

Ж. Ш. Жантаев (АО «НЦ КИТ»)

В 1970 г. закончил Казахский политехнический институт по специальности «геофизика». В настоящее время — президент АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Казахстана. Доктор физико-математических наук.

А.Г. Фрейд (АО «НЦ КИТ»)

В 1970 г. закончил Томский политехнический институт по специальности «геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». В настоящее время — заведующий лабораторией исследования деформационных процессов земной коры Института ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Казахстана. Кандидат физико-математических наук.

А.В. Иванчукова (АО «НЦ КИТ»)

В 2010 г. закончила Казахский национальный университет по специальности «геодезия и картография». В настоящее время — младший научный сотрудник лаборатории исследования деформационных процессов земной коры Института ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Казахстана.

А.А. Калдыбаев (АО «НЦ КИТ»)

В 2011 г. закончил магистратуру Казахского национального университета по специальности «география». В настоящее время — ведущий инженер лаборатории геодинамики Института ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Казахстана.

С.М. Нурақынов (АО «НЦ КИТ»)

В 2009 г. закончил Казахский национальный университет по специальности «геодезия и картография». В настоящее время — ведущий инженер лаборатории исследования деформационных процессов земной коры Института ионосферы АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Казахстана.

Ю.И. Кантемиров (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работал младшим научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. работает в компании «Совзонд» ведущим специалистом отдела программного обеспечения.

С.Э. Никифоров (Ростехнадзор)

В 2000 г. окончил Московский государственный горный университет по специальности «горный инженер-маркшейдер». В настоящее время доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии Московского государственного горного университета, консультант Управления горного надзора Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Кандидат технических наук.

Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье рассматриваются вопросы космического радарного интерферометрического мониторинга вертикальных смещений земной поверхности над разрабатываемым нефтегазовым месторождением Тенгиз (Республика Казахстан).

Тенгиз — это крупнейшее по запасам месторожде-

ние Казахстана, открытое в 1979 г. и расположенное в Прикаспийской нефтегазовой провинции в 160 км к юго-востоку от г. Атырау (бывший Гурьев).

Продуктивные горизонты находятся в интервале глубин 3,8–5,4 км от земной поверхности. Существенной особенностью залежи является наличие в ней большого количества сероводорода,

находящегося под аномальновысоким пластовым давлением. Резервуар представлен сложно построенным карбонатно-трещинным или трещинно-пустотным коллектором и соляным флюидоупором. Особенность строения резервуара — в наличии отдельных гидроблоков, связь между которыми затруднена или отсутствует.

Аномальновысокое пластовое давление, сложное геологическое строение, а также значительный срок эксплуатации месторождения с постоянно нарастающими объемами извлекаемой нефти дают основание предполагать возможные просадки техногенного происхождения, что и послужило основанием для проведения данного исследования. В статье приводится пример интерферометрической обработки конкретной пары радарных снимков спутника Европейского космического агентства (ESA) ENVISAT/ASAR от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г., иллюстрирующий методику интерферометрического выявления вертикальных смещений земной поверхности, и в частности их численной оценки.

Также приводятся результаты реального проекта по выявлению смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз, произошедших с 2004 по 2010 г., по результатам применения методики SBas к данным 33-проходной цепочки радарных снимков

ENVISAT/ASAR и 12-проходной цепочки радарных снимков японского спутника ALOS/PALSAR. Обработка выполнялась в программном комплексе SARscape.

ОБРАБОТКА ОТДЕЛЬНОЙ ПАРЫ СНИМКОВ ENVISAT/ASAR

Для иллюстрации технологии интерферометрической обработки радарных снимков рассмотрим ее на конкретном примере одной из пар снимков ENVISAT/ASAR месторождения Тенгиз (снимки от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г.).

Предварительная оценка качества интерферометрической пары средствами функции Baseline estimation модуля SARscape Interferometry показывает (рис. 1), что перпендикулярная составляющая базовой линии около 17 м, что для спутника ENVISAT/ASAR является очень маленьким значением. Вместимость топографического интерференционного цикла (2PI Ambiguity height) составляет 530 м, что на порядок больше, чем реальный перепад высот на этом участке, а следовательно, фаза смещений земной поверхности значительно преобладает над фазой рельефа. Именно поэтому данная пара снимков была выбрана для демонстрации возможностей метода. Разница положений доплеровского центраида также незначи-

