

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 программно-обеспечения.

Космический мониторинг смещений земной поверхности на месторождениях Кандым и Гумбулак Республики Узбекистан по данным космических радарных съемок

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В статье приводятся результаты космического мониторинга смещений земной поверхности на нефтегазовых месторождениях Кандым и Гумбулак Республики Узбекистан, выполненного по данным космических радарных съемок 2003–2010 гг. Это совместная работа компании «Совзонд» и Научно-производственного центра геологии гидроминеральных ресурсов Республики Узбекистан на объектах ООО «Лукойл Узбекистан Оперейтинг Компани».

Месторождения Кандым и Гумбулак в настоящее время не разрабатываются, поэтому основной задачей было снять природный фон современных геодинамических смещений.

Космическая радарная съемка месторождений выполнялась в соответствии с требуемыми параметрами. Карты покрытий территорий месторождений Кандым и Гумбулак данными архивных съемок со спутника Envisat/ASAR (Европейское космическое агентство) показаны на рис. 1 и 2.

Каждое из месторождений было отснято 15 раз (Кандым – за период 2003–2010 гг.; Гумбулак – за период 2004–2009 гг.). Дешифрирование и интерпретация данных 15-проходных космических радиолока-



Рис. 1.
Схема покрытия месторождения Кандым архивными данными Envisat/ASAR



Рис. 2.
Схема покрытия месторождения Гумбулак архивными данными Envisat/ASAR

ционных съемок выполнялись с получением на выходе карт смещений земной поверхности за периоды между парами снимков радарного спутника, характеризующимися наименьшими перпендикулярными базовыми линиями. Результаты (карты смещений) были преобразованы в единую последовательную во времени цепочку карт смещений, аппроксимированную дополнительно линейной моделью (то есть, выявлялись монотонные во времени смещения без ускорения и без перемены направления смещений). Эта модель, по мнению автора, наиболее точно подходит для описания современной природной геодинамической ситуации данного региона. В итоге на выходе получалась карта смещений за весь период наблюдений для каждого из вышеуказанных месторождений, а также карта среднегодовой скорости смещений.

Вышеописанная обработка радарных снимков выполнялась по методу Sbas, реализованному в модуле «Interferogramm Stacking» программного комплекса SARscape 4.3 (ITT VIS, США). Геокодирование, цветовая коррекция и составление ГИС-проектов выполнялись с использованием полностью интегрированных между собой программных комплексов ENVI (ITT VIS, США) и ArcGIS (Esri, США).

Интерферометрическая обработка данных 15-проходных космических радиолокационных съемок выполнялась без наземных контрольных точек и без использования данных наземных наблюдений.

В качестве опорного рельефа при интерферометрической обработке радарных данных использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM.

Все рассчитанные карты смещений полностью покрывают территории месторождений Кандым и Гумбулак и показывают смещения земной поверхности за пе-

риод между первой по порядку съемкой и всеми последующими (между первой и второй, между первой и третьей, между первой и четвертой, между первой и пятой съемками и т. д.).

Результирующие картографические продукты (карты смещений) были поставлены заказчику в обменных растровых (GeoTIFF) и векторных (Shapefile) форматах.

Интерферометрической обработке подвергались не все снимки целиком, а области, вырезанные таким образом, чтобы полностью покрывать территории месторождений Кандым и Гумбулак соответственно и частично прилегающие к ним территории (буфер в несколько километров вокруг контуров месторождений).

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Представляется необходимым привести краткие теоретические основы радиолокационной интерферометрии как метода мониторинга смещений земной поверхности.

Радиолокационная съемка выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C-, L- и P-диапазоны (табл. 1). Съемка 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.

Таблица 1

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, TanDEM-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, JERS, ALOS/PALSAR
P	0,225–0,391	40,0–76,9 (30–100)	AIRSAR

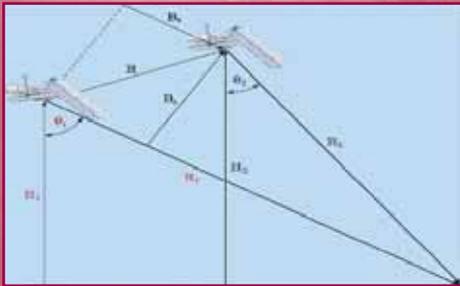


Рис. 3.

Схема космосъемки интерферометрической пары радиолокационных изображений
 H_1 и H_2 – высота орбиты радиолокатора; R_1 и R_2 – дальность (путь зондирующей волны); θ_1 и θ_2 – углы между дальностью и высотой; V_{\perp} и V_{\parallel} – перпендикулярная и параллельная составляющие базовой линии; V – результирующая базовая линия

Входными данными для обработки в специализированных программных комплексах является интерферометрическая пара (либо цепочка) радиолокационных снимков. Ограничением для возможности интерферометрической обработки пары (или цепочки) радарных снимков являются пространственная и временная базы.

