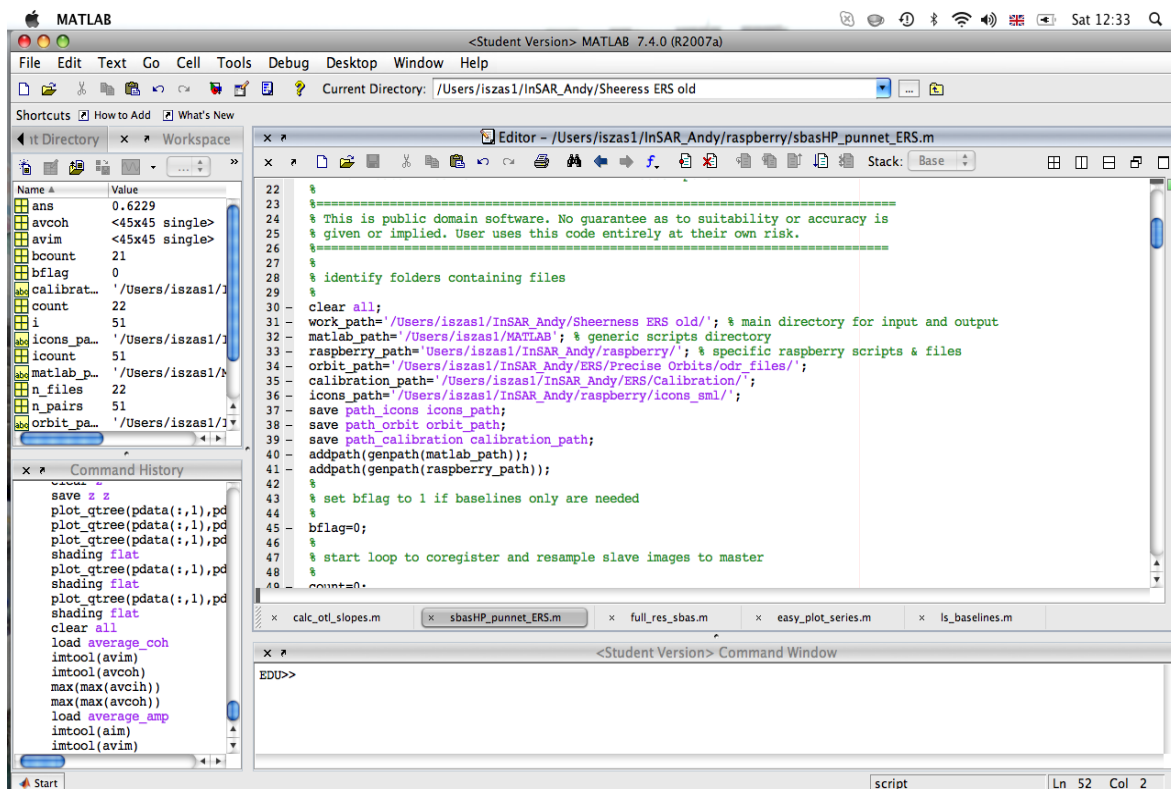


Рисунок 26 - Конфигурация Punnet

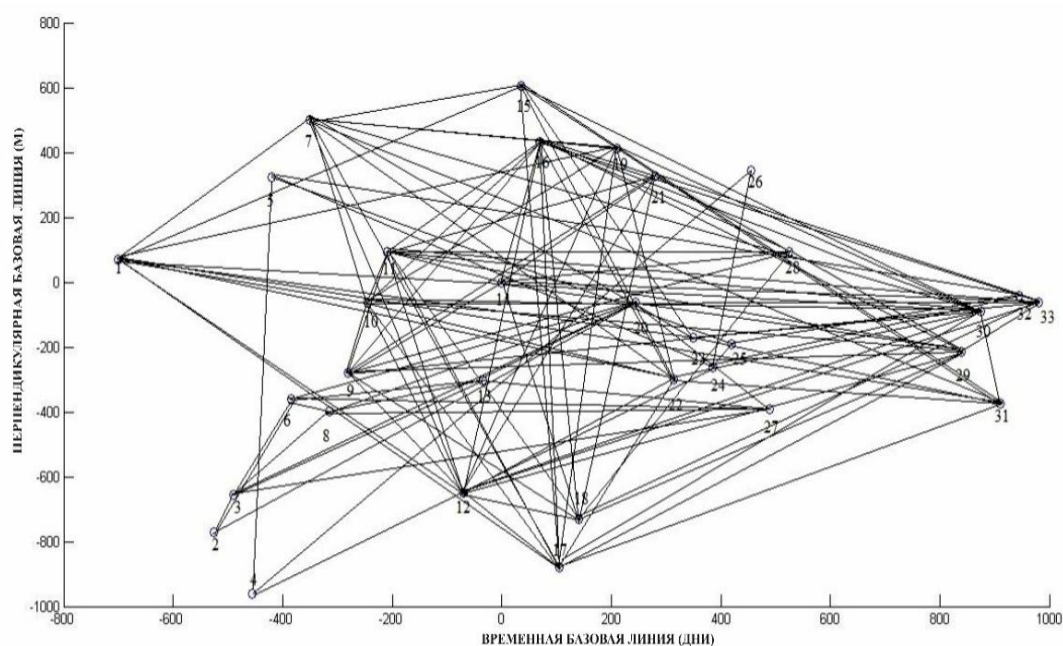
Так как, программное обеспечение Punnet работает в Matlab, была настроена директория очных файлов. Для этого необходимо указать путь в файле «punnet \_ set \_ path \_ ENVISAT», который находится в raspberry. В качестве примера показан фиксированный каталог в этом файле, который использовался для обработки Тенгиза:

- work \_ path = '/ Users / izsas1 / ELMIRA / Tengiz /'; - main directory for input and output files
- matlab \_ path = '/ Users / izsas1 / ELMIRA / MATLAB /'; - generic scripts directory
- raspberry \_ path = '/ Users / izsas1 / ELMIRA / raspberry /'; -specific raspberry scripts & files
- orbit \_ path ='/ Users / izsas1 / ELMIRA / ENVISAT / Precise Orbits /';
- calibration \_ path ='/ Users / izsas1 / ELMIRA / Calibration /';
- icons \_ path: ='/ Users / izsas1 / ELMIRA / ENVISAT / icons /';

После того как настроили все исходные файлы, все 33 ENVISAT ASAR данные прошли процесс под названием корегистрация.

Изображения были совместно зарегистрированы (корегистрация) с точностью до субпикселя по главной сцене, полученной 16 февраля 2005 года (рисунок 27, 28). 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  $100 \text{ м} \times 100 \text{ м}$ .





км

Рисунок 27 - Базовые линии между снимками для месторождения Тенгиз

Следующим шагом при обработке данных является создание интерферограммы. Интерферограммы могут быть сформированы из любых 2 изображений, а из 33 изображений может быть создано около 500 пар. Однако обработка огромного количества интерферограммы является проблематичным процессом. В Punnnet для создания интерферограммы используется метод Multiple Master, который использует все возможные пары. Однако, фиксируя перпендикулярную и временную базовую линию, Пуннет уменьшил количество пары дифференциальных интерферограмм. 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.

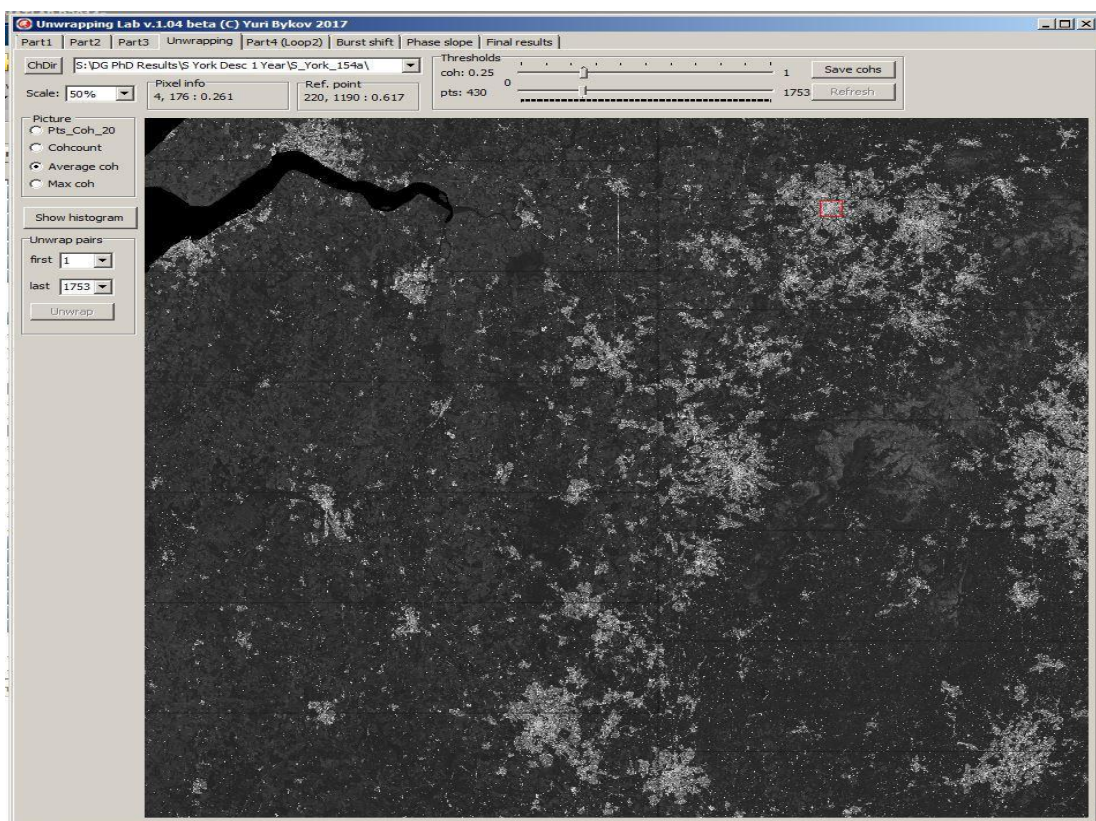


Рисунок 28 - Средняя когерентность заданной территории

Для создания интерферограммы применялась функция:

`Runnet_создать_интерферограмма_ENVISAT`

Это самый длительный процесс, который занял несколько дней, и во время обработки компьютер не следует выключать и переводить в спящий режим. В случае создания интерферограммы для Тенгиза это заняло два дня из-за большой площади. Однако, 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.

На рисунке 29 показана созданная дифференциальная интерферограмма. Многие пары имеют шум.

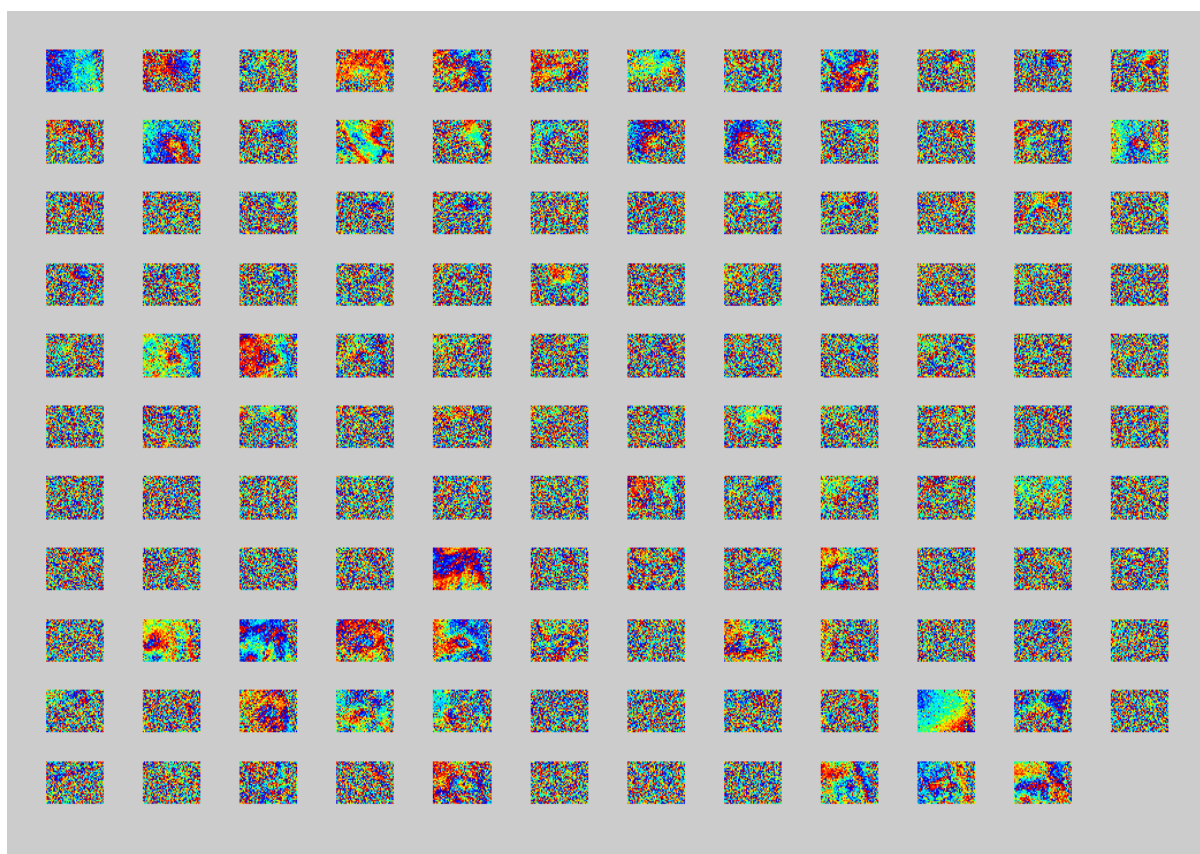


Рисунок 29 -Сгенерированная интерферограмма

Стандартный анализ когерентного рассеивателя (scatterer analysis) был реализован на основании многовариантных данных, следуя базовой процедуре, описанной Lanari [64], так что обрабатывались только пиксели со средней когерентностью  $\geq 0.25$  на каждой интерферограмме. В этой диссертации данный подход будет называться техникой SBAS. Напротив, метод ISBAS определяет подходящие пиксели для анализа путем включения минимального стандарта качества наряду с когерентностью [65]. 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 [66]. 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 Многоразового 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) пикселей [67].

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 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.

## **3.2. МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТЕНГИЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА ISBAS И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С-ДИАПАЗОНА КА SENTINEL**

### **3.2.1. Радарные данные Sentinel-1**

Продукты Sentinel-1 - это первые из семейства спутников, разработанные Европейским космическим агентством (ЕКА) специально для оперативных нужд программы Copernicus, возглавляемой Европейской комиссией (ЕК), целью которой является предоставление информации для улучшения управления окружающей средой, изменения климата и гражданская безопасность (Миссия Sentinel-1 фактически состоит из двух спутников: Sentinel-1A был запущен 3 апреля 2011 года; и Sentinel-1 B запущен в начале 2016 года. Оба спутника размещены на почти полярной солнечно-синхронной орбите на высоте около 693 км (3,4,8). Основным инструментом является С-диапазон РСА, работающий на частоте 5,405 ГГц. Период повторения для одного спутника составляет 12 дней, а с появлением второго спутника на орбите, временная разница уменьшается до 6 дней. Основные характеристики продуктов Sentinel-1 приведены в таблице 3 а разница между режимами

показана на рисунке 30. Компания Совзонд отмечает высокую фазовую стабильность радара и его корректную орбиту, что делает эти снимки пригодными для многих научно-технических задач, в том числе и для мониторинга. Для данного исследования используются продукты Sentinel-1 IW Single Look Complex (SLC).