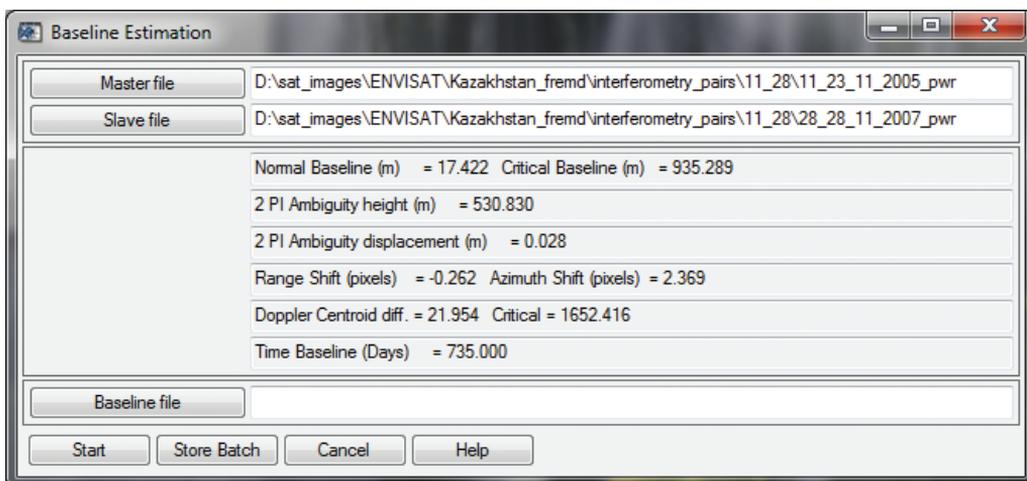


Рис. 1. Оценка основных параметров пары снимков ENVISAT/ASAR от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г.

тельна (22 Гц при критической величине 1652 Гц), и поэтому ее влияние минимально.

Первым шагом интерферометрической обработки является совмещение основного и вспомогательного радарных изображений интерферометрической пары в автоматическом режиме. В случае пары с малой базовой линией этот шаг лучше выполнять без участия цифровой модели рельефа (ЦМР). Совмещение в SARscape выполняется в автоматическом режиме во время процедуры Interferogram Generation Without DEM модуля SARscape Interferometry. Оно выполняется в три этапа:

1. Совмещение с пиксельной точностью по орбитальным параметрам.
2. Уточнение сдвига одного снимка относительно другого с субпиксельной точностью с использованием нерегулярной сетки окон, характеризующихся корреляцией амплитуд выше заданного порога.
3. Уточнение сдвига одного снимка относительно другого с использованием нерегулярной сетки окон, в которых рассчитываются когерентности фаз этих снимков (в расчет идут значения сдвига, вычисленные по окнам, у которых соотношение сигнал—шум рассчитываемое с учетом когерентности, выше за-

данного порога). На данном этапе достигается точность корегистрации снимков до 1/100 пикселя.

Совмещение двух снимков прошло удачно в автоматическом режиме, после чего в рамках этой же процедуры Interferogram Generation был выполнен второй шаг — расчет комплексной интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлементного перемножения фаз радарных снимков пары. Интерферограмма показана на рис. 2.

Комплексная интерферограмма в общем случае содержит в себе несколько компонентов:

- фазу рельефа;
- фазу смещений;
- атмосферные артефакты;
- фазовый шум.

В нашем случае фаза рельефа хоть и незначительна (из-за малой базовой линии и из-за не ярко выраженного рельефа территории), но тем не менее ее необходимо удалить из интерферограммы. Это делается на следующем шаге интерферометрической обработки с помощью процедуры Interferogram Flattening модуля SARscape Interferometry. В рамках этой процедуры выполняется разделение топографического и деформационного компонентов фазы за счет синтеза фазы рельефа с помощью имеющейся

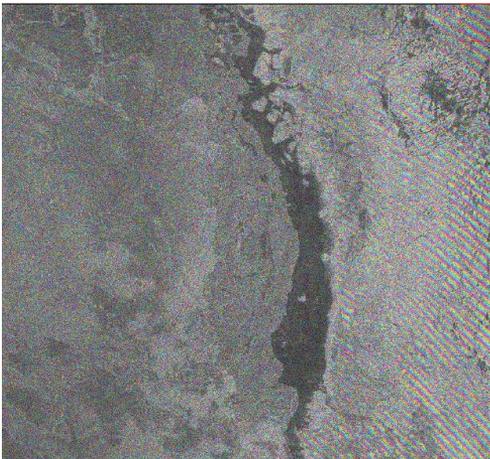


Рис. 2. Комплексная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г.

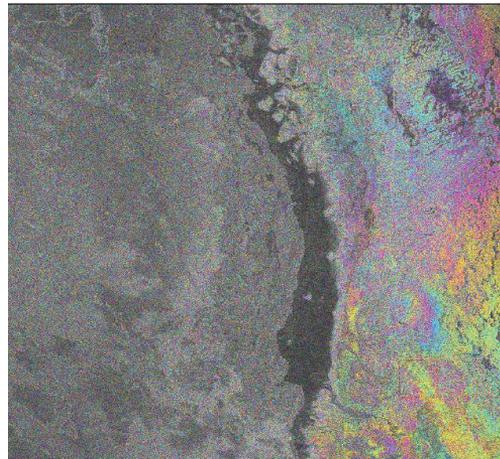


Рис. 3. Дифференциальная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г.

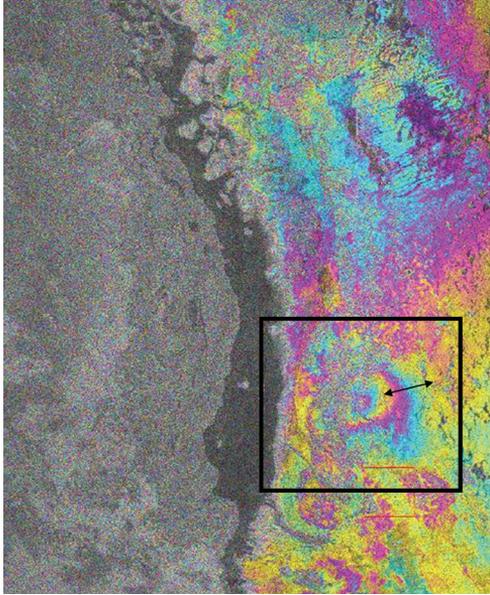


Рис. 4. Фильтрованная дифференциальная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г.