Пространственная база (или базовая линия) представляет собой расстояние между орбитальными положениями радиолокатора при съемке изображений, составляющих интерферометрическую пару (рис. 3). Качество результатов интерферометрической обработки напрямую зависит от величины перпендикулярной составляющей базовой линии, в частности, качество получаемой интерферометрическим методом карты смещений земной поверхности возрастает с уменьшением длины перпендикулярной базовой линии. В случае базовой линии, равной нулю, интерферограмма, рассчитанная по такой паре снимков, вообще содержит только фазу смещений. С другой стороны, при превышении некоторого критического значения базовой линии интерферометрическая обработка становится в принципе невозможной вследствие пространственной декорреляции.

В случае обработки данных Envisat/ASAR, подобранных для территорий месторождений Кандым и Гумбулак, критическое значение перпендикулярной про-

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

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

где:

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

λ – длина зондирующей волны радиолокатора;

R_r – пространственное разрешение в направлении наклонной дальности;

Остальные аргументы соответствуют обозначениям к рис. 3.

Исходя из этой формулы, критическая перпендикулярная базовая линия для используемых данных Envisat/ASAR Image Mode составляет порядка 1000–1500 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 м были в основном выбраны для построения интерферограмм.

Временной базой называют промежуток времени, прошедший между съемкой изображений, составляющих интерферометрическую пару. Понятие временной базы напрямую связано с такой важной проблемой, как временная декорреляция, возникающей за счет изменений рельефа, растительности, влажности, шероховатости и других свойств отражающей радарный луч поверхности, произошедших за период между съемками. Проблема временной декорреляции может быть решена увеличением длины зондирующей волны (что повышает «просвечивающую» способность радиоволн) либо сокращением временной базы (т. е. промежутка между съемками). Перспективным направлением в плане понижения до некоторой степени отрицательного влияния временной декорреляции представляется выполнение радиолокационной съемки в полной поляризационной матрице (в рамках настоящего договора такие данные не анализировались, и такие работы на сегодняшний день являются экспериментальными).

В рамках данного договора был применен вышеуказанный подход интерферометрической обработки пар снимков, отобранных из всех возможных пар по прин-

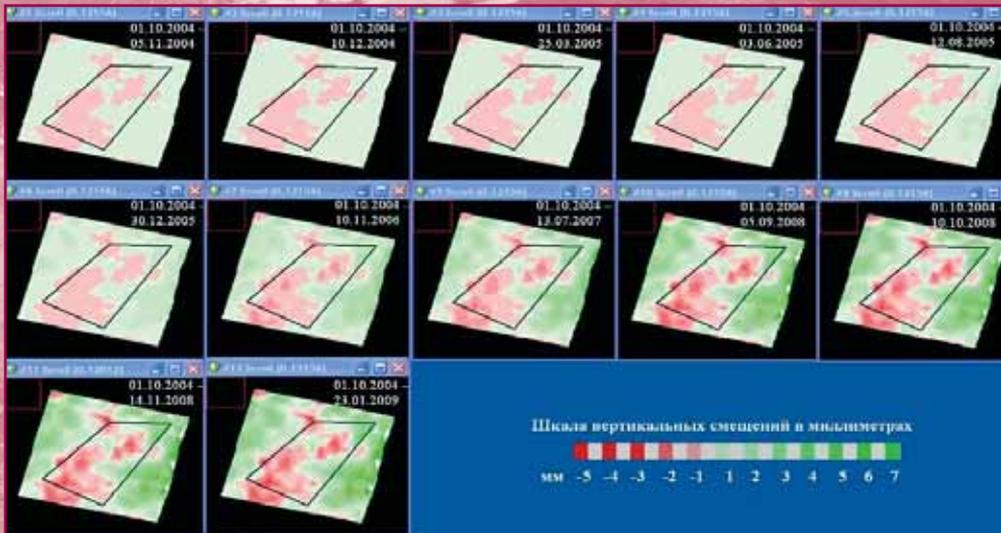


Рис. 4.

Карты смещений земной поверхности на месторождении Гумбулак за периоды между первой съемкой и всеми последующими (за исключением съемок от 29.04.2005 г. и 08.07.2005 г.). Контур черного цвета – месторождение

ципу наименьших базовых линий. При этом результат обработки в итоге был представлен в виде карт смещений за периоды между первой съемкой и поочередно каждой из последующих съемок. То есть, результат показывает развитие смещений во времени, а также итоговую карту смещений за весь период наблюдений.