Таблица 3 - Характеристика продуктов Sentinel-1

Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км	Поляризация
Stripmap (SM; single-look)	4x5	80	Одинарная (по выбору — HH или VV) или двойная (по выбору — HH/HV или VV/VH) VV/VH)
Interferometric Wide Swath (IWS; single-look)	5x20	240	
Extra Wide Swath (EWS; single-look)	25x80	400	
Wave mode (WM; single-look)	20x5	20x20	

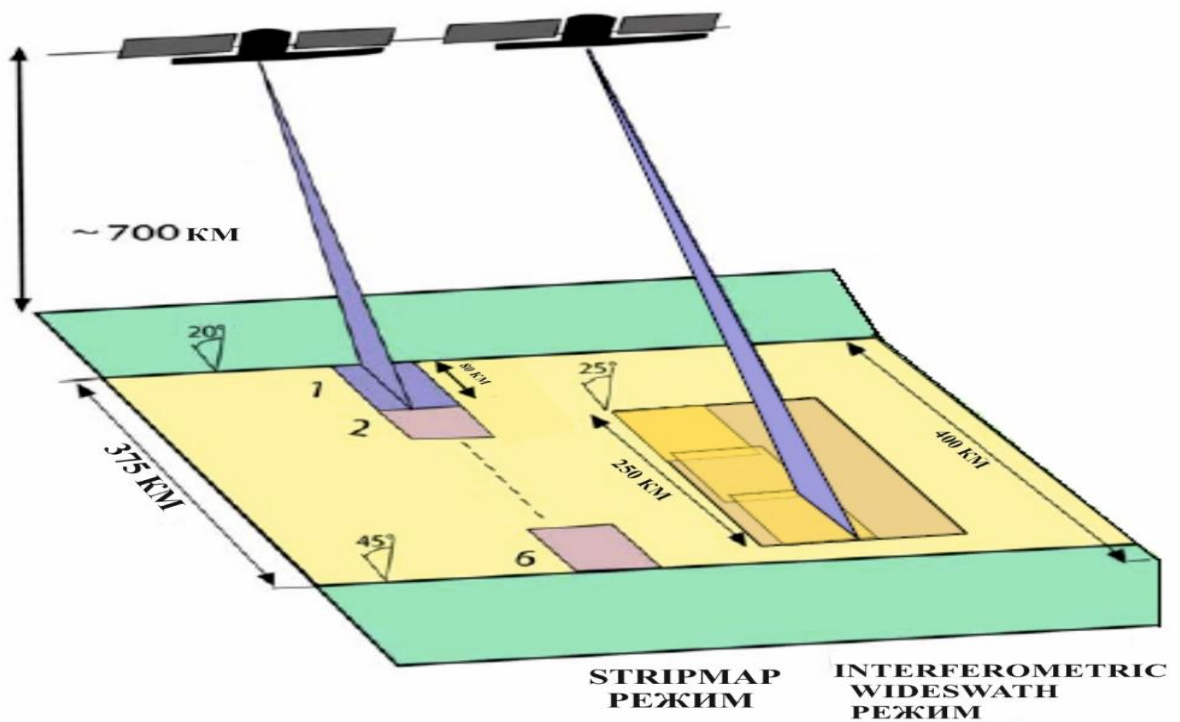
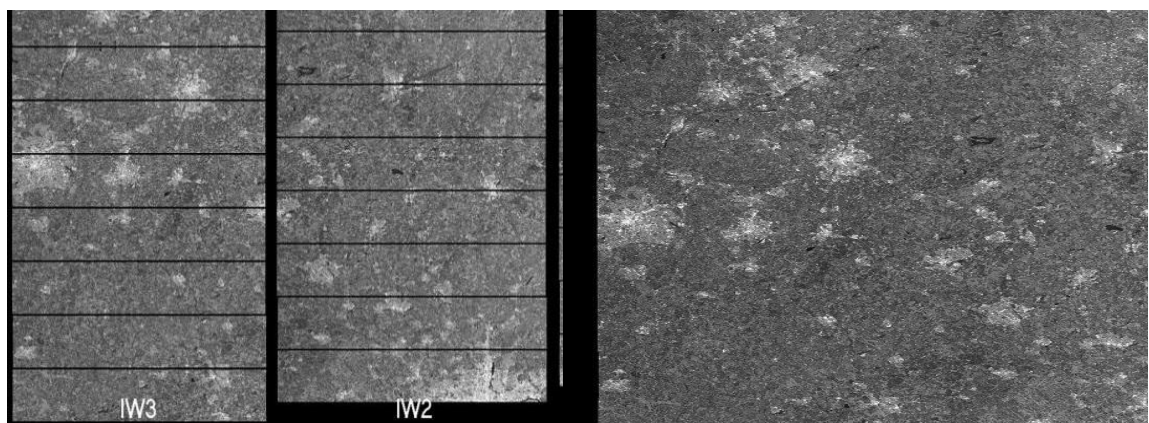


Рисунок 30 - Разница между снимками Stripmap и IW Swath Mode

Продукт IW SLC 1 уровня представлен в виде отдельных подкадров[68]. Каждый подкадр состоит из серии всплесков, в которых каждый всплеск был обработан как отдельный SLC-снимок. В азимутальном порядке времени каждый всплеск включается в подкадру с демаркацией черного заполнения между ними. Для полного визуального представления продуктов IW SLC на рисунке 31 приведена разница между снимками IW SLC и IW GRDH.



А)

Б)

Рисунок 31 - Разница между снимками А) IW SLC и Б) IW GRDH

### 3.2.2. Обработка радарных данных Sentinel-1 с применением алгоритма SBAS

Как упоминалось выше, для обработки продуктов Sentinel-1 могут использоваться стандартные процедуры алгоритма SBAS(6,9,10), за исключением подпункта 2 и 3, приведенных в таблице

Чтобы создать продукт IW большой площади из трех поставляемых подкадров, необходимо выполнить два отдельных процесса [65,66]:

Дебарстинг. Данный процесс объединяет отдельные всплески из одного подкадра в единую систему, где расстояние между азимутальными линиями является постоянным от начала до конца и не существует демаркации черной линии между субсеквенционными всплесками.

Слияние. После применения дебарстинг к каждой из трех подкадров (то есть IW1, IW2 и IW3), они должны составить один широкоформатный продукт в виде мозаики, где интервал между столбцами постоянный от ближнего к далекому, площадь подкадров находится по азимуту. Процесс мозаичных всплесков из трех разных рядов показан на рисунке 31. Для продуктов Sentinel-1 IW SLC линии и столбцы всплесков и подкадров были повторно отобраны в общий пиксель.

Выше перечисленное означает, что дебарстинг и слияние могут быть выполнены путем смещения субизображений только в целых числах строк и столбцов, и поэтому не требуется передискретизация исходных значений пикселей для формирования продукта с большой площадью. Еще одна характеристика данных SAR Sentinel-1 TOPS SAR заключается в том, что фаза продукта быстро изменяется по азимуту и может быть нелегко передискретизирована, поскольку разность фаз между соседними пикселями может быть неоднозначной. Это хорошо известный эффект и может быть решен с помощью первого вычитания симуляции быстро меняющейся азимутальной фазы (дерампинга), повторной дискретизации остатка и окончательного добавления обратно повторяющейся фазы (повторного изменения). Для данных Sentinel-1 известна функция *deramping*. Оставшаяся большая разница между данными Sentinel-1 TOPS и *stripmap* данными заключается в том, что любая неточность менее одной тысячи сантиметров одного пикселя при совместной регистрации (например, эквивалентная до 2 см в азимуте) может приводить к заметным фазовым скачкам на отдельные всплески. Однако, с помощью типичных методов преобразования трудно достичь более высоких уровней точности, например, метод спектрального разнесения, реализованный такими авторами, как Lanari, Wegmüller [70]. Метод спектрального разнесения обычно требует анализа фаз прямого и обратного просмотра в областях перекрытия всплесков. Это дает больше вычислительной возможности, чем простые методы корреляции амплитуды, которые широко используются для продуктов *stripmap*. Кроме того, для достижения наивысшей точности фаз, она должна применяться к каждой интерферометрической паре, которая добавляется к процессу обработки. Например, для N стриповых продуктов, только N-1 пары

должны быть корегистрированными; для алгоритма с несколькими мастерами, такого как SBAS, это будет увеличиваться во много раз, поскольку число пар намного больше, чем  $N-1$ , в зависимости от применяемых базовых и временных порогов.

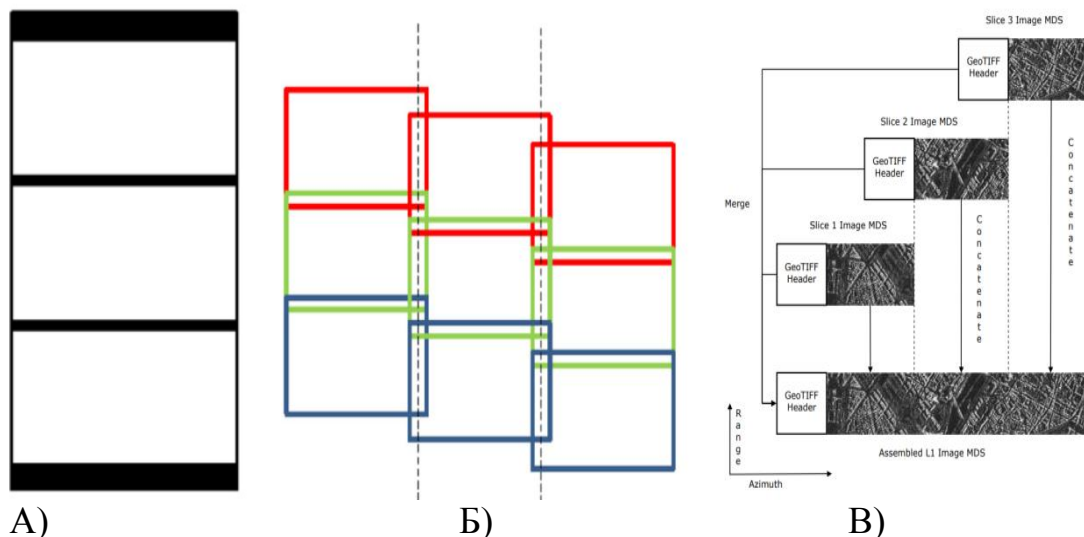


Рисунок 32 - А) Расположение всплесков в подкадрах IW. (Б) Структурная схема Sentinel-1 с небольшими перекрытиями между всплесками и субкадрами В) Сборка изображения L1 MDS

Были скачены другие доступные снимки на эту территорию. Для получения окончательного и успешного результата было использовано 44 снимка Sentinel-1 IW SingleLook Complex (SLC), что составляет в паре всего 22.

Данные для этой области были доступны с октября 2016 года и к моменту обработки данных были выбраны данные до октября 2017 года. Процессы дебарстинга и слияния прошли удачно и с использованием широкомасштабного снимка были созданы дифференциальные интерферограммы. Один из наиболее лучших дифференциальных интерферограм приведен на рисунке 33, где в полученном результате можно увидеть места перекрытия подкадр. Созданные дифференциальные интерферограммы были использованы для дальнейшей обработки методом SBAS.



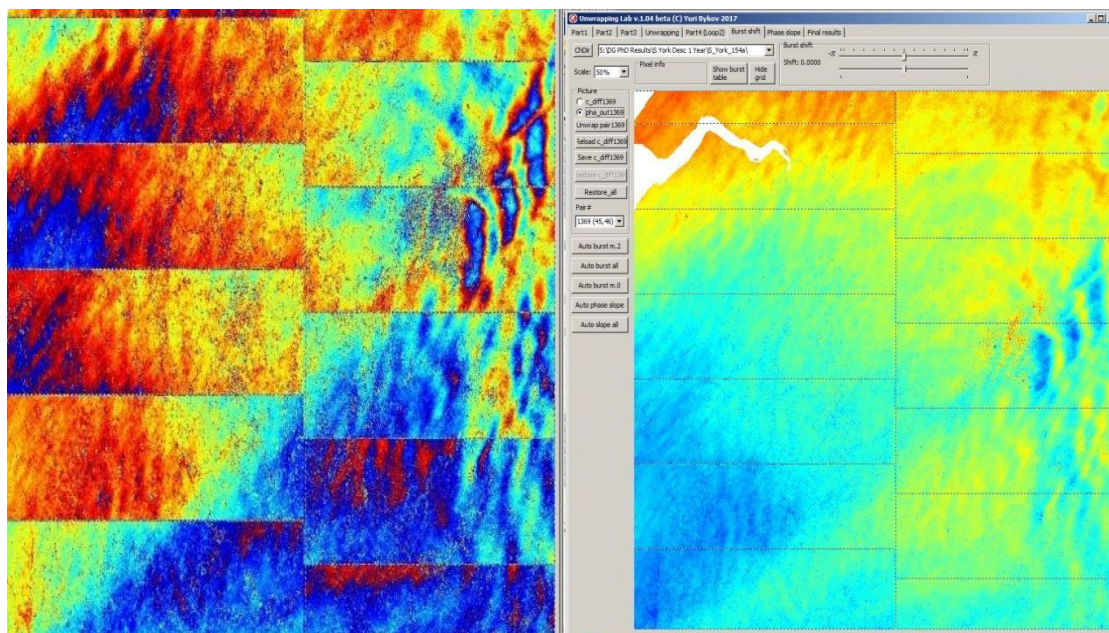


Рисунок 33 - Дифференциальная интерферограмма после процесса 1) дебарстинг и слияние и 2) после развертки фаз

### 3.3. Результаты обработки и оценка точности

Сравнение охвата ENVISAT DInSAR и пространственных моделей деформации

Наземные измерения средней вертикальной скорости, рассчитанные по данным ENVISAT (2004–2009 гг.) с использованием методов SBAS и ISBAS, приведены на рисунке выше. В общей сложности 102 398 когерентных пикселей было идентифицировано с использованием метода SBAS, что соответствует среднему значению  $\sim 60$  измерений / км<sup>2</sup>. 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. Включение в анализ пикселей, которые демонстрируют прерывистую когерентность, заметно увеличивает пространственный охват и плотность измерений движения грунта. При 366 842 пикселях число измерений наземного движения ISBAS в 3,6 раза больше, чем для SBAS, что составляет в среднем  $\sim 215$  измерений / км<sup>2</sup>. В целом, результаты ISBAS охватывают 54% от общей площади исследования (с точки зрения количества пикселей) 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 [65].

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.

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 [71]. 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 [72]. Кроме того, скорость оседания сильно коррелирует с различными областями порового давления, выявленными Дагистановой [71], что дает прямое полуколичественное понимание геомеханических характеристик пласта в течение настоящего периода (Рисунок 34). Также очевидна более слабая вторичная корреляция с глубиной в пласте [73], когда связанные с этим изменения напряжений легче передаются на поверхность через более тонкие слои покрывающего грунта над центральной и внешней платформой.