ЦМП, в качестве которой авторами использовалась ЦМП SRTM. Основным выходным файлом данной процедуры является дифференциальная интерферограмма, представляющая собой результат вычитания синтезированной фазы рельефа из комплексной интерферограммы. Дифференциальная интерферограмма для обрабатываемой пары снимков показана на рис. 3.

Дифференциальная интерферограмма содержит в себе компоненту смещений и компоненту фазового шума. Чтобы уменьшить уровень шума, выполняется адаптивная фильтрация дифференциальной интерферограммы. На фильтрованной дифференциальной интерферограмме, показанной на рис. 4, хорошо заметны два concentрических интерференционных цикла (так называемых фринга), отражающих смещения земной поверхности за период между 2005 и 2007 гг. Каждый фринг соответствует смещению, равным половине длины волны радиолокатора ENVISAT (длина волны — 5,5 см, половина длины волны — 2,75 см). Черным квадратом на рис. 4 обведена муфта оседаний земной поверхности над месторождением Тенгиз (один интерференционный цикл соответствует смещениям земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора, т.е.

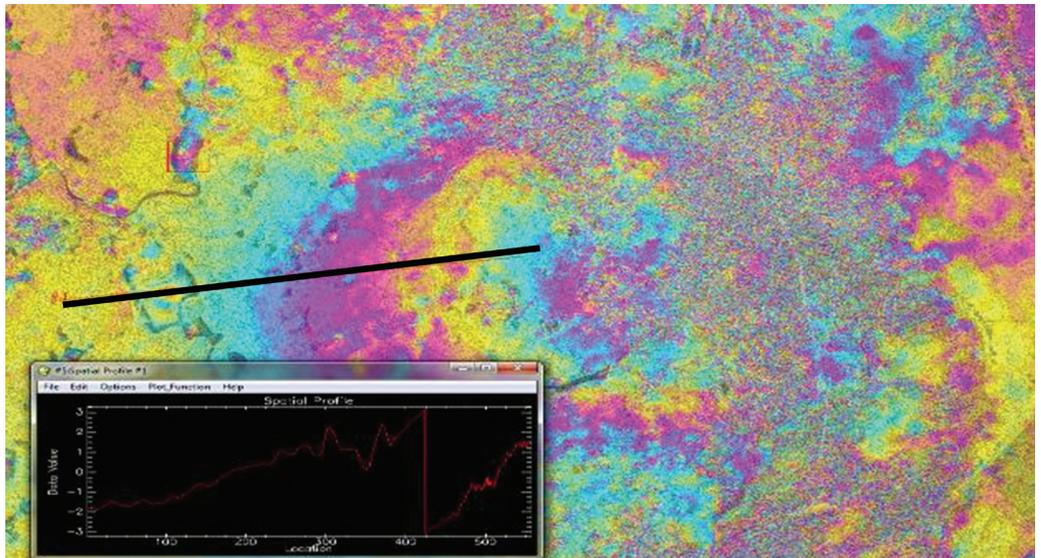


Рис. 5. Иллюстрация периодической природы фазы и ее разрывов на границе интерференционных циклов

2,75 см). На рисунке отчетливо наблюдаются два концентрических интерференционных цикла (т.е. смещения до 5,5 см за период в 2 года — с 2005 до 2007).

Фаза на дифференциальной интерферограмме имеет периодическую природу, и между соседними фрингами существует разрыв фазы (см. рис. 5). Чтобы получить непрерывную фазу, необходимо выполнить процедуру ее развертки. На рис. 6 показана развернутая фаза на тот же участок, что и на рис. 5. Скачок (разрыв) фазы на границе фрингов устранен. Участки черного цвета – зашумленные зоны интерферограммы для которых фаза не разворачивалась (в дальнейшем расчете смещений эти точки не участвуют). На рис. 7 показана развернутая фаза на весь обрабатываемый участок.

Далее развернутая фаза с использованием нескольких контрольных точек, взятых с ЦМР SRTM для коррекции орбиты, была преобразована в смещения в миллиметрах. Модель смещений на весь обрабатываемый участок месторождения Тенгиз и прилегающих территорий показана на рис. 8.

Выше был приведен пример обработки одной из возможных пар снимков 33-проходной цепочки. Однако обработка одной пары снимков не является

статистически представительным результатом. Для того чтобы уверенно картировать смещения, необходима обработка многих пар снимков, в том числе перекрещивающихся во времени, чтобы смещения, произошедшие за определенный интервал времени, оценивались не по одной, а по нескольким (или многим) парам снимков, охватывающих данный интервал. Поэтому с той же последовательностью действий, как была обработана пара снимков от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г., были обработаны 60 других пар этой 33-проходной цепочки, отобранные по принципу наименьших базовых линий в соответствии с методом SBAs [1]. Их обработка описана в следующем подразделе.

