

Ю. И. Кантемиров (компания «Совзонд», Россия)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. После окончания университета работал научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. — ведущий специалист по тематической обработке радарных данных ДЗЗ компании «Совзонд».

А. Т. Камза (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан)

В 2009 г. окончила Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева по специальности «геодезия и картография». В настоящее время — ведущий ГИС-специалист ТОО «НПЦ «Геокен».

А. М. Бермуханова (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан)

В 2011 г. окончила Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева по специальности «геодезия и картография». В настоящее время — инженер-геодезист ТОО «НПЦ «Геокен».

А. Ж. Тогайбеков (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан)

В 2011 г. окончил Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева по специальности «геодезия и картография». В настоящее время — ведущий геодезист ТОО «НПЦ «Геокен».

М. А. Сапарбекова (ТОО «НПЦ «Геокен», Казахстан)

В 2013 г. окончила Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева по специальности «геология и разведка месторождения полезных ископаемых». В настоящее время — инженер-геофизик ТОО «НПЦ «Геокен».

С. Э. Никифоров (МГГУ, Россия)

В 2000 г. окончил Московский государственный горный университет (МГГУ) по специальности «маркшейдерское дело». В настоящее время консультант Управления государственного горного и металлургического надзора, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии МГГУ. Кандидат технических наук.

Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан

ВВЕДЕНИЕ

В статье 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). 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. Отображение территории месторождения на радарном снимке приведено на рис. 1.

Для выявления смещений земной поверхности была выполнена интерферометрическая обработка данных ALOS/PALSAR в программном обеспечении ENVI/SARscape (Exelis VIS, США). Интерферометрическая обработка данных многопроходных космических радарных съемок выполнялась



Рис. 1. Отображение территории нефтяного месторождения на радарном снимке

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 мультивременной серии радарных съемок ALOS/PALSAR. 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.

ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ ОДНОЙ ИЗ ПАР СНИМКОВ

Рассмотрим технологию интерферометрической обработки радарных снимков, примененную для мониторинга смещений земной поверхности, на конкретном примере одной из пар снимков ALOS/PALSAR (съемки от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г.).

Оба снимка пары отсняты в двухполяризационном режиме FBD, для интерферометрической обработки были выбраны поляризационные каналы HH этих съемок.

Предварительная оценка качества интерферометрической пары средствами функции Baseline estimation модуля SARscape Interferometry показывает, что

перпендикулярная составляющая базовой линии — около 1230 м, что для спутника ALOS/PALSAR является достаточно небольшой базовой линией. Критическая база для данной пары снимков составляет 6566 м, т. е. перпендикулярная база нашей пары составляет менее 20% от критической при выбранном нами пороге отсеечения пар по величине базовой линии, равном 40% от критической величины. Вместимость топографического интерференционного цикла (перепада высот рельефа, соответствующего перепаду фазы в 2π) составляет 52 м, что значительно больше, чем реальный перепад высот на этом участке. Следовательно, фаза смещений земной поверхности будет значительно преобладать над фазой рельефа. Именно поэтому данная пара снимков, как типовая из серии пар снимков с базами менее 40% от критической, может быть выбрана для демонстрации работы технологии. Разница положений доплеровского центроида также незначительна (16 Гц при критической величине 2160 Гц), поэтому не сильно повлияет на обработку. Временной промежуток между съемками составляет 1104 дня.

Первым шагом интерферометрической обработки является точное пространственное совмещение (коррегистрация) основного и вспомогательного радарных изображений интерферометрической пары, выполняемое в SARscape в автоматическом режиме. Какое изображение выбрать основным, а какое вспомогательным — не играет принципиальной роли, однако в случае обработки одной пары снимков предпочтительнее выбирать основным первое по дате изображение. В случае пары с малой базовой линией этот шаг лучше выполнять без участия ЦМР. Совмещение в SARscape выполняется в автоматическом режиме во время процедуры SARscape > Interferometry > 1B Interferometric workflow (multi steps) > Interferogram Generation модуля SARscape Interferometry.

Это совмещение проводится 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 с учетом когерентности выше заданного порога).

На первом этапе достигается точность корегистрации до одного или нескольких пикселей, на втором — субпиксельная точность корегистрации, на третьем — точность до 1/100 пикселей.

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

Комплексная интерферограмма в общем случае содержит в себе несколько компонентов: фазу рельефа, фазу смещений, атмосферные артефакты, электромагнитный шум.

В нашем случае фаза рельефа незначительна (из-за малой базовой линии и не ярко выраженного рельефа территории), тем не менее ее необходимо удалить из интерферограммы. Это делается в рамках той же процедуры Interferogram Generation модуля SARscape Interferometry: выполняется разделение компонентов фазы Φ_{topo} и Φ_{def} за счет синтеза фазы рельефа

с помощью уже имеющейся ЦМР, в качестве которой авторами использовалась ЦМР 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 рис. 3.

Дифференциальная интерферограмма содержит в себе компоненту смещений земной поверхности, произошедших за период между съемками интерферометрической пары, компоненту фазового шума и компоненту влияния атмосферных условий при съемке каждого из снимков пары. Чтобы уменьшить уровень шума, выполняется адаптивная фильтрация дифференциальной интерферограммы с помощью фильтра Голдстейна. Фильтрованная дифференциальная интерферограмма показана на рис. 4.