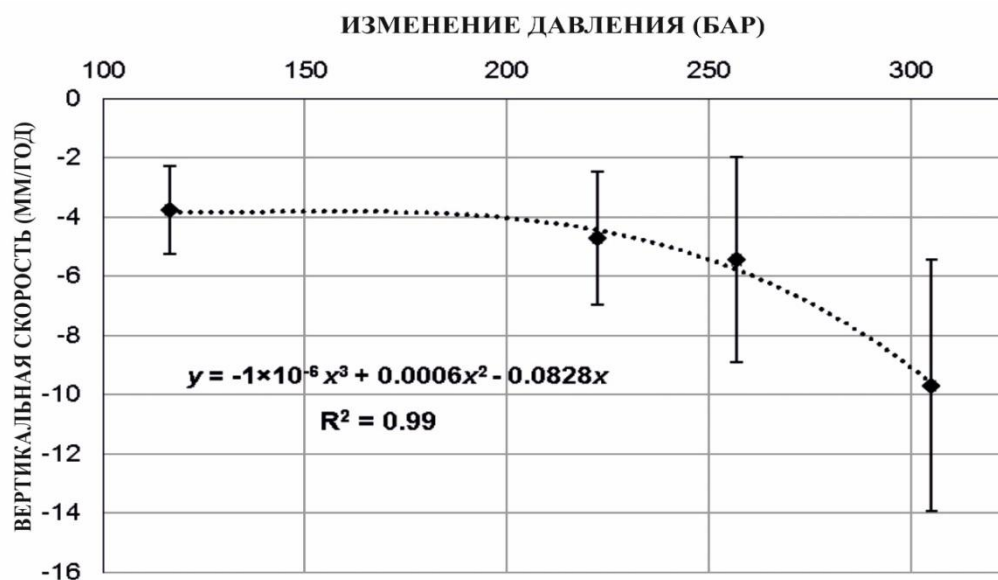


Рисунок 34. Корреляция между снижением давления (между 2009 г. и при первом постукивании) и средней скоростью оседания, полученной из ENVISAT ISBAS в пределах областей давления, определенных Дагистановой. Планки погрешностей представляют стандартное отклонение вертикальных скоростей внутри регионов.

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 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 (как описано в разделе 3.1), данное предположение может быть не совсем точным, и поэтому важно понимать, что полученные здесь вертикальные скорости являются ограниченной приблизительной точностью истинного движения земли.

Жантаев и др. применили анализ SBAS к данным ENVISAT ASAR и ALOS PLS 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. [44] 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 [74]. Тем не менее, результат ALOS SBAS Жантаева 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

[72] также обработали данные ENVISAT за 2004-2007 гг., чтобы определить параметры для оптимизации их геомеханического моделирования. Данные были обработаны с использованием метода SqueeSAR [59], 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 до -20 мм / год, которые предполагаются почти полностью вертикальными, учитывая небольшой угол падения. Comola 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 / км<sup>2</sup> и 50 измерений / км<sup>2</sup>, соответственно, что приводит к ~ 150 000 измерениям.

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. 6а). Эта область перекрывает фланг пласта, который, в отличие от областей платформы и обода, подвергнулся бессистемному снижению давления в течение второй половины периода времени, охватываемого анализом DInSAR [75]. 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 нефтегазоперерабатывающем заводе (Рисунок 35b). Сера образуется в качестве побочного продукта процесса нефтепереработки, и движение свидетельствует о неуклонном уменьшении высоты отвала, либо путем осаждения, либо в результате действий по удалению всех отвалов с площадки в течение 2007–2015 годов.

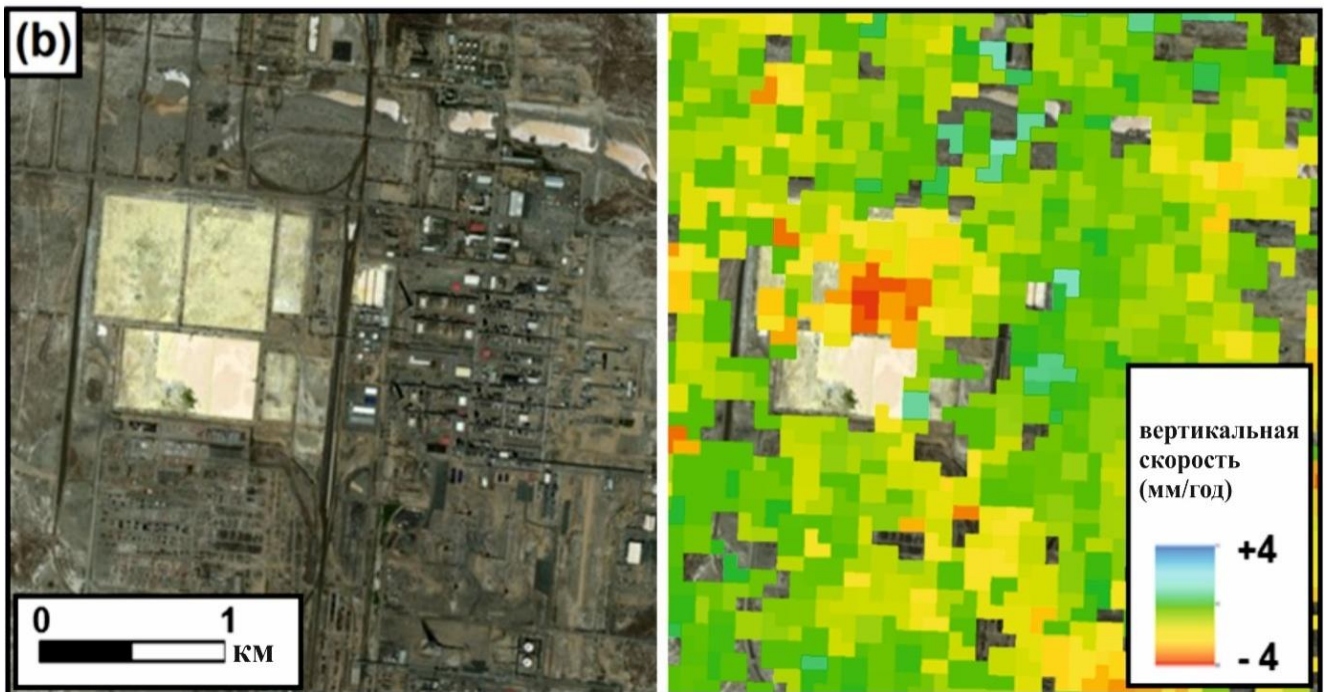
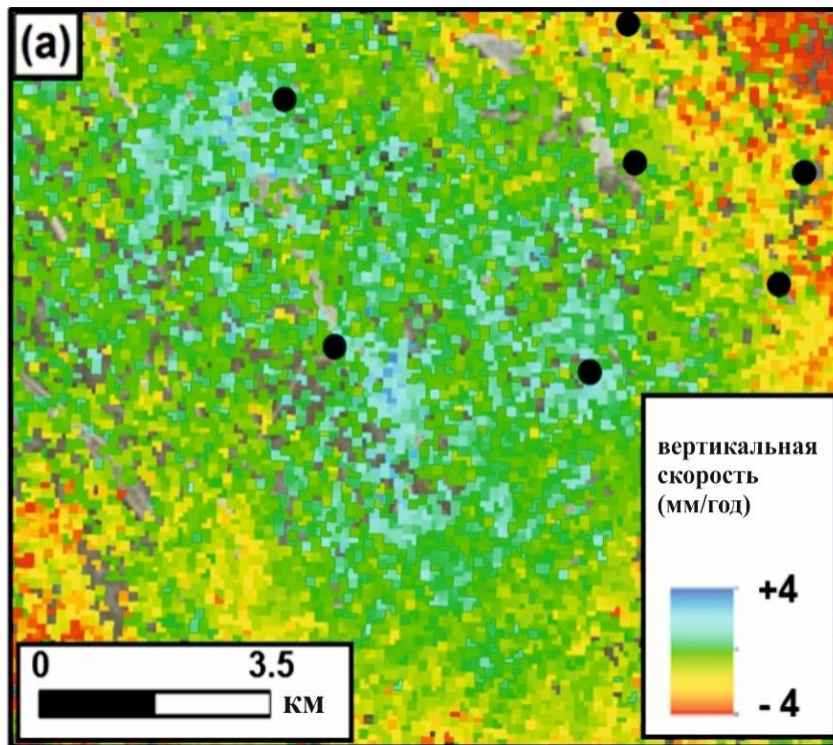


Рисунок 35 - Локализованная деформация, выявленная с помощью метода ISBAS, примененного к ENVISAT. (а) Зона стабильности и поднятия, наблюдаемая на юго-восточной стороне нефтяного месторождения Тенгиз, и (б) проседание над серными площадками. Черные круги представляют собой расположения скважин

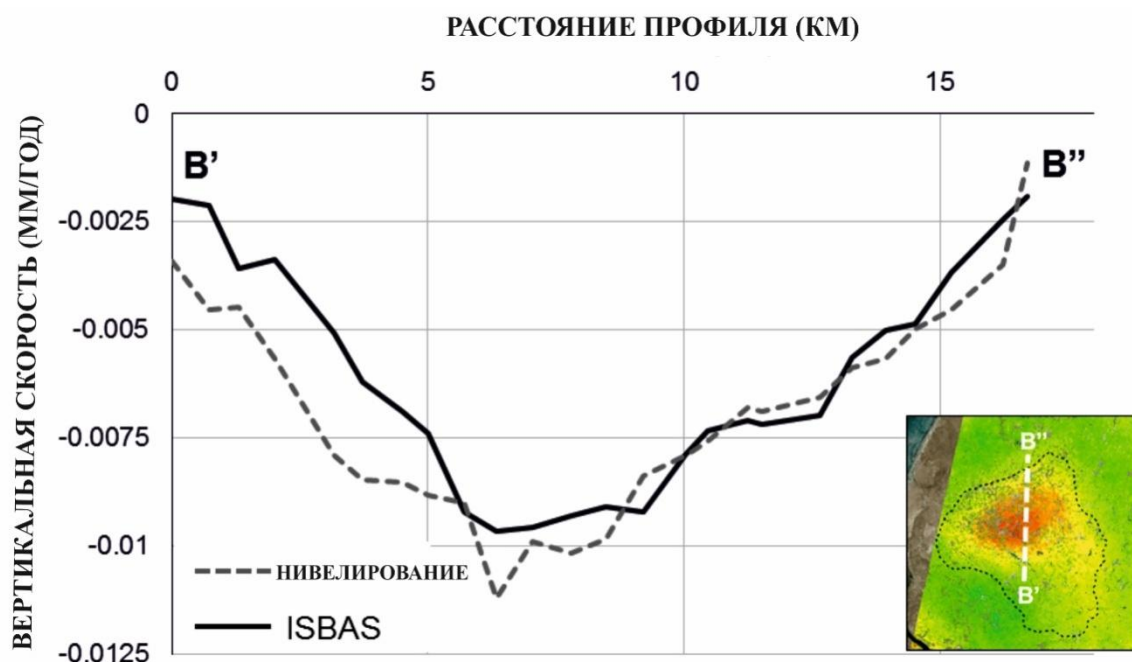


Рисунок 36 - Сравнение нормированных по продуктивности скоростей деформации Тенгизского пласта, измеренных с использованием нивелирования (за период 2001–2005 гг.) и ISBAS (2004–2009 гг.). Расположение профиля указано на вставке

Таблица 4 - Прямое статистическое сравнение между уровнями деформации (2001-2005) и ENVISAT ISBAS (2004-2009)

Тип измерения	минима л (мм / год)	максима л (мм / год)	Средне е (мм / год)	Средняя величин а (мм / год)	Стандартно е отклонение (мм / год)
Нивелирование	-1.0	-9.9	-6.1	-6.1	2.1
ISBAS	-2.7	-13.7	-8.7	-9.8	3.6

**Количество измерений = 25**

**Средняя абсолютная погрешность = 2.71мм / год**

**среднеквадратическая ошибка (RMSE) = 3.18мм / год**

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.

### **3.4. Сравнение результатов с наземными инструментальными наблюдениями и данными сейсмологии**

Высокоточное нивелирование выполняется в рамках программы геодинамического мониторинга на месторождении Тенгиз. Нивелирование выполняется относительно устойчивых ориентиров, предназначенных для обнаружения антропогенной деформации поверхности и смещений по активным тектоническим нарушениям в регионе. Доступные повторные измерения нивелирования, совпадающие с периодом, охватываемым анализом DInSAR, получены из профиля север-юг, проходящего через центр пласта (рис. 1). Профиль состоит из 25 контрольных ориентиров нивелирования, обследованных с точностью до  $\pm 0,4$  мм с использованием прецизионного уровня Leica WILD NA3003 [76]. Повторное нивелирование было использовано для расчета средней скорости вертикального смещения вдоль профиля в период с 2001 по 2005 год. Хотя эти данные ограничены по количеству и только частично совпадают с точки зрения временного охвата, они предоставляют ценный, независимый способ аутентификации измерений деформации грунта, полученных на основе DInSAR. Чтобы достичь этого, каждое измерение нивелирования сравнивается с его совпадающим измерением ISBAS, в то же время, понимая разницу между дискретным точечным измерением и площадными ( $100 \text{ м} \times 100 \text{ м}$ ) измерениями DInSAR. Поэтому сравнение должно быть сделано в предположении, что точечные скорости нивелирования являются репрезентативными для их более широкого окружения.

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 4). 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 устойчивость тогда как анализ DInSAR фиксирует существенный рост добычи нефти после 2007 года, который, вероятно, привел к увеличению уплотнения пласта и деформации грунта.

Для объяснения данного несоответствия, два набора измерений движения грунта были нормализованы к совокупной добычи между 1993 и концом

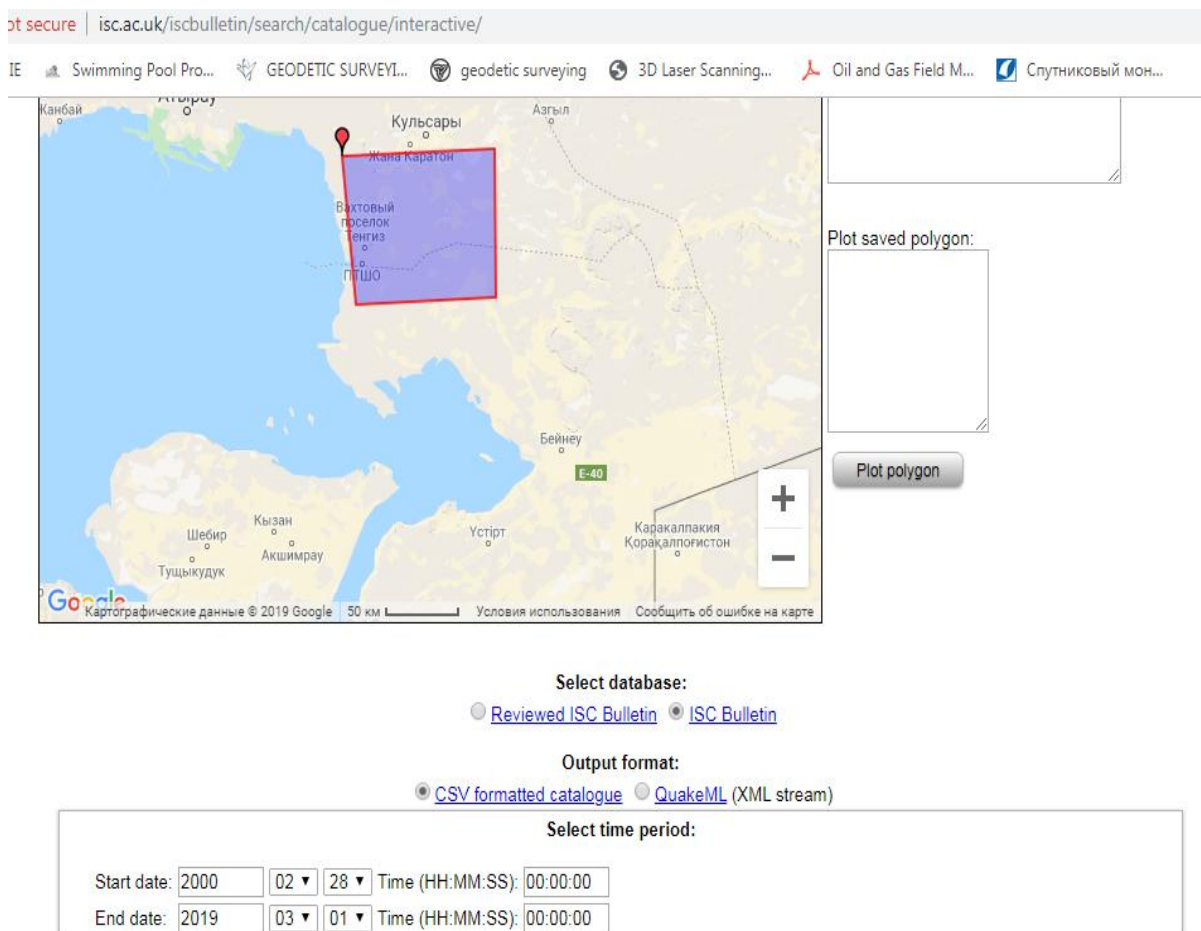


Рисунок 37- Сейсмологические данные на заданную территорию каждого периода измерения (то есть кумулятивная добыча за 1993–2005 и 1993–2009 годы для нивелирования и данных DInSAR, соответственно).