ОБРАБОТКА 33-ПРОХОДНОЙ ЦЕПочки ENVISAT ASAR МЕТОДОМ SBAS

Из снимков 33-проходной цепочки можно составить всего 528 независимых пар ($33 \times 32 / 2$). Поскольку к смещениям земной поверхности наиболее чувствительны интерферометрические пары, характеризующиеся малыми перпендикулярными компонентами базовых линий, логично отобрать именно их для дальнейшей обработки. Исходя из статистического распределения базовых линий данной конкретной

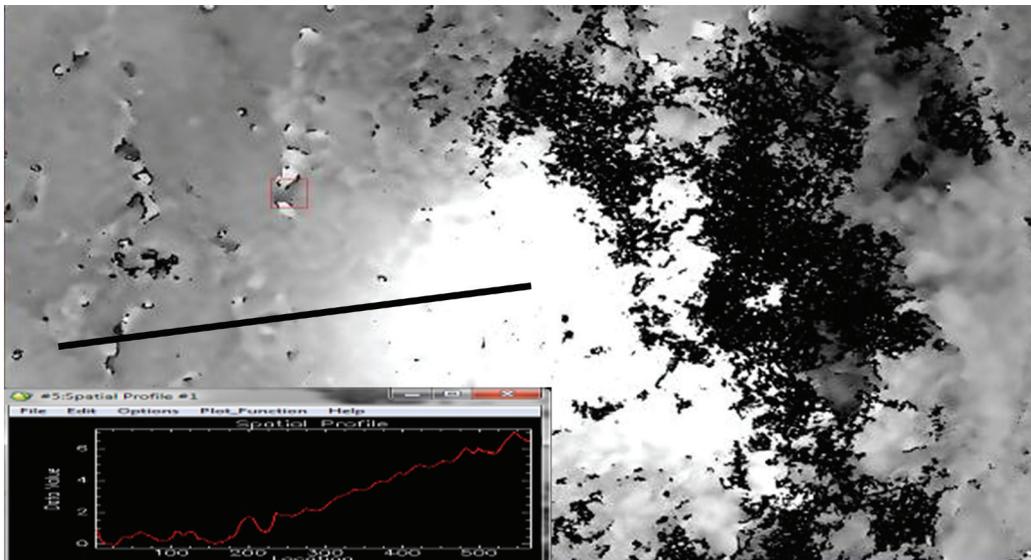


Рис. 6. Развернутая фаза на тот же участок, что и на рис. 5

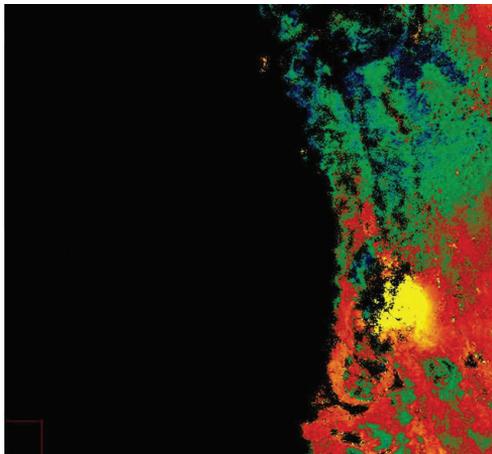


Рис. 7. Развернутая фаза в псевдоцветах на весь обрабатываемый участок

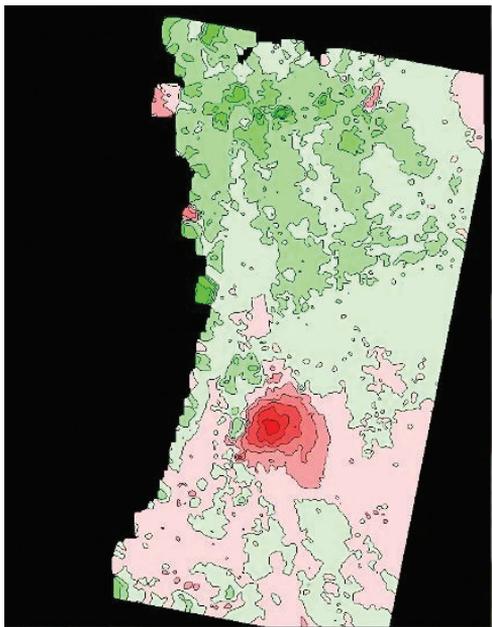


Рис. 8. Геокодированная карта вертикальных смещений земной поверхности за период с 23.11.2005 г. по 28.11.2007 г., с изолиниями смещений, проведенными через 10 мм. Красный цвет — оседания, зеленый цвет — поднятия. Оседания максимально достигают 7,5 см за два года

цепочки, а также из опыта авторов, для отбора пар для дальнейшей обработки был установлен порог базовых линий — до 30% от критической базовой. Кроме того, чтобы избежать выбора пар с сильной временной декорреляцией, было установлено максимальное значение временной базы в 365 суток.

После определения этих исходных параметров была выполнена интерферометрическая обработка 33-проходной цепочки данных ENVISAT по методу малых базовых линий (SBAs), реализованному в программном комплексе SARscape в модуле Interferogramm Stacking. Именно обработка по этому методу была выбрана для получения основного результата по данным ENVISAT за 2004–2009 гг., а именно для статистически выверенной оценки смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз, произошедших за рассматриваемый период.