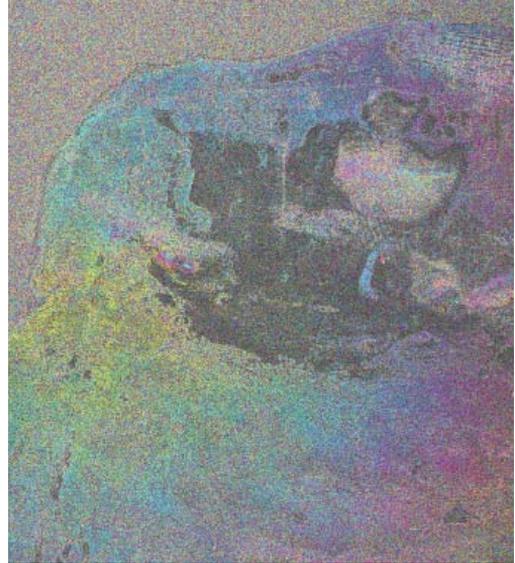


Рис. 3. Дифференциальная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г.

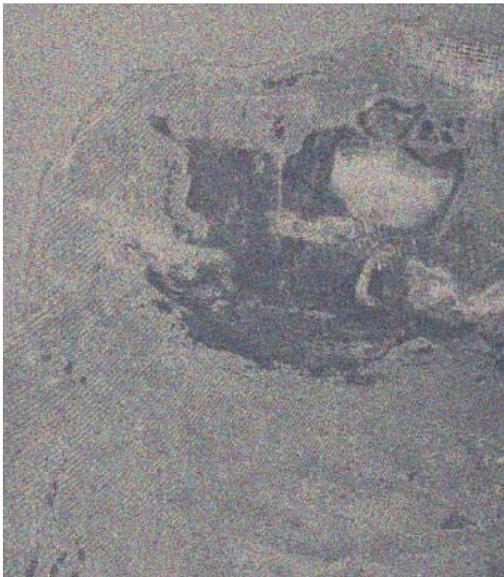


Рис. 2. Комплексная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г.

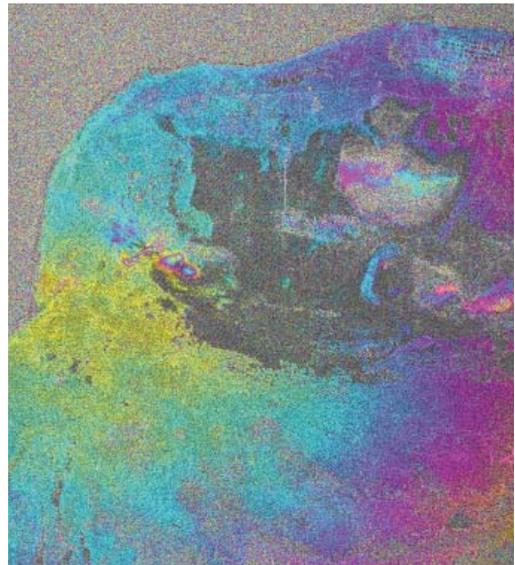


Рис. 4. Фильтрованная дифференциальная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г.

На фильтрованной дифференциальной интерферограмме один полный спектр цветов (интерференционный цикл или фринг) соответствует смещениям земной поверхности за период между съемками снимков пары, равный половине длины волны радара (в случае ALOS/PALSAR с длиной волны 23,5 см один фринг соответствует смещениям, равным 11,75 см). Интенсивные смещения земной поверхности, по амплитуде превышающие полный интерференционный цикл (более 11,75 см), заметны на фильтрованной дифференциальной интерферограмме в ее западной части — над рассматриваемым нефтяным месторождением.

Для наглядности проиллюстрируем периодическую природу фазы и переход от периодичной к непрерывной фазе на примере выявленного участка интенсивных смещений.

Фаза на дифференциальной интерферограмме имеет периодическую природу, измеряется от $-π$ до $+π$, и поэтому, когда величина смещений земной поверхности превышает половину длины волны радара (величина разности фаз превышает $2π$), происходит скачок или разрыв фазы, равный по величине ровно $2π$, после чего разность фаз продолжает нарастать. Данный эффект проиллюстрирован на рис. 5.

В верхней части рисунка показано увеличение на участок смещений земной поверхности величиной более 1 фринга (от желтого цвета вокруг участка до желтого цвета через концентрический спектр цветов и далее до центра участка — еще примерно половина фринга). В нижней части рисунка показаны значения разности фаз по профилю «AB» в радианах (ось X — количество пикселей вдоль профиля, каждый пиксель — 15 м). В начале профиля заметен перепад фазы от -1 до $-3,14$ радиан, затем фаза, достигнув минимума в $-3,14$ ($-π$), совершает скачок вверх на $2π$, после чего опять продолжает падение до $-π$, потом опять скачет вверх до $π$ и,