Это приводит к более высокому уровню соответствия между тенденциями деформации, что четко подтверждает наличие чаши оседания над пластом. 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.



EVENTID,AUTHOR	DATE	TIME	LAT	LON	DEPTH,DEPTH	DEPTH,DEPTH	AUTHOR	TYPE	MAG			
<a href="#">604712545,ISC</a>	,2014-05-23,	21:03:53.44,	46.1025,	53.4730,	35.0,TRUE	,ISC	,mb	,3.6,IDC	,mb	,3.7,IDC		
<a href="#">607673961,ISC</a>	,2015-07-31,	11:58:34.77,	46.2151,	53.6253,	0.0,TRUE	,ISC	,mb	,3.5,IDC	,mb1	,3.8,IDC		
<a href="#">608636932,ISC</a>	,2016-04-24,	01:46:55.66,	46.1577,	53.4058,	10.0,TRUE	,ISC	,mb	,3.3,IDC	,mb	,3.3,IDC		
<a href="#">612037413,NNC</a>	,2017-04-11,	06:15:56.41,	46.7794,	54.5392,	0.0,	,NNC	,mb	,2.6,NNC	,mpv	,2.2,		
<a href="#">612053562,NNC</a>	,2017-06-18,	15:47:19.54,	46.7475,	54.4874,	0.0,	,NNC	,mb	,3.0,NNC	,mpv	,2.5,		
<a href="#">612054144,NNC</a>	,2017-07-01,	08:11:27.59,	46.2770,	53.7254,	0.0,	,NNC	,mb	,2.9,NNC	,mpv	,2.4,		
<a href="#">612056350,NNC</a>	,2017-08-16,	08:44:34.68,	46.4347,	53.5861,	0.0,	,NNC	,mb	,3.2,NNC	,mpv	,2.8,		
<a href="#">612061385,NNC</a>	,2017-12-03,	09:31:11.82,	46.2570,	53.6495,	0.0,	,NNC	,mb	,2.6,NNC	,mpv	,2.1,		
<a href="#">612062039,NNC</a>	,2017-12-19,	04:42:35.37,	46.3640,	54.3214,	0.0,	,NNC	,mb	,2.6,NNC	,mpv	,2.1,		
<a href="#">612062351,NNC</a>	,2017-12-25,	17:38:37.08,	46.5036,	53.6784,	0.0,	,NNC	,mb	,2.9,NNC	,mpv	,2.5,		
<a href="#">612164021,NNC</a>	,2018-03-12,	03:01:44.82,	46.6150,	53.8319,	0.0,	,NNC	,mb	,2.6,NNC	,mpv	,2.2,		
<a href="#">612164527,NNC</a>	,2018-03-21,	02:20:39.10,	46.6641,	54.3188,	0.0,	,NNC	,mb	,2.5,NNC	,mpv	,2.1,		
<a href="#">614587008,NNC</a>	,2018-10-05,	04:32:16.18,	46.1502,	53.7686,	0.0,	,NNC	,mb	,3.1,NNC	,mpv	,2.7,		
<a href="#">614616393,NNC</a>	,2018-11-06,	18:32:55.89,	46.3602,	53.6357,	0.0,	,NNC	,mb	,3.2,NNC	,mpv	,2.7,		
<a href="#">614616596,NNC</a>	,2018-11-11,	02:31:32.84,	46.3949,	53.8287,	0.0,	,NNC	,mb	,2.5,NNC	,mpv	,2.1,		
<a href="#">614616606,NNC</a>	,2018-11-11,	07:56:11.10,	46.3786,	53.7587,	0.0,	,NNC	,mb	,3.1,NNC	,mpv	,2.7,		
<a href="#">614616609,NNC</a>	,2018-11-11,	09:50:34.70,	46.6362,	53.4091,	0.0,	,NNC	,mb	,3.1,NNC	,mpv	,2.7,		
<a href="#">614626126,NNC</a>	,2018-12-16,	16:45:25.13,	46.4545,	53.6027,	0.0,	,NNC	,mb	,3.2,NNC	,mpv	,2.8,		

Рисунок 38 - Сейсмологические данные на заданную территорию

Кроме того, сравнение полученных результатов с данными сейсмологии полученных с ISN, косвенно доказывает наличие мульды оседания. Так как, анализ данных за последние 10 лет показывает существенное увеличение количества землетрясений в заданной территории (рисунок 37,38).

Метод ISBAS, примененный к данным Sentinel-1 (2016–2017), дает новое представление о недавней деформации грунта над месторождением Тенгиз (рис. 8а). 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 [77]. Потенциальный, хотя и тонкий, северо-западно-юго-восточный линеймент, образованный разрывом в скорости проседания вкост простирания, может обнаруживаться в данной области (Рисунок 39 б).

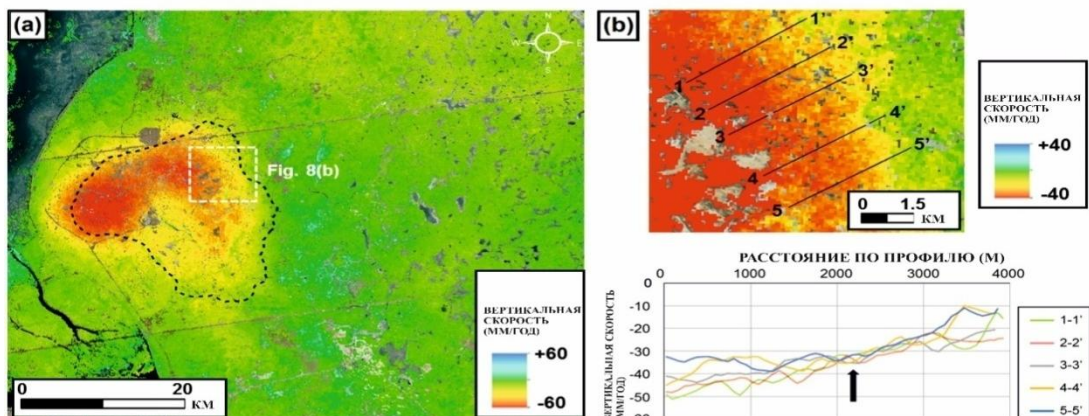
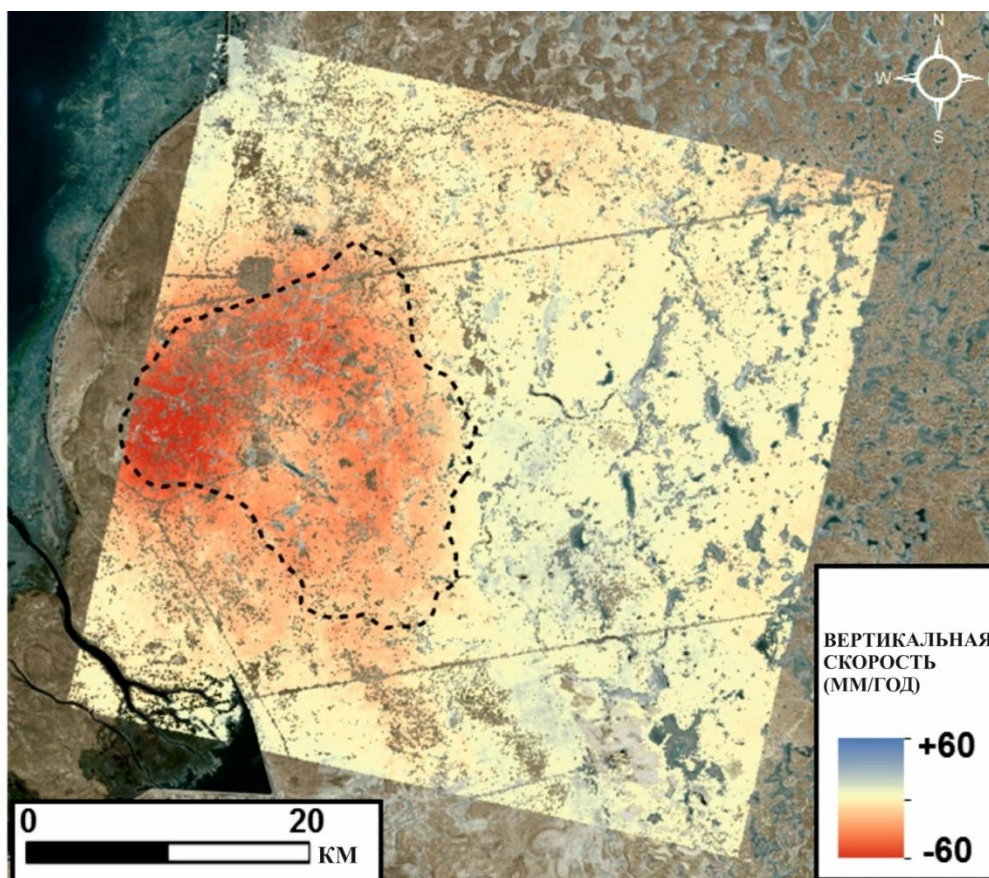


Рисунок 39. (а) Недавняя карта деформации грунта исследуемой области, показывающая вертикальные скорости, вычисленные по данным Sentinel-1 (2016–2017) с использованием метода ISBAS. (б) Масштабированное

*подмножество карты деформации и профилей поперечного сечения на восточной окраине нефтяного месторождения. Черная стрелка указывает на потенциальный тонкий уклон. Недавняя деформация грунта*



*Рисунок 40 - 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 (Рисунок 40), совпадающих с зонами сверхпроницаемости. Такие районы были подвержены недавней разработке месторождений из-за их высокой плотности трещин, и впоследствии являются самыми высокопродуктивными зонами [78]. 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 [79]. 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 [80], потеря чистого объема над основной платформой и областью обода только на период 2016–2017 гг. оценивается в  $5,61 \times 10^6$  м<sup>3</sup> / 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 [83], который призван увеличить добычу на месторождении.

### **3.5. Выводы**

Данная глава является одним из основных глав, в котором приводится подбор и скачивание радиолокационных данных Европейского Космического Агентства ENVISAT ASAR и Sentinel-1, обработка данных в программном комплексе Punnet с применением SBAS и ISBAS методов [84].

В настоящем исследовании оценивается возможность применения технологии ISBAS DInSAR для мониторинга деформации грунта над нефтяным месторождением Тенгиз в Казахстане. Анализ данных ENVISAT SAR за период 2004–2009 гг. выявил четко очерченную чашу, оседающую с максимальной скоростью -15,7 мм / год, что подтверждается данными других исследований DInSAR [85] и подтверждается данными нивелирования и данных сейсмологии [86]. Тем не менее, расширенный охват и плотность точных измерений, полученных с использованием метода ISBAS, позволяет получить более полное понимание схем деформации грунта. Важно, что это достигается без необходимости развертывания угловых отражателей и использования произвольной контрольной точки, которая не требует абсолютных наземных данных позиционирования, что повышает практичность мониторинга. Применение метода ISBAS к данным Sentinel-1 помогло очертить недавнюю деформацию над месторождением, что проявляется в увеличении пространственной протяженности чаши оседания и резком увеличении оседания до максимальной скорости -79,3 мм / год. В связи с необходимостью постоянного мониторинга данные Sentinel-1, используемые в сочетании с инновационными подходами DInSAR [87], такими как ISBAS, могут предложить более эффективные с точки зрения затрат и времени оперативные средства регионального, долгосрочного мониторинга деформации, чем обычная наземная сенсорная сеть. В конечном счете, более подробные и всесторонние измерения движения грунта могут позволить лучше охарактеризовать пласт [89] и контролировать его, а также лучше понять связанный с этим риск, представляемый оседанием грунта и реактивацией тектонического нарушения.

В следующей заключительной главе приведены усовершенствованные рекомендации по подготовке и обработке космических радарных данных,

которые были разработаны на основе экспериментов приведенных в данной главе.

#### **4. Совершенствование методики комплексной подготовки и использования радарных данных для мониторинга смещений земной поверхности в условиях эксплуатаций Тенгизского месторождения**

Самым первым и основным моментом обработки радарных данных для мониторинга деформаций земной поверхности над месторождением является выбор оптимальных РСА данных [93]. Это ключевой шаг, поскольку критерии, выбранные для выбора изображений, оказывают сильное влияние на качество конечных результатов [94]. Эти критерии зависят от конкретного применения, для которого требуются интерферометрические изображения SAR.

В этой главе будет дано несколько критериев выбора, касающихся двух наиболее важных моментов дифференциальной интерферометрии. А именно, будет проанализированы параметры выбора данных, которые влияют на получение качественного результата:

- Диапазон снимков и длина волны [95];
- Количество данных;
- Угол обзора (восходящий и нисходящий треки);
- Поляризация радарных данных.

##### **4.1. Разработка критерии оценки и выбора космических снимков**

###### *1. Выбор подходящих радарных снимков по диапазону и длине волны:*

Диапазон снимка. Так как известно, что атмосферные эффекты имеют большие влияния нужно учитывать, что задержка фазы в X диапазоне составляет 200 радиан, в то время как С диапазон -102 радиан, L диапазон- 25 радиан (Таблица 6).

Таблица 6 - Диапазоны РСА данных

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5.20 – 10.90	2.75 – 5.77 (2.4 – 3.8)	USGS SLAR, TerraSAR-X, TanDEM-X COSMO-SkyMed-1-3
C	3.9 – 6.2	3.8 – 7.6	ERS-1,2; ENVISAT/ASAR; RADARSAT-1,2
L	0.39 – 1.55	19.3 – 76.9 (15 – 30)	SIR-A,B, ALOS/PALSAR

Длина волны влияет на амплитуду отраженного радиолокационного сигнала, а также на характеристики обратного рассеивания от подстилающей поверхности. Радиолокация в диапазоне Б (длина волны 15,0-30,0 см) обеспечивает сильные отраженные сигналы, главным образом от более крупных объектов земной поверхности, а также частичное проникновение радиоволн сквозь снежный и растительный покровы и, при определенных условиях через песок и почву. . Более короткие волны, используемые в диапазонах С (3,8-7,5 см) и Х (2,4-3,8 см), позволяют выявить границы малых объектов местности, кроме того, излучение в этих диапазонах имеет тенденцию более сильно отражаться от растительного и снежного покровов, а также от почвы [98]. Таким образом можно сказать, что на короткие электромагнитные волны имеет сильное влияние атмосферные эффекты, в то время, волны длиннее плохо проникает сквозь поверхность.

## 2. Количество данных

Согласно исследовательской работе Мусихина, среднее квадратичное отклонение определения оседаний равняется 0,9 см для всех типов волн (Х, С и Б) при количестве исходных данных 17 штук. Используя простые статистические вычисления, определяется изменение точности, от количества исходных данных. Учитывая формулу зависимости построим зависимость (рисунок 41) [30].