Сначала с указанными выше параметрами была применена функция Connection Graph модуля Interferogramm Stacking. Результатом явились 60 из 528 теоретически возможных пар снимков. Схематически выбранные 60 пар снимков в координатах «время — базовая линия» приведены на рис. 9. Как видно из рисунка, большая часть рассматриваемого периода (с 2004 по 2009 г.) анализируется по результатам обработки не одной, а нескольких пар, что значительно увеличивает достоверность получаемых результатов. В частности, при одновременной обработке нескольких пар вклад реально закономерно происходящих динамических процессов земной поверхности увеличивается, а роль случайных и незакономерных во времени факторов, влияющих на интерферометрическую фазу, таких как атмосфера, электромагнитные шумы, осадки и т. д., сильно падает.

Далее обработка всех этих выбранных пар велась в той же последовательности, что и обработка пары от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г., подробно рассмотренная выше. Авторы считают излишним приводить все промежуточные результаты по каждой из 60 пар, поскольку последовательность их обработки полностью идентична. Приведем все же на рис. 10 несколько фильтрованных дифференциальных интерферограмм, отражающих смещения земной поверхности за разные периоды, для иллюстрации того, что мульда оседаний, выявленная по паре от 23.11.2005 г. и 28.11.2007 г., хорошо заметна также и на других

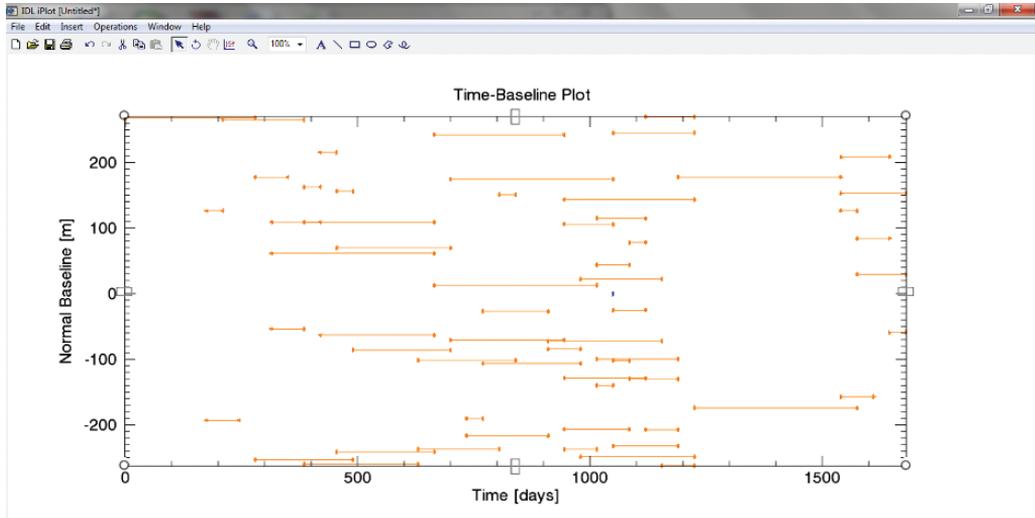


Рис. 9. Иллюстрация пар снимков 33-проходной цепочки ENVISAT, выбранных по принципу малых базовых линий. По оси X — время в сутках (первый по порядку снимок принят за ноль). По оси Y — базовые линии в метрах (знаки «+» и «-» означают отклонение вправо и влево от маршрута спутника ENVISAT)

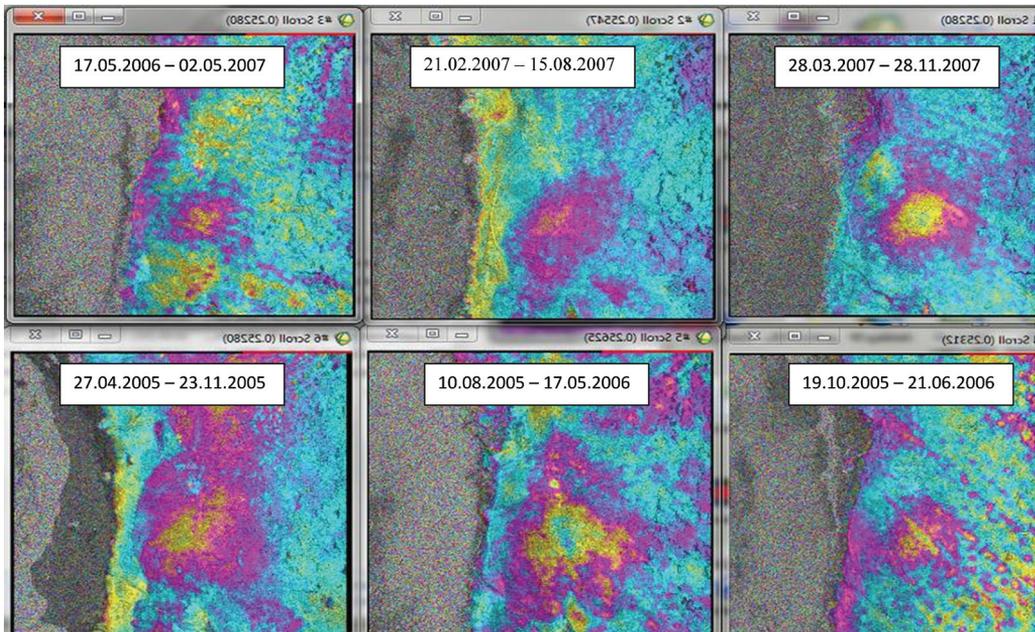


Рис. 10. Несколько типовых фильтрованных дифференциальных интерферограмм, рассчитанных по парам снимков ENVISAT 33-проходной цепочки с малыми базовыми линиями