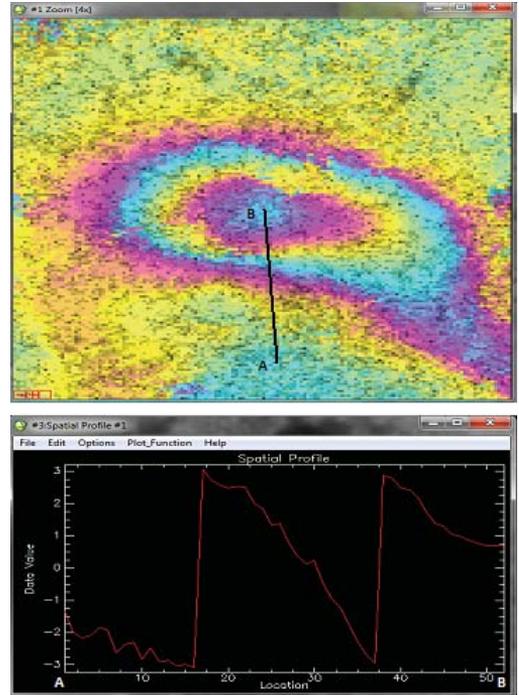


Рис. 5. Иллюстрация периодической природы фазы и ее разрывов на границе интерференционных циклов

наконец, опять падает до своего минимума в $+1$ радиан. Таким образом, полный перепад фазы составляет чуть менее $4π$, однако абсолютные значения фазы на интерферограмме меняются только лишь от $-π$ до $+π$.

Чтобы получить непрерывную фазу, необходимо выполнить процедуру ее развертки. В SARscape представлены три метода развертки фазы. В данном случае развертка была выполнена методом Minimum Cost Flow (потока минимальной стоимости) с триангуляцией Делоне. На рис. 6 показана развернутая фаза на тот же участок, что и на рис. 5. Сравнивая значения фазы по профилю «AB», отметим устранение разрывов фазы, равных по величине $2π$ на границах интерференционных циклов, и получение непрерывного изображения развернутой фазы.

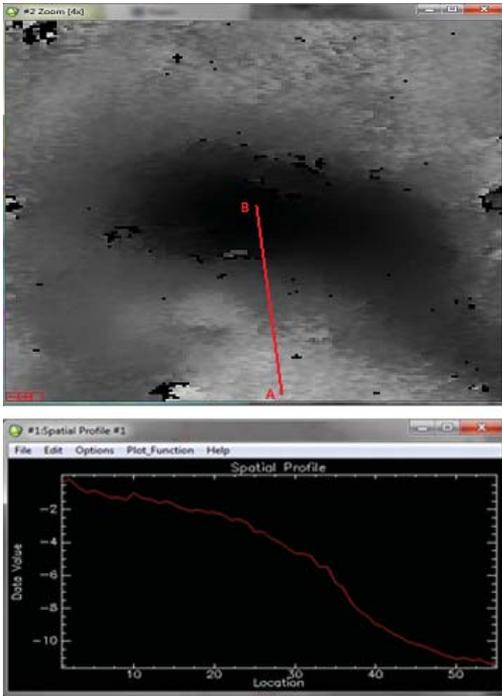


Рис. 6. Сверху — изображение непрерывной развернутой фазы на участок смещений с рис. 5. Снизу — значения развернутой разности фаз по профилю «АВ» в радианах. Теперь мы видим полный перепад фазы без разрывов (скачков), и он соответствует смещениям земной поверхности с 2007 по 2010 г. величиной чуть менее длины волны ALOS/PALSAR (чуть менее 23,5 см)

На рис. 7 показана развернутая фаза на всю площадь снимка. Хорошо заметен плавный (непрерывный) характер фазы на территории суши и рваная (зернистая) фаза на водной поверхности (северо-запад снимка) и на большом участке солончаков по центру снимка. Однако это изображение развернутой фазы еще не готово для пересчета в смещения в метрической системе. Если провести профиль через все изображение развернутой фазы в направлении с северо-запада снимка на юго-восток (рис. 7), то в значениях фазы вдоль профиля хорошо заметен линейный уклон, вызванный неточностью знания орбитального положения спутника (рис. 8).

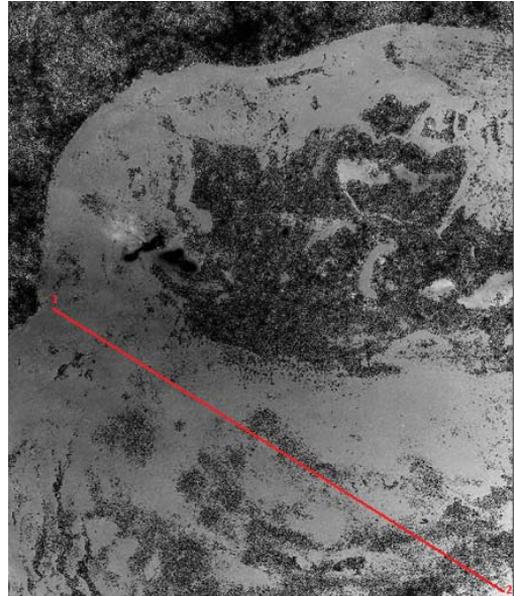


Рис. 7. Изображение развернутой (непрерывной) фазы на всю площадь снимков и линия профиля «1-2»