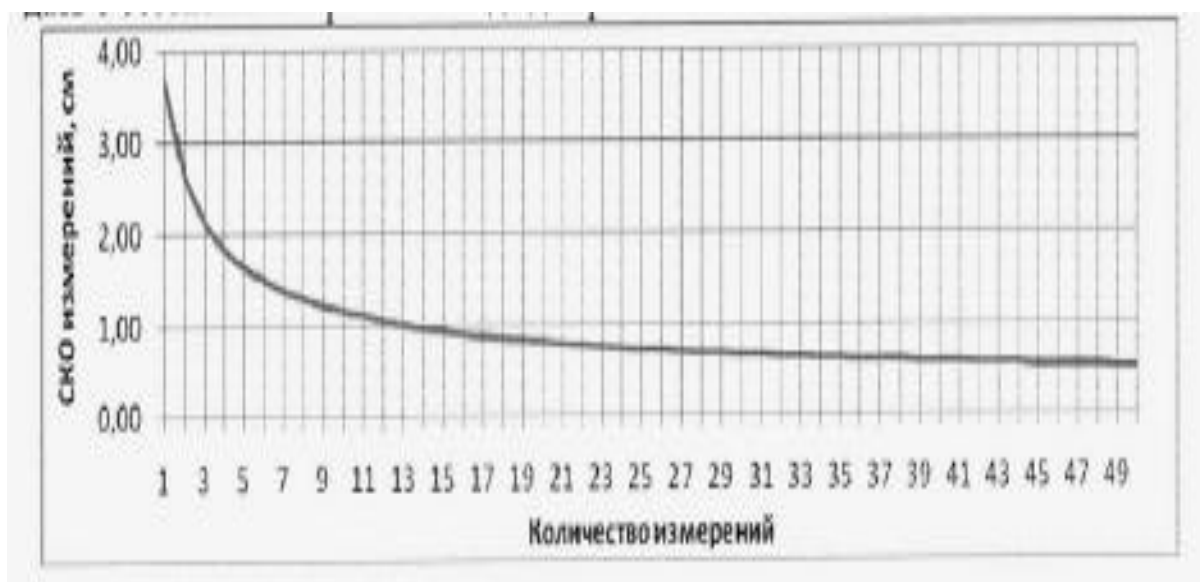


Рисунок 41- Зависимость СКО от количества данных

## 3. Поляризация Радарных данных

Радарные данные спутника ENVISAT Европейского космического агентства, с радиолокатором ASAR на борту характеризуется большим

количеством углов и режимов съемки (рисунок 42), возможностью съемки в разных поляризациях (в т.ч., в двух одновременно) и в широкополосном режиме (Таблица 8). При этом снимки, сделанные в режиме Image Mode в полосе съемки IS2 и с поляризацией VV интерферометрически совместимы со снимками ERS-1 и ERS-2. Эта особенность позволяет организовать тандемную съемку ERS-2 – ENVISAT с временным интервалом в 30 минут на больших базовых линиях[46]. Съемка в таком режиме характеризуется крайне высоким фазовым разрешением интерферограмм по высоте и при этом довольно высокой когерентностью фаз этих снимков, что позволяет строить ЦМР высокой точности (но среднего пространственного разрешения 20 м).

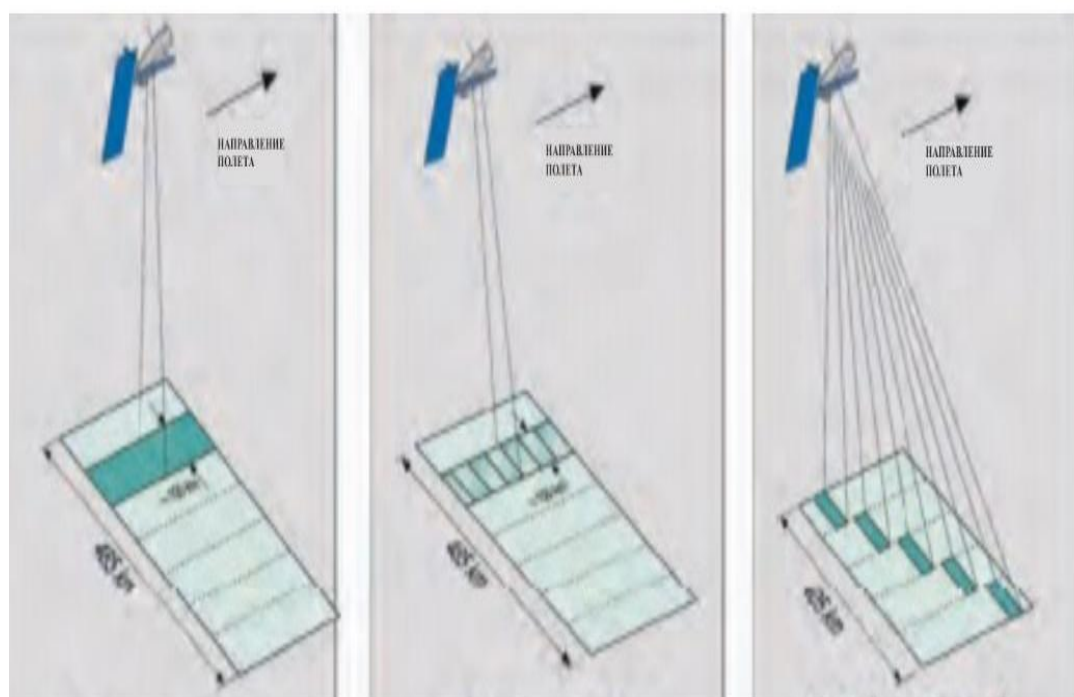


Рисунок 42- Интерферометрические режимы ENVISAT: 1) Режим съемки; 2) Переменная поляризация; 3) Широкоформатный режим

В качестве поляризации РСА данных, которые применяются при интерферометрической обработке, рекомендуется применять плоскую поляризацию. Это значит, что посланный и принятые сигналы находятся в одной плоскости. Однако, в наше время некоторые ученые применяют и кросс поляризацию в своих исследовательских работах, что приводит к декорреляции данных. С точки зрения высокой когерентности данных, автором, на основе его опыта и обмена опытом с западными коллегами, рекомендуется использование данных плоской вертикальной поляризации сигнала VV. Результаты работ с использованием плоской горизонтальной поляризацией сигнала HH, так же имели успех. Но имеются основания полагать, что при использовании в перечисленных работах, данных с вертикальной поляризацией, наблюдалась бы

незначительно большая когерентность данных, что позволило бы увеличить плотность мониторинга [30].

Таблица 7 - Режимы съемки ENVISAT

Режим	Формат	Покрытие (км)	Пространственное разрешение	Поляризация
Режим съемки	IS1-IS7 14°-45°	50-100	30м	VV или HH
Переменная поляризация	IS1-IS7 14°-45°	50-100	30 м	VV + HH VV +HV HH+HV
Широкоформатный режим	SS1-SS5 16°-44°	400	150 м	VV или HH

Таблица 8 - Характеристики режимов съемки спутника Sentinel-1A

Режимы	Покрытие, км	Разрешение без обработки	Поляризация
Strip Map Mode	80	5x5	VV+VH или HH+HV
Interferometric Wide Swath	250	5x20	VV+VH или HH+HV
Extra-Wide Swath Mode	400	20x40	VV+VH или HH+HV
Wave-Mode	20x20	5x5	VV или HH

Однако, при применении для данных Sentinel-1(таблица 9) двойная поляризация VV+VH в снимках позволяет получать более точные результаты, чем двойная поляризация HH+HV.

#### 4. Угол обзора (восходящий и нисходящий треки)

InSAR измеряет смещение в направлении между антенной SAR и точкой на поверхности земли (в зоне прямой видимости спутника).

Наблюдения с помощью спутника SAR производятся не в направлении непосредственно под спутником, а наклонно ниже спутника, и существуют восходящие орбиты, где наблюдения проводятся с запада, и нисходящая орбита, где наблюдения проводятся с востока.

Все спутники SAR перемещаются от северного полюса к южному полюсу за половину своей траектории. Это направление называется их нисходящей

орбитой. И наоборот, когда спутники движутся с юга в направлении северного полюса, говорят, что они находятся на восходящей орбите (Рисунок 43). Одна и та же область пересматривается вдоль двух орбит. Как следствие, восходящие и нисходящие изображения собраны в одной и той же области.



Рисунок 43 - Нисходящие и восходящие режимы съемок

Поверхность земли изменяется в трех измерениях (восток и запад, север и юг, вверх и вниз), но InSAR может обнаружить только одномерное смещение в зоне прямой видимости спутника. Таким образом, невозможно определить, в каком направлении поверхность земли фактически перемещается из одной интерферограммы.

Например, когда наблюдение ведется с востока (нисходящая орбита) и наблюдается смещение в направлении от спутника, можно решить, что земля опустилась или переместилась на запад, но невозможно определить, фактическое смещение происходит из-за опускания или горизонтального перемещения на запад, или смешения обоих, или из-за более сильного опускания, которое отменяет горизонтальное движение на восток с результирующим смещением в направлении от спутника (Рисунок 44). Кроме того, обнаружение смещения в северном или южном направлениях невозможно.

Таким образом, трудно определить направление смещения с использованием одной интерферограммы SAR, но определение направления может быть сделано путем сравнения данных InSAR с данными измерений GPS или путем объединения нескольких данных из разных направлений (то есть восходящих и нисходящих).

Таким образом, одна интерферограмма SAR показывает смещение только в направлении, где земля движется близко к спутнику или от него. В результате, несмотря на обнаружение одной и той же деформации, интерферограмма с восходящих орбит может отличаться от интерферограммы с нисходящих орбит.



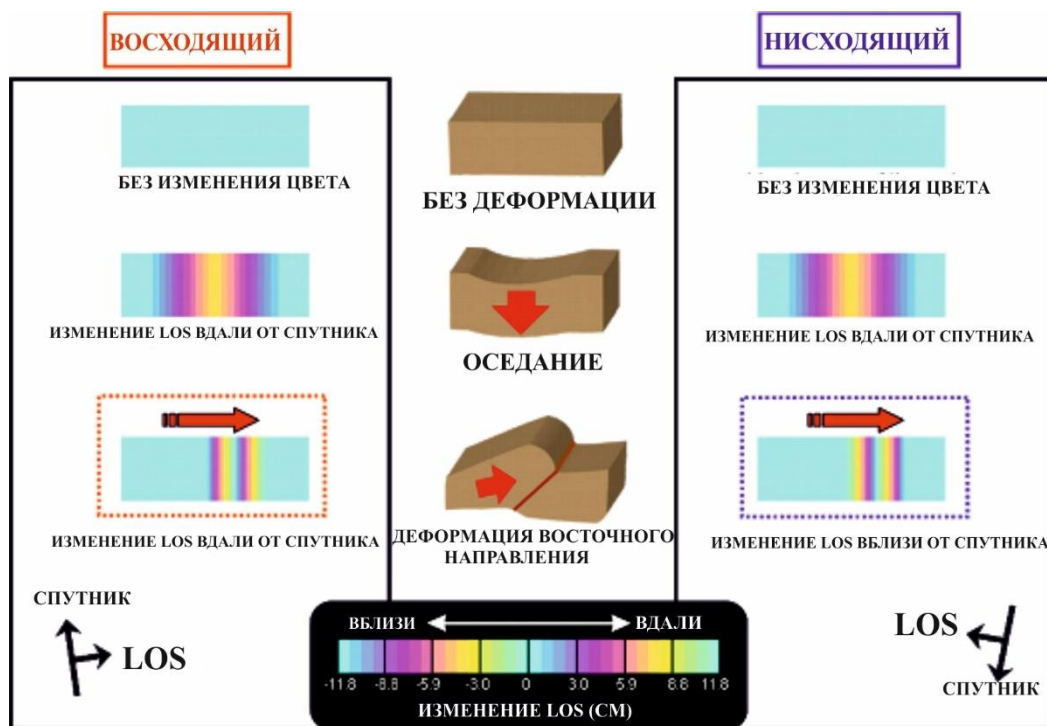


Рисунок 44 - Деформация земной поверхности в зависимости от угла съёмки

### 5. Рекомендации по выбору данных Sentinel-1

Программа «Коперник» Европейского космического агентства открыла новую эру с точки зрения изображений SAR. Миссия Sentinel-1 обеспечивает регулярное получение изображений в С-диапазоне на обширных земных шарах. Благодаря увеличенной частоте повторных посещений (12 дней) и коротким базовым показателям миссия Sentinel-1 ускоряет применение технологии InSAR во многих странах.

Данные SENTINEL-1 интерферометрического режима разделяется на два вида: Single Look Complex (SLC) и Ground Range Detected (GRD). Для применения в целях мониторинга деформаций земной поверхности надо применять снимки в режиме SLC, так как в этом режиме снимки имеют амплитуду и фазу, в то время как для GRD характерна только амплитуда.

Временное распределение изображений Sentinel-1 принципиально отличается от распределения обычно используемых ERS и Envisat. Сорок изображений Sentinel-1A покрывают только период приблизительно полутора лет (около 12 дней повторного цикла), в то время как временное покрытие более старых датчиков С-диапазона охватывает несколько лет с тем же количеством изображений (ок. 35 дней повторяют цикл). Поэтому при выборе космических снимков с Sentinel-1 нужно учитывать, что количество снимков на заданную территорию существенно увеличится, что существенно усложнит обработку данных (Рисунок 45).

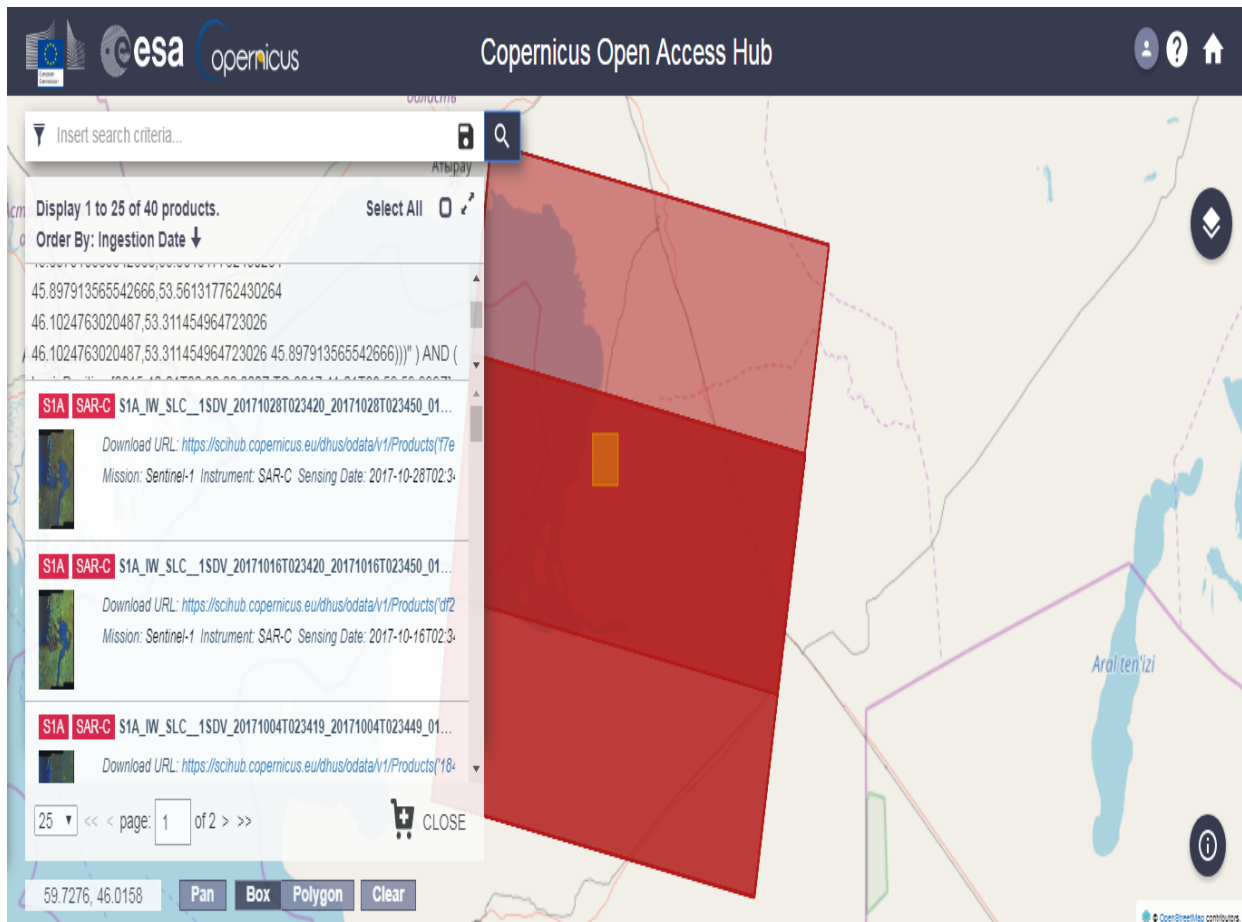


Рисунок 45 - Выбор снимков Sentinel-1

Снимки Sentinel-1 получены в режиме Terrain Observation с режимом Progressive Scan SAR (TOPSAR), который отличается от широко используемого режима Stripmap. Здесь каждый SLC состоит из нескольких bursts. Они перекрываются соседними парами и подходят для приложений InSAR. Тем не менее, особенно когда интересующая область (ROI) пересекается только всплесками и охватывает только фрагмент одного или нескольких всплесков, пользователь должен тщательно подготовить процессы отбора образцов и регистрации ядра. С такой проблемой автор столкнулся во время первого отбора данных для месторождения Тенгиз [79].