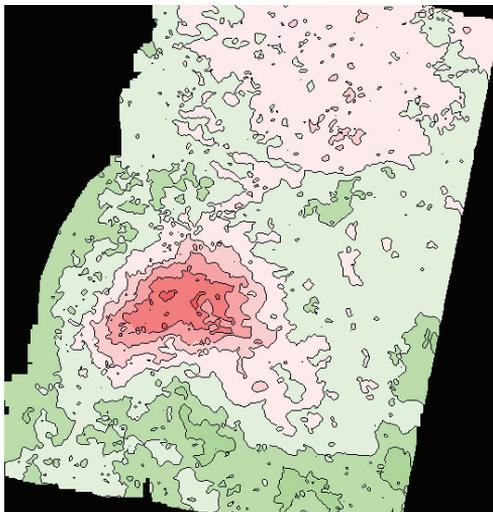


Рис. 11. Результирующая модель вертикальных смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 г. в цветовом кодировании. Зеленый цвет — поднятия, красный цвет — оседания. Изолинии смещений подписаны в миллиметрах («+» — поднятия, «-» — оседания)

интерферограммах анализируемой 33-проходной цепочки за различные временные периоды. Абсолютные значения смещений по дифференциальным интерферограммам можно оценить исходя из количества интерференционных циклов (фрингов) или их долей на этих интерферограммах, поскольку полный интерференционный цикл на них соответствует смещениям, равным 2,75 см, т. е. половине длины волны радиолокатора ENVISAT.

Для математического вычисления динамики смещений за 2004–2009 гг. из рассчитанных 60 интерферограмм ENVISAT был применен алгоритм SBAS Inversion, реализованный в модуле SARscape Interferogram Stacking. Данный алгоритм подразумевает восстановление последовательной во времени динамики смещений поверхности по результатам совместной обработки перекрестных во времени интерферометрических пар снимков. На выходе данной процедуры генерируются модели вертикальных смещений земной поверхности на каждую дату съемки (поставляются в электронном виде в растровом формате ENVI), результирующая модель вертикальных смещений за весь период наблюдений и

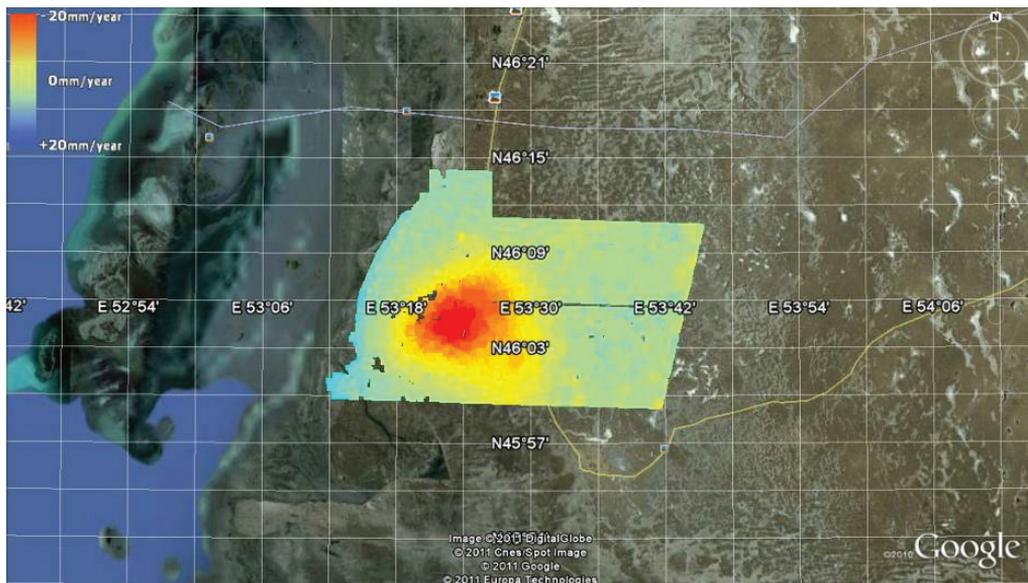


Рис. 12. Мультида оседания земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 г., зарегистрированная по данным ENVISAT, отображенная в среде Google Earth

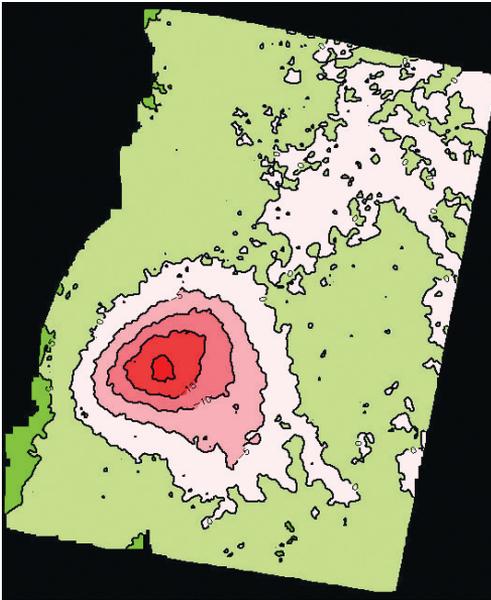


Рис. 13. Графики оседаний в миллиметрах для нескольких типовых точек — постоянных рассеивателей радарного сигнала, расположенных в самом центре зарегистрированной мульды оседаний. По оси X — даты, по оси Y — смещения в миллиметрах, знак «-» означает движение вниз (оседание)

модель среднегодовой скорости вертикальных смещений. Кроме того, генерируется точечный векторный файл постоянных рассеивателей радарного сигнала (в атрибутах каждой точки записаны смещения на каждую дату съемки).