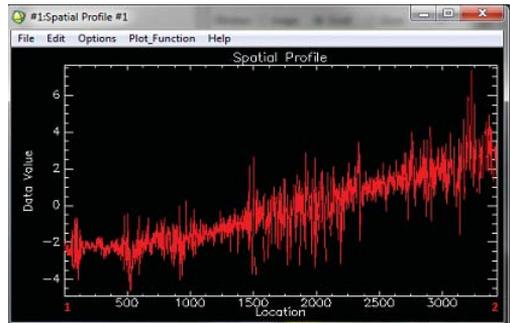


Рис. 8. Значения развернутой фазы по профилю «1-2». Заметен постоянный линейный фазовый уклон в направлении с северо-запада на юго-восток снимка, вызванный неточностью знания орбит спутника

Для устранения уклона фазы необходимо выполнить процедуру коррекции орбитальных параметров спутника.

Процедура коррекции орбит реализована в SARscape в виде функции SARscape > Interferometry > Refinement and Re-flattening.

На входе эта процедура требует, помимо всех ранее созданных промежуточных продуктов обработки пары радарных снимков, файла контрольных точек, проставленных в участки плавной (неизменяющейся) фазы, без смещений и резких перепадов рельефа, для которых также известны географические координаты и абсолютные высоты над эллипсоидом WGS-84. Данные точки могут быть проставлены оператором приблизительно равномерно по площади снимка на участках фазы без сильных фазовых разностей и в не слишком зашумленные участки. Далее точкам присваиваются географические координаты и абсолютные высоты с общедоступной глобальной ЦМР SRTM. Для этого в SARscape существует удобный инструмент General Tools > Generate Ground Control Points File.

После запуска процедуры Refinement and Re-flattening с использованием на входе файла набранных контрольных точек с известными координатами и высотами пересчитываются файлы фильтрованной дифференциальной интерферограммы и развернутой фазы, из которых удаляется уклон фазы, вызванный неточностью знания орбит спутника.

Так, на изображении исходной фильтрованной дифференциальной интерферограммы, приведенном на рис. 4, заметны диагональные полосы (перепад цветов слева направо от голубого цвета в левой верхней части снимка через синий и розовый цвета к желтому цвету в правом нижнем углу снимка). Этот перепад полностью устранен в откорректированной фильтрованной дифференциальной интерферограмме (рис. 9). Теперь вся площадь снимка характеризуется ровным голубым цветом, соответствующим нулевой разности фаз, за исключением участков смещений земной поверхности, наиболее ярко выраженных на территории рассматриваемого нефтяного месторождения.

Рассмотрим также скорректированное изображение развернутой фазы, приведенное на рис. 10. В значениях фазы по профилю «1-2», приведенных на рис. 11, систематический уклон фазы отсутствует. Это подтверждает, что коррекция орбитальных параметров выполнена успешно и развернутая фаза готова к пересчету в значения смещений в метрах. Этот пересчет осуществляется средствами функции SARscape > Interferometry > Phase to displacement conversion and geocoding.

Однако не все значения фазы следует пересчитывать в значения смещений. Фактически и водная поверхность, и поверхность сора (солончака), на которых фаза крайне зашумлена (особенно на воде), тоже имеют определенные значения фазы, но они совершенно не коррелируются со смещениями земной поверхности. Более

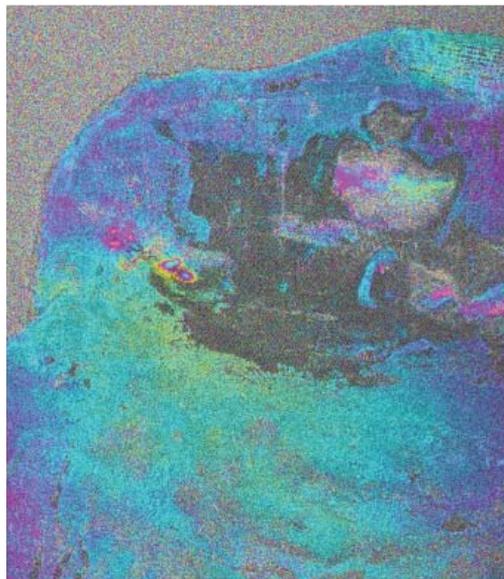


Рис. 9. Скорректированная фильтрованная дифференциальная интерферограмма, рассчитанная по паре радарных снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г., с устраненным систематическим уклоном фазы, вызванным неточностью знания орбит спутника

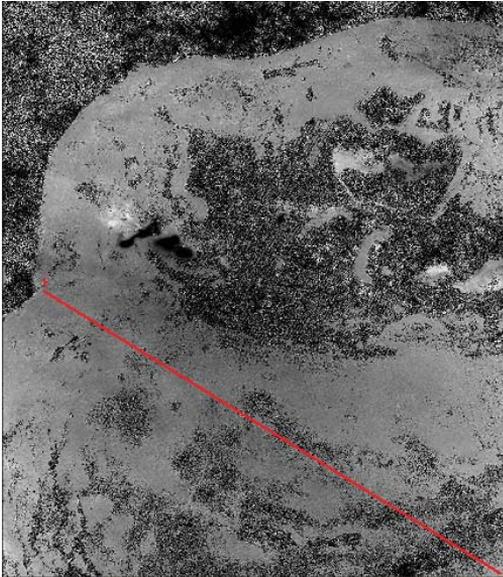


Рис. 10. Изображение скорректированной развернутой фазы, рассчитанной по паре радарных снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г., с устраненным систематическим уклоном фазы, вызванным неточностью знания орбит спутника