На официальном бесплатном ресурсе снимки на данную территорию были доступны с 2015 года и было скачено всего 66 снимков на заданную территорию. Однако, после проведения методов слияния и дебарстинг, был обнаружен зазор в итоговом широкомасштабном SLC снимке. Полученный результат показан на рисунке 46 после наложения полученного снимка на Google Earth карту, где отчетливо видны зазоры, делающие снимок непригодным для дальнейшей обработки.

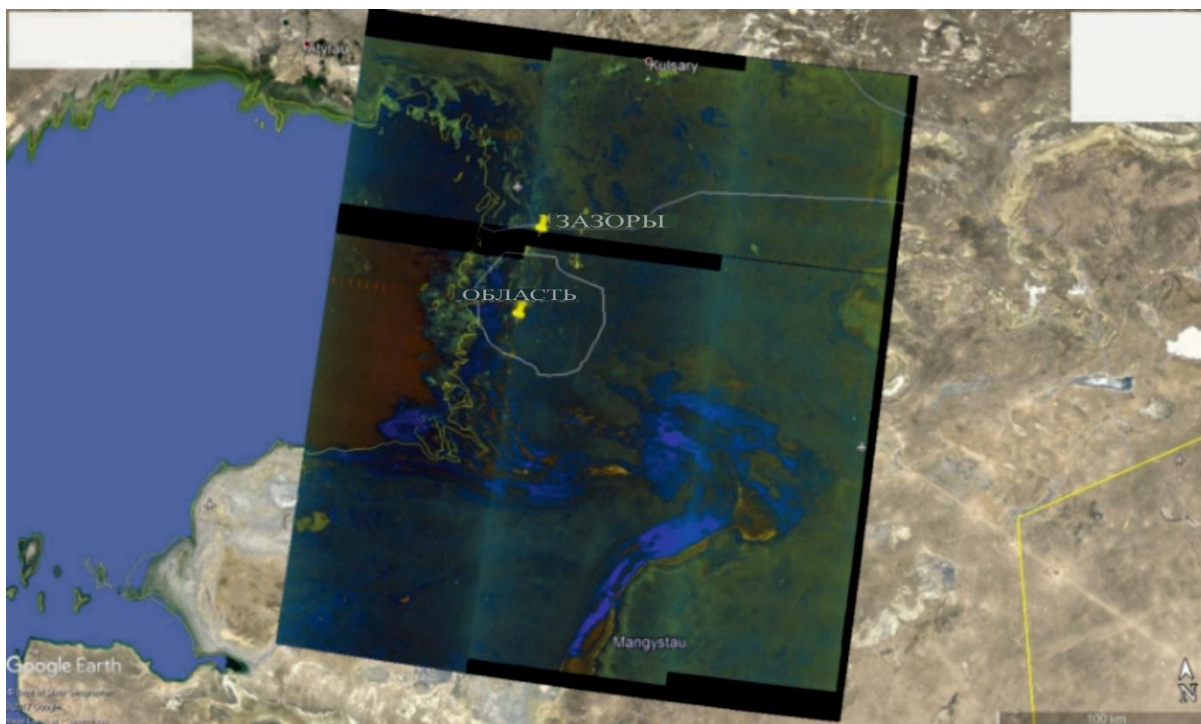


Рисунок 46 - Зазор в широкоформатном SLC снимке

Полученный выше неудачный результат доказывает особенность и своего рода сложность при обработке снимка формата Sentinel-1. Однако, из за того, что разница в методе приходится в начальном этапе обработки, все эти нюансы были выявлены сразу же с помощью метода слияния.

С другой стороны, благодаря выбору одного пакета (учитывая меньшую рентабельность инвестиций) они значительно сокращают как потребности в хранении, так и время вычислений, что делает обработку InSAR управляемой. SLC Sentinel-1 покрывают почти полтора года в восходящей и нисходящей геометрии для выбранных зон испытаний. Максимальная однозначная скорость смещения составляет одну четверть длины волны, между ближайшими приобретениями. Несмотря на более длительные периоды разделения изображений, эти интервалы получения изображений по-прежнему предоставляют уникальную возможность для анализа смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз.

После завершения создания интерферограммы можно перейти к следующему шагу, однако важно сделать несколько копий созданных файлов из основного каталога. Причины создания копий несколько, и одной из наиболее важных из них является сохранность данных. Например, если на других этапах использовался неправильный каталог, файлы из основного каталога были бы переписаны или изменены, что означает, что создание интерферограммы должно быть выполнено снова.

## 4.2. Рекомендации для обработки радарных данных.

### 1. Ограничение по временной и перпендикулярной базовых линиях.

Общее влияние ошибки базиса можно найти, подставив выражение в формулу, заданную во второй главе данной диссертации.

Таким образом, к примеру, если ошибка перпендикулярного базиса на высоте зондирования 600 км составит 1 м, то ошибка оседания точки на удалении от опорной в 10 км составит 16 см.

Данная ошибка может устраняться аналитически при построении дифференциальных интерферограмм (использования алгоритмов 2Б интерферометрии) либо на этапе точечного анализа. Ошибка влияния неверного базиса компенсируется за счет аффинного преобразования карт смещений по формулам, описанным выше, путем корректировки карты смещения по азимуту и дальности.

Интерферограммы с нормальной базовой линией (значения выше ~ 450 м) обычно практически невозможно развернуть если недоступна ЦМР и топография области не очень плавная. Кроме того, когерентность, как правило, мала из-за высокой геометрической и объемной декорреляции рассеяния. Оптимальная перпендикулярная базовая линия находится в диапазоне от 150 до 300 метров. Тем не менее, лучший результат достигается при использовании более одной интерферограммы: можно использовать интерферограммы с небольшими базовыми линиями, чтобы помочь развернуть интерферограммы с высокими базовыми линиями. Кроме того, различные интерферограммы могут быть объединены, чтобы уменьшить атмосферные артефакты.

Таким образом, автором рекомендуется применить ограничение 4 года по временной базовой линии и 250 м по перпендикулярной базовой линии для получения качественной интерферограммы. 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.

### 2. Установление многовариантных коэффициентов для снимков ENVISAT, ERS, Sentinel-1.

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 м × 100 м. Использование азимутального сжатия приводит к возникновению одинаковых ошибок в пучках. Такие ошибки носят систематический характер, они имеют одинаковое изотропное распределение по сцене. Их изменение происходит по направлению азимут. По направлению дальности ошибки практически отсутствуют.

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.

Следуя параметрам расстояния между пикселями, полученные усредненные пиксели имеют приблизительный размер  $70 \text{ м} \times 85 \text{ м}$  в наклонном диапазоне и азимутальных направлениях, что соответствует  $\sim 115 \text{ м} \times 85 \text{ м}$  в разрешении диапазона земли в центре сцены (при условии, что угол падения  $37,5^\circ$ ). Комплексная когерентность была оценена для каждого окна  $6 \times 30$  и применена во время пространственного усреднения пикселей (multilooking), так что каждая мера когерентности не зависит от своих соседей.

### *3. Обоснование применения в качестве ЦМР- SRTM.*

Во время мониторинга оседаний земной поверхности над месторождением Тенгиз дифференциальные интерферограммы были получены путем вычитания фазы из имитированной интерферограммы на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), полученной с помощью топографической миссии Shuttle Radar (SRTM) и векторов состояния орбиты, предоставляемых продуктами IW. Дифференциальную интерферограмму нелегко интерпретировать: большая часть остаточного фазового вклада обусловлена атмосферными воздействиями, но возможные ошибки ЦМР и базовой линии могут также создавать побочные фазовые компоненты в некоторых областях из-за неидеальной компенсации топографического термина. Однако, ошибки, связанные с влиянием рельефа, как правило, устраняются довольно точно с помощью применения даже очень грубых по отношению к радарным данным моделей высот.

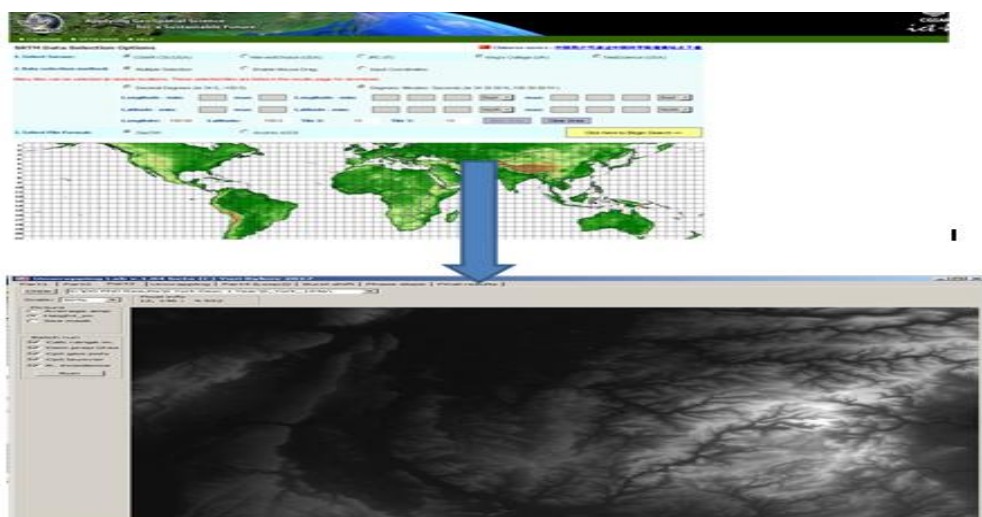


Рисунок 47- ЦМР Тенгизского месторождения

Так для оценки оседаний большой территории (десятки километров) достаточно использование модели SRTM, которая уступает разрешению самих радарных данных (к примеру, TerraSAR- X) примерно в 100 раз. Такой допуск в использовании грубой модели высот обусловлен незначительной составляющей  $z$  по отношению к величине  $R$  (расстояние зондирования). Так, для наблюдения за оседаниями малых объектов (несколько сотен метров в плане без высотных сооружений), использование модели высот для внесения поправок за рельеф может опускаться. Возможные ошибки из-за рельефа, возникающие на таком объекте не будут превышать отношения базиса к расстоянию зондирования ( $B/R$ ) помноженное на высотное удаление искомой точки от опорной точки (которое, как правило, не превышает 1 ‰). Следует также отметить, что точность векторов состояния спутника постоянно улучшалась в течение последнего десятилетия. Бортовые приемники GPS, а также разработка более совершенных методов определения орбиты теперь позволяют инженерам и геологам оценивать траектории спутников с точностью до нескольких сантиметров [92], что значительно снижает влияние данного ложного компонента фазы на генерацию дифференциальной интерферограммы.

Следует отметить, что для восстановления фазовой составляющей, зависящей от рельефа, величину  $z$  следует применять именно из модели высот (или местности), а не из модели рельефа.

##### *5. 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.

##### *6. Выбор оптимальной опорной точки при применении классического метода обработки.*

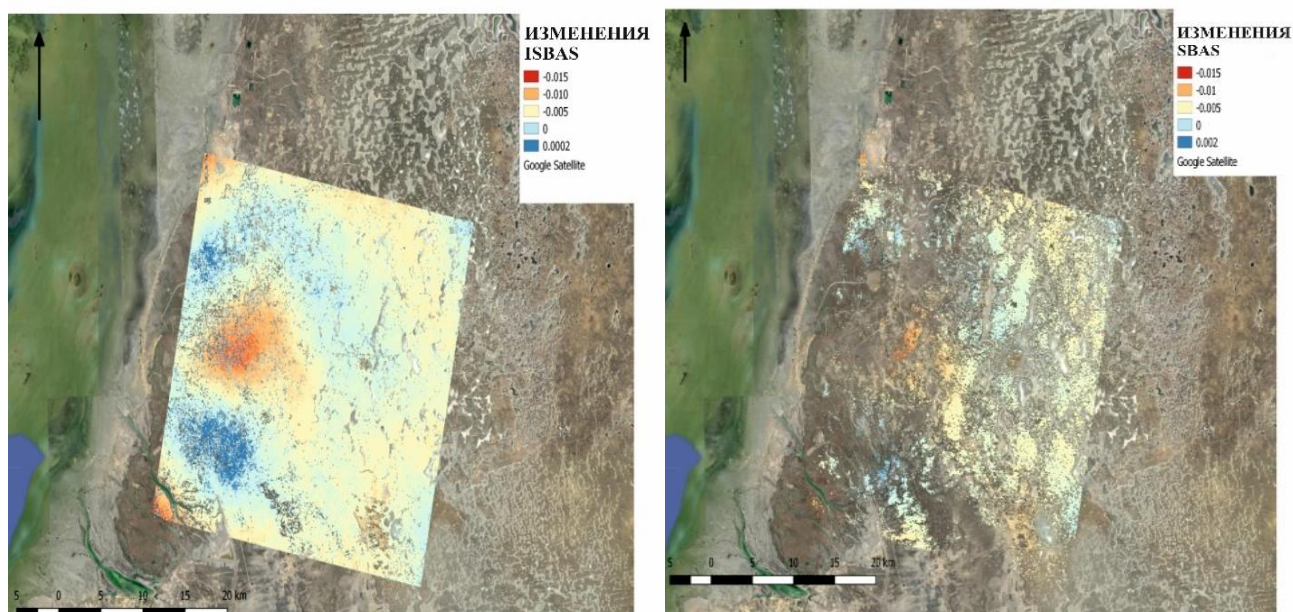
Стабильная правильно выбранная опорная точка определяет конечный результат, в том числе наличие деформации земной поверхности в нефтедобывающих отраслях.

##### *7. Применение метода ISBAS*

Метод ISBAS 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. Конечный

результат достигается без необходимости развертывания угловых отражателей и использования произвольной контрольной точки, которая не требует абсолютных наземных данных позиционирования, что повышает практичность мониторинга. И данный пункт отменяет необходимость 6 пункта, приведенного в данной рекомендации.

На рисунке 48 приведены результаты применения классического метода SBAS и инновационного метода ISBAS полученных для задач оценки деформации земной поверхности нефтегазового месторождения Тенгиз.