Результирующая модель смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 г. в цветовом кодировании представлена на рис. 11. Мульда оседаний над месторождением Тенгиз в среде Google Earth показана на рис. 12. Графики оседаний в миллиметрах для нескольких типовых точек — постоянных рассеивателей радарного сигнала, расположенных в самом центре зарегистрированной мульды оседаний — показаны на рис. 13. Модель среднегодовой скорости смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 г. показана на рис. 14.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов мониторинга смещений земной поверхности, произошедших над месторождением Тенгиз с 2004 по 2009 г. и зарегистрированных в ходе интерферометрической обработки радарных данных ENVISAT, показал наличие ускоряющихся во времени оседаний земной поверхности над районом активной добычи углеводородов из этого месторож-

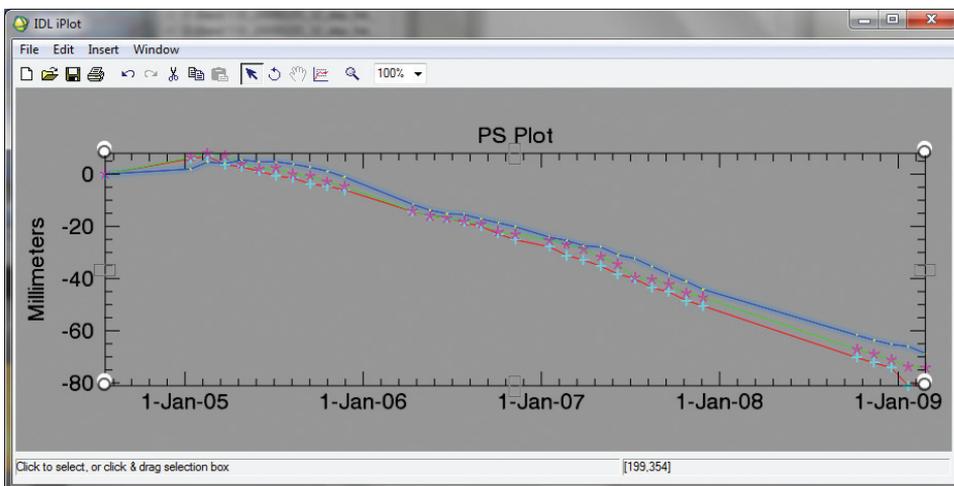


Рис. 14. Модель среднегодовых скоростей вертикальных смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 г.

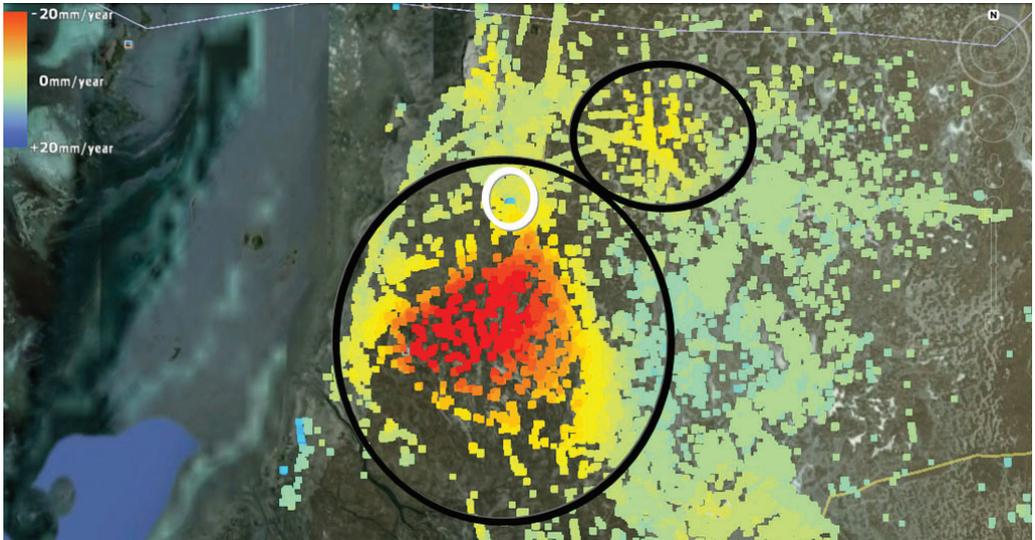


Рис. 15. Основные особенности, дешифрируемые на результирующей модели смещений земной поверхности по данным ALOS за 2007–2010 гг.: основная мульда оседаний земной поверхности и новая формирующаяся мульда оседаний (черные круги), а также локальный участок поднятий (белый круг)