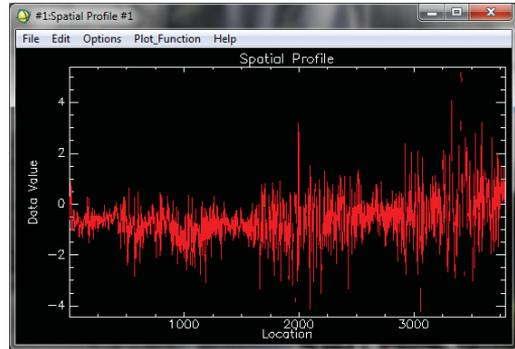


Рис. 11. Значения развернутой фазы по профилю «1-2». Устранен уклон фазы, присутствовавший в ней до коррекции орбиты



Рис. 12. Изображение когерентности фаз радарных съемок. Значения когерентности, близкие к нулю, — темный цвет, близкие к единице — белый цвет. Перепад значений от нуля к единице соответствует перепаду цветов от темного к белому через градации серого цвета

того, значения фазы на воде вообще не имеют физического смысла, они случайны. Для отделения значимых значений фазы от незначимых используется такой вспомогательный параметр, как когерентность фаз (корреляция фаз). Она измеряется в безразмерных величинах от 0 до 1 и рассчитывается по фильтрованной дифференциальной интерферограмме. Изображение когерентности приведено на рис. 12.

На изображении когерентности хорошо заметно, что вода в северо-западной части снимка и сор (солончак) по центру снимка характеризуются низкими значениями когерентности, тогда как остальная площадь снимка, включая область наземной инфраструктуры рассматриваемого нефтяного месторождения, характеризуется достаточно высокими значениями когерентности. Чтобы отделить значимые значения

фазы от шума и считать смещения только для пикселей со значимыми значениями фазы, необходимо установить порог когерентности. Для развертки фазы устанавливался достаточно низкий порог когерентности (0,15), чтобы помочь процессу

развертки обходить пространственные препятствия. При генерации финального продукта (карты смещений земной поверхности) порог отсеечения пикселей по значению когерентности повышался до 0,25 (значения смещений вычислялись только для пикселей со значениями когерентности выше 0,25).

Результирующая карта смещений земной поверхности приведена на рис. 13. На ней в первую очередь выделяются участки интенсивных поднятий и умеренных оседаний на территории рассматриваемого нефтяного месторождения и область зашумленного результата на площади, покрытой солончаками.

Выше приведен пример обработки одной из возможных пар снимков 22-проходной цепочки. Однако обработка одной пары снимков не является статистически

представительным результатом, подходящим для численного (количественного) анализа смещений. Чтобы уверенно картировать смещения, необходима обработка многих пар снимков, в том числе перекрещивающихся во времени, чтобы смещения, произошедшие за определенный интервал времени, оценивались по нескольким парам снимков, охватывающим данный интервал. Поэтому с той же последовательностью действий, как была обработана пара снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г., были обработаны остальные пары исходной 22-проходной серии, отобранные по принципу наименьших базовых линий в соответствии с методом Small Baseline Series Interferometry (SBAs), реализованным в модуле SARscape Interferometric Stacking. Их обработка с получением на выходе основного результата (динамической модели смещений за весь период наблюдений) описана ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ВСЕХ СНИМКОВ 22-ПРОХОДНОЙ СЕРИИ

Сначала из снимков 22-проходной цепочки за 2007–2011 гг. с помощью функции SARscape > Interferogram Stacking > SBAs > Connection Graph (расчет и визуализация взаимосвязей между снимками) были выбраны пары снимков для дальнейшей обработки. Выбор пар был произведен программой автоматически на основании заданных параметров, определяющих, какие именно пары снимков (из всех возможных комбинаций) соответствуют критериям интерферометрии малых базовых линий.

В меню Connection Graph авторами были установлены следующие ограничения по выбору интерферометрических пар для дальнейшей автоматизированной обработки:

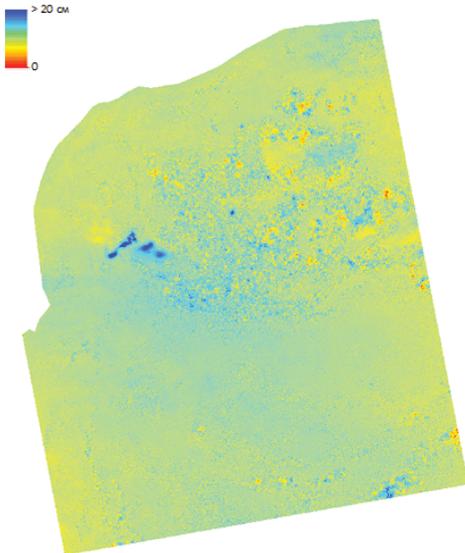


Рис. 13. Результирующая карта смещений земной поверхности в цветовом кодировании, полученная по результатам обработки пары снимков ALOS/PALSAR от 19.07.2007 г. и 27.07.2010 г. От желтого цвета к красному — возрастающие оседания, от голубого цвета к синему — возрастающие поднятия. Шкала смещений — в левом верхнем углу