*Рисунок 48 – Сравнение полученных результатов с помощью алгоритмов SBAS и ISBAS*

В общей сложности 102 398 когерентных пикселей было идентифицировано с использованием метода SBAS, что соответствует среднему значению  $\sim 60$  измерений / км<sup>2</sup>. 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 48a). Включение в анализ пикселей, которые демонстрируют прерывистую когерентность, заметно увеличивает пространственный охват и плотность измерений движения грунта (рисунок 48b). При 366 842 пикселях число измерений наземного движения ISBAS в 3,6 раза больше, чем для SBAS, что составляет в среднем  $\sim 215$  измерений / км<sup>2</sup>.

Таким образом, применение инновационного метода ISBAS для мониторинга деформаций земной поверхности в нефтегазовых месторождениях позволяет получать качественный результат.

## 8. Применение метода дебарстинг и слияния для обработки космических снимков Sentinel-1.

Чтобы создать продукт IW большой площади из трех поставляемых подкадр, необходимо выполнить два отдельных процесса [69,79] :

Дебарстинг. Данный процесс объединяет отдельные всплески из одного подкадра в единую систему, где расстояние между азимутальными линиями является постоянным от начала до конца и не существует демаркации черной линии между субсеквенционными всплесками.

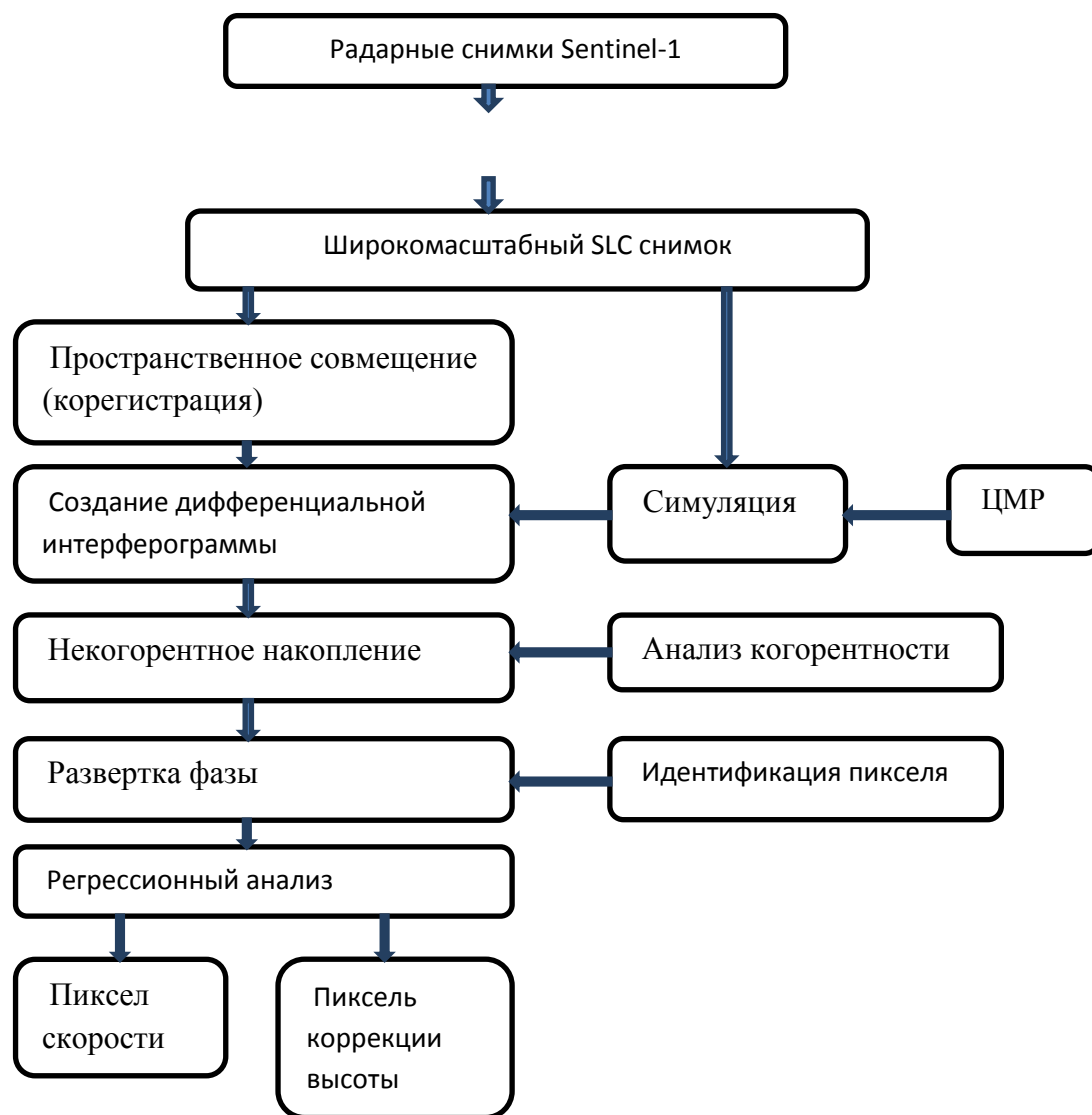
Слияние. После применения дебарстинг к каждой из трех подкадров (то есть IW1, IW2 и IW3), они должны составить один широкоформатный продукт в виде мозаики, где интервал между столбцами постоянный от ближнего к далекому, площадь подкадров находится по азимуту. Процесс мозаичных всплесков из трех разных рядов показан на рисунке 1. Для продуктов Sentinel-1 IW SLC линии и столбцы всплесков и подкадров были повторно отобраны в общий пиксель.

Выше перечисленное означает, что дебарстинг и слияние могут быть выполнены путем смещения субизображений только в целых числах строк и столбцов, и поэтому не требуется передискретизация исходных значений пикселей для формирования продукта с большой площадью. Еще одна характеристика данных SAR Sentinel-1 TOPS SAR заключается в том, что фаза продукта быстро изменяется по азимуту и может быть нелегко передискретизирована, поскольку разность фаз между соседними пикселями может быть неоднозначной. Это хорошо известный эффект и может быть решен с помощью первого вычитания симуляции быстро меняющейся азимутальной фазы (дерампинга), повторной дискретизации остатка и окончательного добавления обратно повторяющейся фазы (повторного изменения). Для данных Sentinel-1 известна функция *deramping* . Оставшаяся большая разница между данными Sentinel-1 TOPS и *stripmap* данными заключается в том, что любая неточность менее одной тысячи сантиметров одного пикселя при совместной регистрации (например, эквивалентная до 2 см в азимуте) может приводить к заметным фазовым скачкам на отдельные всплески. Однако, с помощью типичных методов преобразования трудно достичь более высоких уровней точности, например, метод спектрального разнесения , реализованный такими авторами, как Lanari; Wegmüller. Метод спектрального разнесения обычно требует анализа фаз прямого и обратного просмотра в областях перекрытия всплесков. Это дает больше вычислительной возможности, чем простые методы корреляции амплитуды, которые широко используется для продуктов *stripmap*. Кроме того, для достижения наивысшей точности фаз, она должна применяться к каждой интерферометрической паре, которая добавляется к процессу обработки. Например, для N стриповых продуктов, только N-1 пары должны быть корегистрированными; для алгоритма с несколькими мастерами, такого как SBAS, это будет увеличиваться во много раз, поскольку число пар



намного больше, чем  $N-1$ , в зависимости от применяемых базовых и временных порогов.

Таблица 9. Алгоритм обработки данных Sentinel-1



### 4.3. Перспективы мониторинга деформации

Настоящие и предыдущие исследования четко демонстрируют, что DInSAR имеет потенциал для мониторинга деформации над нефтяным месторождением Тенгиз. Хотя потенциал более традиционных методов (например, SBAS, PSI) несколько ограничен застроенными территориями и территориями, лишенными растительного покрова, усовершенствованные методы (например, ISBAS, SqueeSAR) способны расширить мониторинг за пределами городских районов. Это более целесообразно в отношении месторождения Тенгиз, поскольку оно

имеет довольно широко распространенный полусухой растительный покров, хотя и с различной плотностью.

Некоторые преимущества технологии ISBAS ранее были продемонстрированы над газовыми месторождениями в более умеренном климате сельского и лесного ландшафта Алкмара, где преобладают леса, и эта уникальная способность была дополнительно усилена настоящим исследованием в рамках контрастирующего сельского пейзажа. Имея возможность получать измерения движения грунта как по городским, так и по различным типам земного покрова в сельской местности, ISBAS может дать полную картину деформации над пластами углеводородов. Важно отметить, что этот метод дистанционного зондирования может обеспечить более непрерывное и детальное картирование деформаций на больших площадях всего за часть времени и затрат на эквивалентную наземную съемку без ущерба для точности. Это может иметь значительные последствия для планирования и управления разработкой месторождения, помогая лучше оптимизировать геомеханические модели, чтобы обеспечить разрешение с более мелкими пространственными деталями геометрии пласта Тенгиз и вариации порового давления (Comola и др., 2016). Экономическая эффективность DInSAR будет еще больше увеличиваться теперь, когда возможно отображение деформации DInSAR в национальном масштабе [93], что впоследствии позволит использовать одну карту для множества различных применений, например, для одновременного мониторинга соседнего нефтяного месторождения Королев.

Обычный недостаточный охват традиционных методов DInSAR на растительных областях может быть решен путем размещения густой сети искусственных рассеивателей (угловых отражателей) по всему ландшафту [94,95]. Однако плотность измерений, обеспечиваемая методом ISBAS, потенциально может сделать это решение трудоемким в большинстве случаев. Это дополнительно усугубляет эффективность ISBAS в качестве легко развертываемого оперативного инструмента мониторинга движения грунта.

Перспектива продолжения оперативного мониторинга нефтяного месторождения Тенгиз с использованием DInSAR значительно улучшилась с запуском Sentinel-1, который представляет собой значительное повышение надежности и продолжительности повторного цикла по сравнению с предшественниками SAR[96]. Более того, данные почти в реальном времени предоставляются как на бесплатной основе, так и на основе открытого доступа всем конечным пользователям. Здесь Sentinel-1 помог выявить драматические изменения как в пространственной протяженности, так и в скоростях оседания с 2004 по 2009 год. Это четко иллюстрирует постоянную необходимость мониторинга деформации нефтяного месторождения, чтобы оценить влияние, которое оно может оказать на целостность скважин и инфраструктуры, таких как перерабатывающая установка и трубопроводы. Дополнительные данные временных рядов с высоким разрешением о движении грунта, полученные с Sentinel-1, также были бы полезны в этом отношении, особенно для оценки

эффективности мер по снижению риска, предназначенных для контроля за уплотнением пласта, оседанием и индуцированной сейсмичностью.

#### 4.4. Выводы

Данная заключительная глава содержит в себе основную научную новизну данной диссертационной работы, приведенной в виде рекомендации к подготовке и обработке РСА данных. Были приведены следующие 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, 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. 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.

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.

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.

### **Заключение**

**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:**

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

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.

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.

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.

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.

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 совершенствованные 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 входящем в базу web of science.

## Литература

1. Chen, Z.R. Poroelastic model for induced stresses and deformations in hydrocarbon and geothermal reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 80. - 2012. – P 41-52
2. Fielding, E.J., Blom, R.G., and Goldstein, R.M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25.- 1998. – P. 3215-32183
4. Nagel, N.B. Compaction and subsidence issues within the petroleum industry: from Wilmington to Ekofisk and beyond. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, Vol. 26(1-2). – 2001. – P. 3-14.
5. Kyrgyzbayeva, G., Nurpeisova, M., and Sarybayev O. The monitoring of earth surface displacements during the subsurface development, in G. Pivnyak, V. Bondarenko and I. Kovalevska (eds.)// *New Developments in Mining Engineering: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*. Taylor & Francis Group, London, 2015. – P. 161-167
6. Kouznetsov, O., Sidorov, V., Katz, S., and Chilingarian, G. Interrelationships among seismic and short-term tectonic activity, oil and gas production, and gas migration to the surface. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.13. – 1994. – P.57-63.
7. Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., and Arkan, M. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 2012. – P.514-517
8. Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.39(1). –2001. – P. 8-20.
9. BerardinoP., FornaroG., LanariR., SansostiE. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry. // *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 40, No. 11. – 2002.
10. Caló, F. Notti, D., Galve, J.P., Abdikan, S., Görüm, T., Pepe, A., and Şanlı, F.B. DInSAR-based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote Sensing*, Vol.9(1).– 2017. – P. 83.
11. Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., and Pepe, A. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.164. – 2007. – P. 637-661.
12. Bateson, L., Cigna, F., Boon, D., and Sowter, A. The application of the intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the south Wales coalfield, UK. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 34. – 2015. – P. 249-257.
13. Свободная энциклопедия. Википедия «Атырауская область». // <http://ru.wikipedia>
14. Тенгизшевройл. «Тенгизское месторождение» // <http://www.tengizchevroil.com/ru/about/tengiz> .

15. Baú, D., Gambolati, G., and Teatini, P. Residual land subsidence over depleted gas fields in the Northern Adriatic basin. *Environmental and Engineering Geoscience*, 4. –1999. – P. 389-405.
16. Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodríguez, E., and Goldstein, R.M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. // *Proceedings of the IEEE*, Vol.88(3). –2000. – P.333-382
17. Yenikeyeff S. M., Kazakhstan's Gas: Export Markets and Export Routes. Oxford institute for energy studies, NG25.– 2008. – P.25-27
18. Официальная страница ТШО//<http://www.tengizchevroil.com/ru/about/overview>
19. Официальный сайт КазМунайГаз. Тенгиз //[http://www.kmg2.isd.kz/page.php?page\\_id=311&lang=1](http://www.kmg2.isd.kz/page.php?page_id=311&lang=1)
20. Елюбаев Ж.С. Проблемы правового регулирования производства серы в Казахстане. *Журнал «Нефть и газ»*, №2. – 2009
21. Тумашова Е. ТШО построит третий завод на Тенгизе к 2022 году. // *Капиталцентр деловой информации*. – 2016
22. Weber, L.J., Francis, B.P., Harris, P.M., Clark, M., Stratigraphy, lithofacies, and reservoir distribution, Tengiz Field, Kazakhstan. In: Ahr, W.M., Harris, P.M., Morgan, W.A., Somerville, I.D. (Eds.), *Permo-Carboniferous Carbonate Platforms and Reefs. SEPM Special Publication 78 and AAPG Memoir 8*. –2003. – P. 351–394.
23. Справочник: Месторождения нефти и газа, Алматы — 2007.
24. Collins, J.F., Kenter, J.A.M., Harris, P.M., Kuanysheva, G., Fischer, D.J., Steffen, K.L., Facies and reservoir-quality variations in the late Viséan to Bashkirian outer platform, rim, and flank of the Tengiz buildup, Precaspian Basin, Kazakhstan. In: Harris, P.M., Weber, L.J. (Eds.), *Giant Hydrocarbon Reservoirs of the World: From Rocks to Reservoir Characterization and Modelling*. // *AAPG Memoir 88/SEPM Special Publication*, 2006. – P. 55–95.
25. Collins, J., Narr, W., Harris, P.M., Playton, T., Jenkins, S., Tankersley, T., Kenter, J.A.M., Lithofacies, depositional environments, burial diagenesis, and dynamic field behavior in a carboniferous slope reservoir, Tengiz Field (Republic of Kazakhstan), and comparison with outcrop analogs. In: Harris, P.M., Weber, L.J. (Eds.), *Deposits, Architecture and Controls of Carbonate Margin, Slope and Basinal Settings*. // *SEPM Special Publication 105*. –2013. – P. 50–83.
26. Klein, I., Gessner, U., Kuenzer, C., Regional land cover mapping and change detection in Central Asia using MODIS time-series. *Appl. Geogr.* Vol.35. –2012. –P. 219–234.
27. ТОО «Казгеоизыскания». Оценка воздействия на окружающую среду. // Дополнение к проекту: Промышленной разработки участка №7 месторождения глинистых пород «Тенгиз». Атырау, 2017.
28. Орынбасарова Э. История развития применения космических снимков для мониторинга деформаций земной поверхности. *Вестник КазГАСА*, ISSN 1680-080X. №2(64). – 2017. –С.219-224.