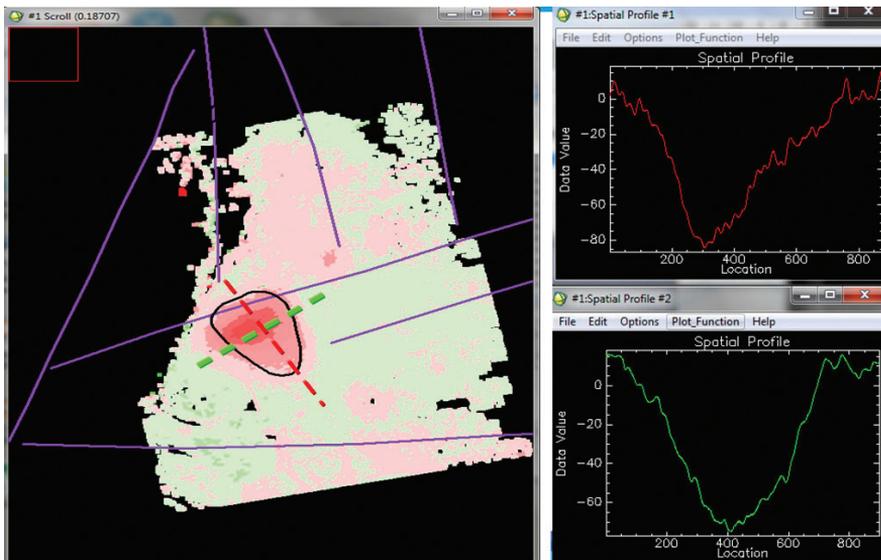


Рис. 16. Сопоставление карты смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз (слева) с контуром месторождения на глубине 5 км (черный контур) и геологическими разломами (фиолетовые линии). Красный и зеленый пунктир — продольный и поперечный профили мульды оседаний. Справа — смещения по продольному и поперечному профилям мульды смещений

дения. Скорость оседаний в центре основной зарегистрированной мульды достигает 30 мм в год. На момент окончания анализируемой цепочки данных ENVISAT (конец 2009 г.) западная граница мульды (нулевая изолиния смещений) не достигла береговой линии, но движется по направлению к ней.

По сравнению с анализируемыми в рамках статьи данными ENVISAT за 2004—2009 гг. в результатах по данным ALOS за 2007—2010 гг. проявились следующие основные особенности (рис. 15):

- западная граница основной мульды оседаний сместилась в сторону береговой линии и достигла ее к концу 2010 г.;
- сформировалась еще одна мульда оседаний земной поверхности — к северо-востоку от первой;
- появился локальный участок поднятий земной поверхности на северной окраине основной мульды оседаний — в районе сооружений завода по очистке от сероводорода (возможно, это ложные поднятия, вызванные изменением высот сооружений складирования серы, которая откладывается слой за слоем открытым способом).

Сопоставительный анализ результирующей карты смещений с геологическими данными показал (рис. 16), что:

- основная зарегистрированная мульда оседаний земной поверхности совпадает с контуром месторождения Тенгиз на глубине 5 км;
- в северо-западной части мульды — в районе геологического разлома — смещения более интенсивные, чем в юго-восточной ее части, что иллюстрирует продольный профиль смещений на рисунке 15;
- вторая — небольшая — мульда оседаний, образовавшаяся с 2009 по 2010 г. к северо-востоку от первой — основной — мульды оседаний, приурочена к узлу пересечения двух крупных геологических разломов.

Для регулярного мониторинга зарегистрированных по архивным спутниковым данным техногенных смещений и деформаций, локально усиленных природными геологическими причинами, авторы рекомендуют запланировать целевую многопроходную радарную съемку с выдерживаемым временным интервалом (до 8 раз в месяц) и с гораздо более высоким пространственным разрешением (до 1 м).

Наилучшим образом для этой задачи, по мнению авторов, подходит итальянская спутниковая радарная группировка COSMO-SkyMed 1-4.

Данные этих возможных съемок могут быть также обработаны специалистами компании «Совзонд». Кроме того, компания «Совзонд» может поставить программный продукт SARscape по обработке радарных данных, осуществить обучение работе в этом программном продукте, а также проконсультировать и внедрить технологии наблюдений за смещениями земной поверхности с использованием радарных данных на базе заказчика.

Дальнейшее наблюдение за оседаниями земной поверхности необходимо, чтобы предотвратить возможное неожиданное подтопление объектов наземной инфраструктуры добычи углеводородов, поскольку четко зафиксировано развитие мульды оседаний на запад — к побережью Каспийского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Richards: "A Beginner's: Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing". *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 22, No. 9, September 2007.
2. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: "Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 5, Part 1, Sept. 2000, pp. 2202 – 2212.
3. Ferretti, C. Prati and F. Rocca: "Permanent scatterers in SAR interferometry". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 1, Jan. 2001, pp. 8 – 20.
4. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes: "A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers". *Geophysical Research Letters*, vol. 31, December 2004.
5. P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti: "A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferometry". *IEEE Aerospace and Electronic*, Vol. 40, No. 11, November 2002.
6. Михайлов И.М. Стрoение нефтяной залежи месторождения Тенгиз по данным геофлюидодинамики // Геология нефти и газа. — 1990. — № 2.