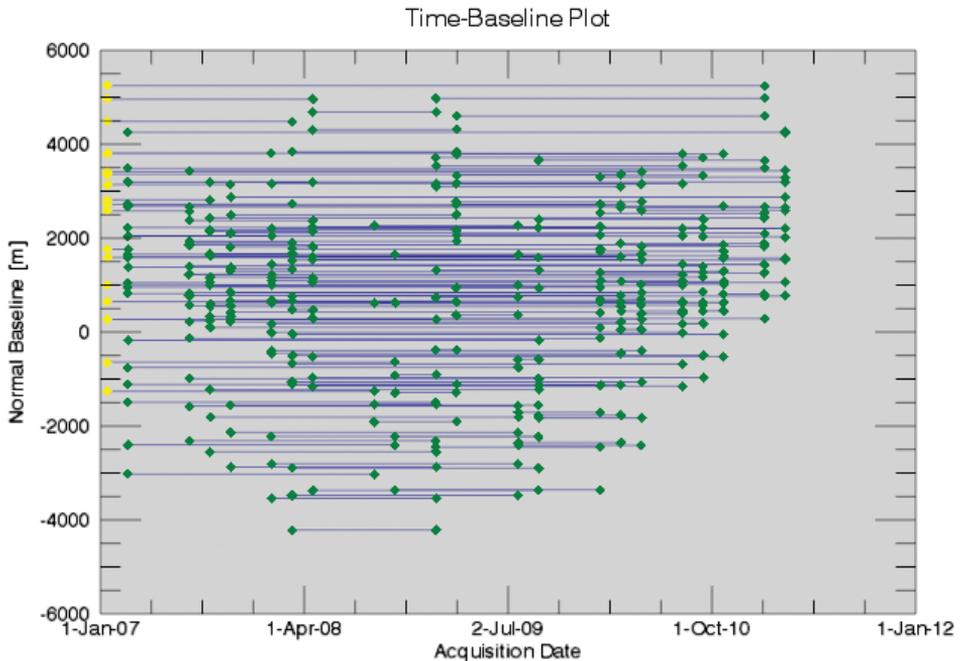


Рис. 14. Отобранные функцией Connection Graph для обработки пары снимков (по оси X — время в днях, по оси Y — перпендикулярная базовая линия в метрах)

- перпендикулярная компонента пространственной базы — от 0 до 40% от критической базы;
- максимально допустимый временной промежуток — 2000 дней. Фактически отсутствуют ограничения по времени между снимками пары, поскольку максимальный временной промежуток между первым и последним снимками нашей 22-проходной серии — 1517 дней.

22 интерферометрических снимка дают на выходе 231 возможную парную комбинацию между снимками ($22 \cdot 21 / 2 = 231$). В итоге для дальнейшей обработки программой в соответствии с указанными выше ограничениями были отобраны 189 пар снимков (независимых друг от друга и перекрестных во времени замеров смещений). Эти пары снимков схематически показаны в координатах «Время – Базовая линия» на рис. 14.

Далее для каждой из выбранных пар был выполнен полный цикл интерферометрической обработки, аналогичный циклу обработки одной конкретной пары, приведенному выше. На выходе для каждой пары получены изображения когерентности, фильтрованных дифференциальных интерферограмм и развернутых фаз. Затем была выполнена процедура коррекции орбитальных параметров каждой съемки с помощью одного набора контрольных точек с известными координатами и высотами, взятыми с глобальной общедоступной ЦМР SRTM.

Наконец, была выполнена так называемая инверсия SBAs, восстанавливающая последовательную во времени динамику смещений из перекрестных во времени пар снимков. Затем результаты были геокодированы и переведены

в обменный растровый формат ENVI-SARscape.

На рис. 15–18 показаны карты вертикальных смещений земной поверхности в миллиметрах в цветовом кодировании

по состоянию на начало, середину и конец всего цикла наблюдений. Голубым цветом показаны стабильные участки, от желтого цвета к красному — возрастающие оседания, синий цвет — поднятия земной поверхности.