29. Massonnet, D. & Feigl, K. L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 36. – P.441-500
30. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: дисс. ... канд.тех. Наук: 25.00.16. – Пермь, 2012
31. Hanssen R.F. *Radar Interferometry*. Springer, 2001
32. Орынбасарова Э, Кенесбаева А. Возможности использования данных нового спутника Sentinel-1. *Вестник КазГАСА*, ISSN 1680-080X. №2(68). – 2018. – С.168-173
33. ESA. Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services. ESASP-1322/1, 17, 2012
34. Петерсон М.А. Оценка изображений Sentinel-1 для морского льда. Мониторинг в проливе Дании. Магистерская работа. Университет Исландии.
35. Leifer I., David M. Tratt, Realmuto V. J., Gerilowski K, John P. Burrows. Remote sensing atmospheric trace gases with infrared imaging spectroscopy. *EOS*, 2012
36. Gee, D., Sowter, A., Novellino, A., Marsh, S., Gluyas, J.. Monitoring land motion due to natural gas extraction: validation of the intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm over gas fields of North Holland, the Netherlands. *Mar. Pet. Geol.* 77. – 2016. – P. 1338–1354.
37. Gee, D., Bateson, L., Sowter, A., Grebby, S., Novellino, A., Cigna, F., Marsh, S., Banton, C., Wyatt, L., Ground motion in areas of abandoned mining: application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. *Geosciences* 7 (3). – 2017. – P. 85.
38. Болсуновский М. А. Перспективные направления развития дистанционного зондирования Земли из космоса. *Геоматика*. №2(3). – 2009.
39. Жантаев Ж. Ш., Курманов Б. К., Иванчукова А. В., Фремд А. Г., Кирсанов А. В., Бибосинов А. Ж., Кантемиров Ю. И. Результаты космического радарного мониторинга смещений и деформаций зданий и сооружений в Астане. *Геоматика*. № 4. – 2013. – С. 37-53
40. Мансуров В.А., Сатов М.Ж., Жантуев Р.Т. , Кантемиров Ю.И. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на жезказганском месторождении меди *Геоматика*. №1. –2012. –С. 77-83
41. Низаметдинов Ф. К., Мозер Д. В., Гей Н. И., Туякбай А. С., Каранеева А. Д.. Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна. *Геоматика*. № 4. –2014. – С.70-77
42. Кантемиров Ю.И., Камза А.Т., Бермуханова А.М., Тогайбеков А.Ж., Сапарбекова М.А., Никифоров С.Э. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений мангистауской области республики казахстан. *Геоматика*. №4. – 2014. – С. 46-58

43. Кантемиров Ю.И., Камза А.Т., Бермуханова А.М., Тогайбеков А.Ж., Сапарбекова М.А., Никифоров С.Э. Опыт использования технологии радарной интерферометрии в контроле смещений земной поверхности в условиях наличия водной среды и сорных участков. *Маркшейдерский вестник*. №5 (102). – 2014. – С. 52-55
44. Жантаев Ж. Ш., Фремд А. Г., Иванчукова А. В., Калдыбаев А. А., Нурақынов С. М., Кантемиров Ю. И., Никифоров С. Э. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз. *Геоматика*, № 1. –2012. –С. 61-71.
45. Cumming, I., and Wong, F. *Digital processing of SAR data*. 685 Canton Street, Norwood, MA 02062: Artech House, Inc, 2005.
46. Кантемиров Ю.И. Обзор современных радиолокационных данных дзз и методик их обработки с использованием ПК SARscape.
47. Мусихин В.В., Кашников Ю.А., Лысков И.А., Гамбур В.М. Мониторинг деформационных процессов нефтепроводов методом радарной интерферометрической съемки//*Маркшейдерский вестник*.-2015.-№4(107).-с.32-37
48. Kamza A., Orynassarova E., Levin E., Kuznetsova I., Yerzhankyzy A. 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, Bulgaria, 2018.– P. 449-454
49. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., and Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 2007.– 45(RG2004).
50. Skolnik M. L.. *Introduction to RADAR systems*. 3 edn. 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020: Tata McGraw-Hill, 2001.
51. Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., and Goldstein R. M. Synthetic aperture radar interferometry. // *Proc. IEEE*, 88(3), 2000. – P. 333–382.
52. Goldstein R. M. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, Vol.22(18).–1995. – P.2517–2520.
53. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.40(11). –2002. – P. 2375-2383.
54. Lanari R., Zeni G., Manuta M., Guarino S., Berardino P., and Sansosti E.. An integrated SAR/GIS approach for investigating urban deformation phenomena: a case study of the city of Napoli, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.25(14).– 2004.– P. 2855–2867.
55. Орынбасарова Э. Problematic tasks of interferometric processing. *Вестник КазГАСА*, ISSN 1680-080X . №2(68). – 2018.–С.168-177.

56. Hanssen R. F.. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. First edn. Springer, 2001.
57. Onn F., and Zebker H. A. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a gps network. *J. Geophys. Res.*, 111(B09102), 2006.
58. Zebker H. A., and Villasenor J.. Decorrelation in interferometric radar echoes. // *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, Vol.30(5).– 1992.– P. 950–959.
59. Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., and Rucci A.. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.49(9). – 2011.– P. 3460-3470.
60. Sowter A. Punnet/User guide. The University of Nottingham. 2012
61. 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. – С. 194-197.
62. Yerzhankyzy A, Orynassarova E., Kamza A., Kakimzhanov Y. 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. – P. 113-120.
63. Курманкожаев А., Ержанкызы А. Информационная обеспеченность содержания карты в условиях сложных объектов георесурсов. Международная конференция «Развитие науки в XXI столетии», Научно-информационный центр «Знание», Харьков, 2018. – С. 87-93
64. Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A.. An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure Appl. Geophys.* 164, 2007. – P. 637–661.
65. Sowter A., Bateson L., Strange P., Ambrose K., Syafiudin M.. DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfield. *Remote. Sens. Lett.* Vol. 4 (10). – 2013. –P. 979–987.
66. Cigna F., Sowter A.. The relationship between intermittent coherence and precision of ISBAS InSAR ground motion velocities: ERS-1/2 case studies in the UK. *Remote Sens. Environ.* 202, 2017. – P. 177–198.
67. Chen C.W., Zebker H.A.. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *J. Opt. Soc. Am. A* 18, 2001. – P. 338–351
68. 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. Новосибирск: СГГиТ, 2018. – С. 69-74

69. Орынбасарова Э., Соутер Э. 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. Новосибирск: СГГиТ, 2018. – С. 69-74
70. Lanari R., Casu F., Manzo M., and Lundgren P.. Application of SBAS DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward Fault, California. *Remote Sensing of Environment*, Vol.109(1). – P. 20–28
71. Dagistanova K., Aitzhanov A., Belanger D., Bateman P., Camerlo R., Fitzmorris R., Hui M., Jacobs G., King G., Laidlaw C., Narr W., Pan, Y., Peake, W., Shook, M., Skalinski, M., Sullivan, M., Tankersley, T., Tolessin, D., Yessaliyeva, A., Zhumagulova, A., 2011. Kiev, Ukraine, 17-19 October 2010, AAPG Search and Discovery Article #50399 Integration of Dynamic Data into Characterization of the Tengiz Reservoir: Tengiz Slope, AAPG European Region Annual Conference 2011.
72. Comola F., Janna C., Lovison A., Minini M., Tamburini, A., Teatini P.. Efficient global optimization of reservoir geomechanical parameters based on synthetic aperture radar-derived ground displacements. *Geophysics* 81 (3), M23–M33, 2016.
73. Collins J.F., Kenter J.A.M., Harris P.M., Kuanysheva G., Fischer D.J., Steffen, K.L.. Facies and reservoir-quality variations in the late Visian to Bashkirian outer platform, rim, and flank of the Tengiz buildup, Precaspian Basin, Kazakhstan. In: Harris, P.M., Weber, L.J. (Eds.), *Giant Hydrocarbon Reservoirs of the World: From Rocks to Reservoir Characterization and Modelling*. // AAPG Memoir 88/SEPM Special Publication, 2006. – P. 55–95.
74. Wempen J.M., McCarter M.K.. Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 27, 2017. – P. 159–163.
75. Collins J., Narr W., Harris P.M., Playton T., Jenkins S., Tankersley T., Kenter J.A.M. Lithofacies, depositional environments, burial diagenesis, and dynamic field behavior in a carboniferous slope reservoir, Tengiz Field (Republic of Kazakhstan), and comparison with outcrop analogs. In: Harris, P.M., Weber, L.J. (Eds.), *Deposits, Architecture and Controls of Carbonate Margin, Slope and Basinal Settings*. // SEPM Special Publication 105, 2013.–P. 50–83.
76. Nurpeisova M., Kyrgyzbaeva G.M., Sarybaev O.A., Aitkazinova S.K.. The Methodology of monitoring the earth surface displacements during the development of the subsoil. // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan* Vol.4 (412). – 2015. –P. 95–100.
77. Anissimov L., Postnova E., Merkulov O.. Tengiz oilfield: geological model based on hydrodynamic data. *Pet. Geosci.* 6, 2000. – P. 59–65.
78. Collins J.F., Katz D., Harris P.M., Narr W., Burial Cementation and Dissolution in Carboniferous Slope Facies, Tengiz Field, Kazakhstan: Evidence for Hydrothermal Activity, AAPG Annual Conference, 2014.
79. 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, 2019. – P. 37-49.
80. Alshammari L., Large D.J., Boyd D.S., Sowter A., Anderson R., Andersen R., Marsh S.. Long-term peatland condition assessment via surface motion monitoring using the ISBAS DInSAR technique over the flowcountry, Scotland. *Remote Sens.* 10, 1103, 2018.
81. Baú D., Gambolati G., Teatini P.. Residual land subsidence over depleted gas fields in the Northern Adriatic basin. *Environ. Eng. Geosci.* 4, 1999. – P.389–405.
82. Caló F., Notti D., Galve J.P., Abdikan S., Görüm T., Pepe A., Şanlı F.B.. DInSARbased detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote Sens. (Basel)* Vol. 9 (1).–2017. – P. 83.
83. Japan International Cooperation Agency. The Study on Capacity Development on Pollution Prevention and Control in the Petroleum Industry in the Caspian Sea and Its Coastal Areas in the Republic of Kazakhstan: Final Report. // Ministry of Environmental Protection, The Republic of Kazakhstan, 2007. – P. 55.
84. Novellino A., Cigna F., Sowter A., Ramondini M., Calcaterra D.. Exploitation of the Intermittent SBAS (ISBAS) algorithm with COSMO-SkyMed data for landslide inventory mapping in north-western Sicily, Italy. *Geomorphology* 280, 2017. – P. 153–166.
85. Wei M., Sandwell D.T.. Decorrelation of L-band and C-band interferometry over vegetated areas in California. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* Vol. 48 (7). – 2010. –P. 2942–2952
86. Yerkes R.F., Castle R.O.. Seismicity and faulting attributed to fluid extraction. *Eng. Geol.* Vol.10 (2–4). –1976. –P. 151–167.
87. Gabriel A. K., Goldstein R. M., and Zebker H. A.. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, Vol. 94(B7). – 1989. – P. 9183–9191.
88. Fu L. L. and Holt B.. Seasat view oceans and sea ice with synthetic aperture radar. Tech. rept. Jet Propulsion Lab., 1982.
89. Henderson I. H., Lauknes T. R., Osmundsen P. T., Dehls J., Larsen Y. and Redfield T. The dynamics of active landslide development and evolution: a combined structural geology, geomorphology and InSAR approach. *SlopeTectonics.* , Geological Society (London) Special Publication (In press), 2009.
90. Henderson I. H. C. and Saintot A.. Regional spatial variations in rockslide distribution from structural geology ranking: an example from Storfjorden, western Norway. *Slope Tectonics.* // Geological Society (London) Special Publication (In press), 2009.
91. Henderson I. H. C., Osmundsen P. T. and Redfield T. F.. ROS Fjellskredi Troms: Status og planer. Report 2009.023. Geological Survey of Norway. (in Norwegian), 2009.
92. Жантаев Ж. Ш., Фремд А. Г., Иванчукова А. В. Технология обработки радиолокационных данных для мониторинга деформаций земной поверхности

для месторождения Тенгиз // Информатизация общества : тр. 3 Междунар. конф. Астана, 2012. С. 313-315.

93. Sowter A., Athab A., Novellino A., Grebby S., Gee D.. Supporting energy regulation by monitoring land motion on a regional and national scale: a case study of Scotland. Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy, Vol. 232 (1). – 2018. – P. 85–99.

94. Henschel M.D., Shen L., Shipman T., Lehrbrass B., Aubé G. Monitoring of SAGD Operations With Satellite Based InSAR. // Society of Petroleum Engineers Heavy Oil Conference. In: SPE-170082-MS Remote Calgary, Canada, 2014.

95. Rohmer J., Loschetter A., Raucoules D., de Michele M., Le Gallo Y., Raard D. Improving Persistent Scatterers Interferometry (PSI) analysis in highly vegetated agricultural areas for long term CO<sub>2</sub> storage monitoring. Energy Procedia 63, 2014. – P. 4019–4026.

96. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F. GMES sentinel-1 mission. Remote Sens. Environ. 120, 2012. – P. 9–24.

97. Кантемиров Ю.И. Космический мониторинг смещений земной поверхности на месторождениях Кандым и Гумбулак Республики Узбекистан по данным космических радарных съемок. Геоматика. № 1. – 2011. – С. 72-79

98. Официальный сайт Mapexpert// <http://mapexpert.com.ua/>

# Приложение 1

## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РК МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ



УТВЕРЖДАЮ  
Первый проректор –  
Директор кампуса КазГАСА  
Д.А.Амандыкова  
2019

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы, выполненной в рамках  
диссертационной работы, докторантом кафедры маркшейдерского дела и геодезии  
КазННТУ им.К.И.Сатпаева  
Орынбасаровой Эльмиры Орынбасаровны  
в учебный процесс

Мы, ниже подписавшиеся члены комиссии:

Абилова Б.А.- директор Научного центра; Кузнецова И.А. – заведующий кафедрой;  
Омиржанова Ж.Т. – ассоц.проф., составили настоящий АКТ ВНЕДРЕНИЯ результатов  
научно-исследовательской работы, выполненной докторантом Орынбасаровой Э.О. в рамках  
диссертационной работы на тему: «Совершенствование методики комплексной подготовки и  
использования космических снимков в задачах оценки оседания промышленной поверхности  
в условиях эксплуатаций Тенгизского месторождения».

#### Основные результаты работы:

Указанная работа внедрена (использована) в учебный процесс в 2019-2020 учебном  
году в следующих лекционных курсах:

- «Автоматизация топографо-геодезических работ»;
- «Дистанционное зондирование Земли »;

**Эффект от внедрения (использования) результатов внедрения:** научно-технические  
результаты научно-исследовательской работы, выполненной докторантом Орынбасаровой  
Э.О. в рамках диссертационной работы имеют важное значение при выборе и обработке  
космических снимков, что позволяет улучшить качество подготовки специалистов по  
направлению «Геодезия и Картография»

Директор НЦ  
Заведующий кафедрой  
Ассоциированный профессор  
Докторант

Б.А.Абилова  
И.А.Кузнецова  
Ж.Т.Омиржанова  
Э.О.Орынбасарова