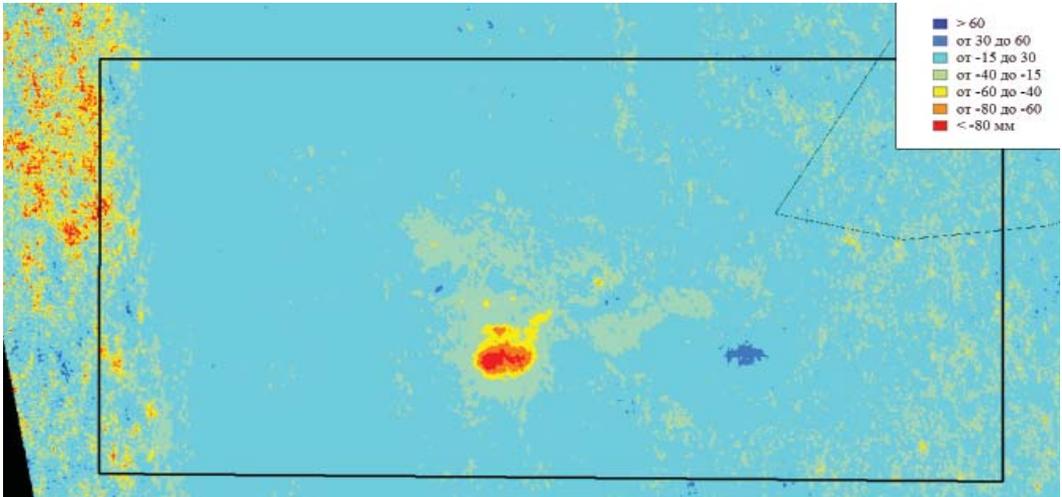


Рис. 15. Изображение вертикальных смещений земной поверхности на нефтяном месторождении за период с 16.01.2007 г. по 19.07.2007 г. в цветовом кодировании

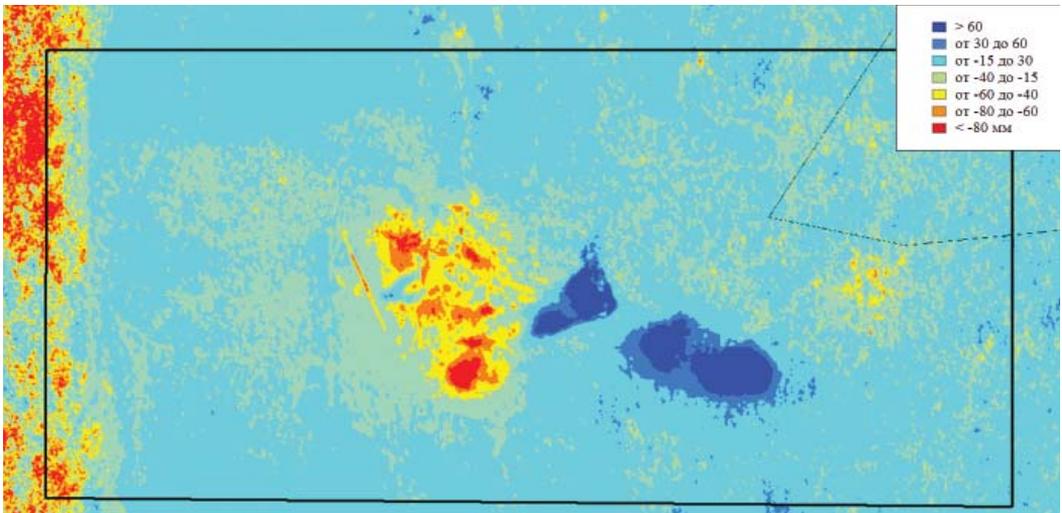


Рис. 16. Изображение вертикальных смещений земной поверхности на нефтяном месторождении за период с 16.01.2007 г. по 19.07.2009 г. в цветовом кодировании

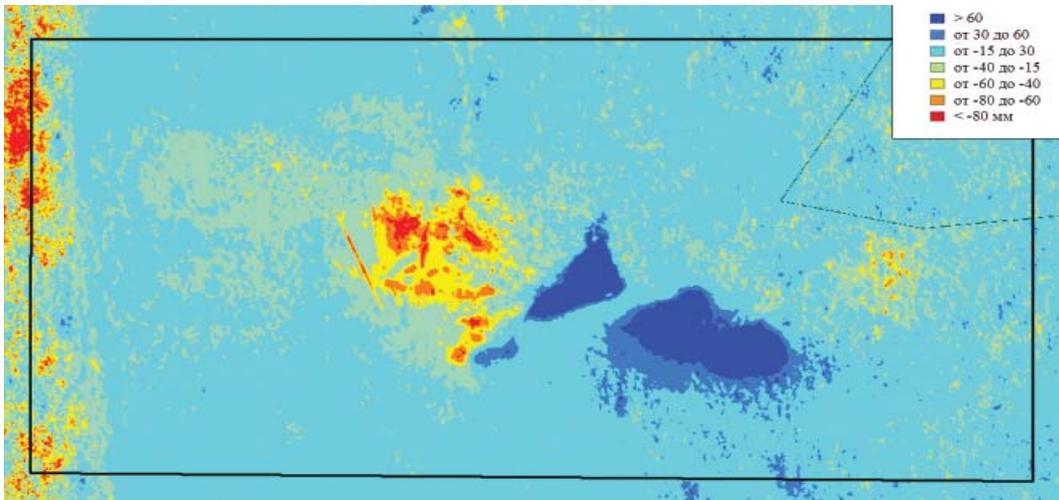


Рис. 17. Изображение вертикальных смещений земной поверхности на нефтяном месторождении за период с 16.01.2007 г. по 19.07.2010 г. в цветовом кодировании

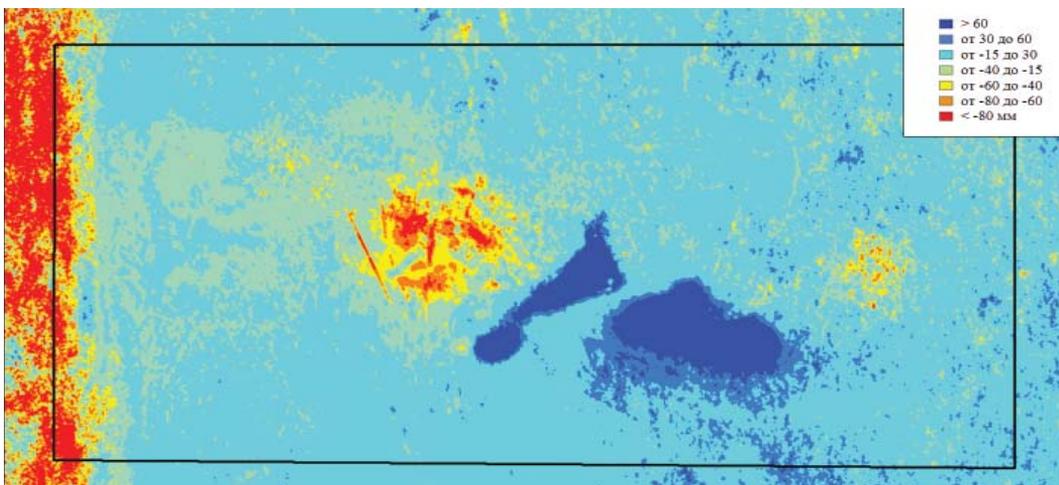


Рис. 18. Изображение вертикальных смещений земной поверхности на нефтяном месторождении за период с 16.01.2007 г. по 19.07.2011 г. в цветовом кодировании

На карте смещений за период с января по июль 2007 г. (рис. 15) заметен очаг оседаний земной поверхности на юге центральной части месторождения в зоне интенсивной добычи нефти и очаг поднятий земной поверхности в восточной

части месторождения над зоной нагнетания водяного пара в продуктивный пласт для интенсификации добычи нефти.

Обращает на себя внимание также локальный участок на юге центральной части месторождения. До 2008 г. он

характеризовался оседаниями земной поверхности, в 2009 г. поверхность на этом участке вернулась к уровню 2007 г. (начало радарных наблюдений), и затем с 2010 г. земная поверхность стала подниматься. Это связано с тем, что добыча нефти на данном участке была прекращена и добывающие скважины переведены в нагнетательные.

Интересен участок интенсивных поднятий, имеющий очертания прямоугольного треугольника, в центре месторождения между двумя очагами закачки водяного пара. На этом участке не производится ни добыча нефти, ни закачка водяного пара, тем не менее он характеризуется поднятиями земной поверхности до 25 см за 4 года, осложненными двумя локальными быстрыми просадками в 5–10 см в 2008 и в 2011 гг. (рис. 19). Сопоставление с геолого-геофизическими материалами показало, что это грязевой вулкан (грифон), сам по себе характеризующийся циклической динамикой смещений земной поверхности. Однако закачка водяного пара к юго-западу и к юго-востоку от этого участка дополнительно активизировала грифон и заставила его «раздуваться».

В центральной и восточной частях месторождения, там, где расположено большинство добывающих скважин и ведется добыча нефти, выявлены два очага оседаний. Очаг оседаний в восточной части наблюдался и ранее наземными методами. Крупный по площади очаг оседаний в центральной части расположен между профилями нивелирования и был впервые выявлен и околонтурен по данным космических радарных съемок. Здесь оседания происходят линейно, без ускорения, и достигают 12 см за 4 года.

ВЫВОДЫ

Проанализировав динамику смещений земной поверхности на месторождении за 2007–2011 гг. (рис. 15–18) и сопоставив основные выявленные очаги смещений земной

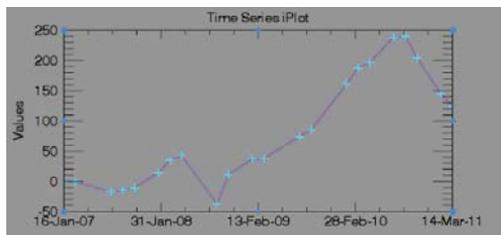


Рис. 19. Вертикальные смещения земной поверхности в миллиметрах, вызванные эффектом «дыхания» грифона (грязевого вулкана), расположенного в центре месторождения и дополнительно активизированного закачкой водяного пара в пласт, что осложнило природную циклическую динамику вулкана («раздувание») в течение нескольких лет с последующим интенсивным оседанием) монотонным подъемом земной поверхности

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 (рис. 15–18).

Вышеприведенные факты наглядно демонстрируют необходимость применения дистанционных (космических радарных) площадных методов мониторинга смещений земной поверхности в дополнение к традиционным наземным методам для получения полной картины происходящих смещений. По результатам обработки спутниковых радарных данных на выходе получают площадные карты смещений земной поверхности на всю территорию объекта, а наземные методы при таком подходе обеспечивают локальное уточнение и проверку радарных значений смещений. Кроме того, наземные наблюдения могут быть оптимизированы и нацелены туда, где реально происходят смещения земной поверхности, выявленные по радарным данным.