Помимо пространственной и временной баз, важным параметром, определяющим возможность или невозможность интерферометрической обработки, является разность положений Доплеровского центра вращения Земли для снимков пары. Все обработанные пары характеризуются низкими либо нормальными значениями этого параметра, что положительно сказалось на обработке.

Если значения пространственной и временной баз, а также разницы положений Доплеровского центра позволяют выполнить интерферометрическую обработку, то становится возможным рассчитать интерферограмму.

Каждый радиолокационный снимок интерферометрической пары содержит в себе амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой более пригоден для визу-

ального анализа. Результирующая фаза Φ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев снимков интерферометрической пары, в общем случае состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{топо}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{атм}} + \Phi_{\text{ш}}; \text{ где:}$$

$\Phi_{\text{топо}}$ – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами;

Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения отражающей поверхности в период между съемками;

$\Phi_{\text{атм}}$ – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;

$\Phi_{\text{ш}}$ – вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Непосредственно интерферометрическая обработка пары снимков в общем случае состоит из нескольких базовых шагов:

1. совмещение основного и вспомогательного радиолокационных изображений интерферометрической пары (в автоматическом режиме либо с ручным вводом контрольных точек; с участием входной опорной ЦМР или без нее);

2. генерация интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлементного перемножения основного изображения и вспомогательного изображения, геометрически совмещенного с основным;
3. разделение компонентов фазы $\Phi_{\text{топо}}$ и Φ_{def} за счет синтеза фазы рельефа с помощью имеющейся цифровой модели рельефа (ЦМР) или цифровой модели местности (ЦММ), либо модели эллипсоида, либо путем задания средней по площади снимка высотной отметки (для равнинных областей) с получением на выходе дифференциальной интерферограммы, на которой один полный спектр цветов (интерференционный цикл) соответствует смещениям земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора;
4. фильтрация интерферограммы, позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной карты смещений земной поверхности;
5. получение файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей;
6. развертка фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным) и устранение разрывов фазы;
7. коррекция значения базовой линии по наземным контрольным точкам;
8. преобразование абсолютных значений фазы в смещения земной поверхности в миллиметрах.

Полная цепочка интерферометрической обработки, а также многие другие дополнительные функции реализованы в использованном авторами программном комплексе SARscape, являющемся дополнительным модулем программы ENVI.

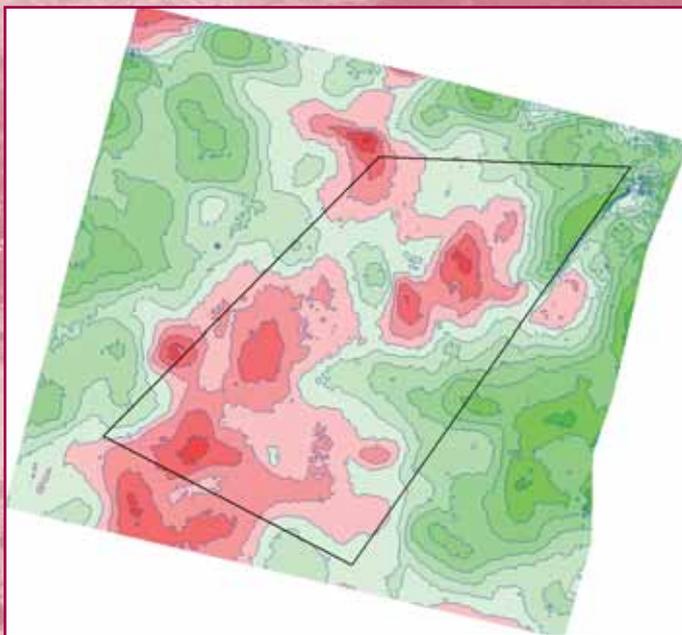


Рис. 5.

Итоговая карта смещений за весь период наблюдений (с 01.10.2004 г. по 23.01.2009 г.) с нанесением контура месторождения Гумбулак (черный контур) и изолиний смещений (синие линии)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СО СПУТНИКА ENVISAT/ASAR С ПОЛУЧЕНИЕМ НА ВЫХОДЕ КАРТ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Результаты интерферометрической обработки радарных съемок месторождения Гумбулак

15-проходная цепочка снимков Envisat/ASAR, приобретенная для последующего интерферометрического анализа, теоретически позволяет построить 105 интерферометрических пар ($14 + 13 + 12 \dots + 1 = 105$). Однако это нецелесообразно ввиду принципиально различных интерферометрических характеристик многих возможных пар. Более правильным методологически является выбор пар для обработки по определенным критериям. Если обработка выполняется для задач

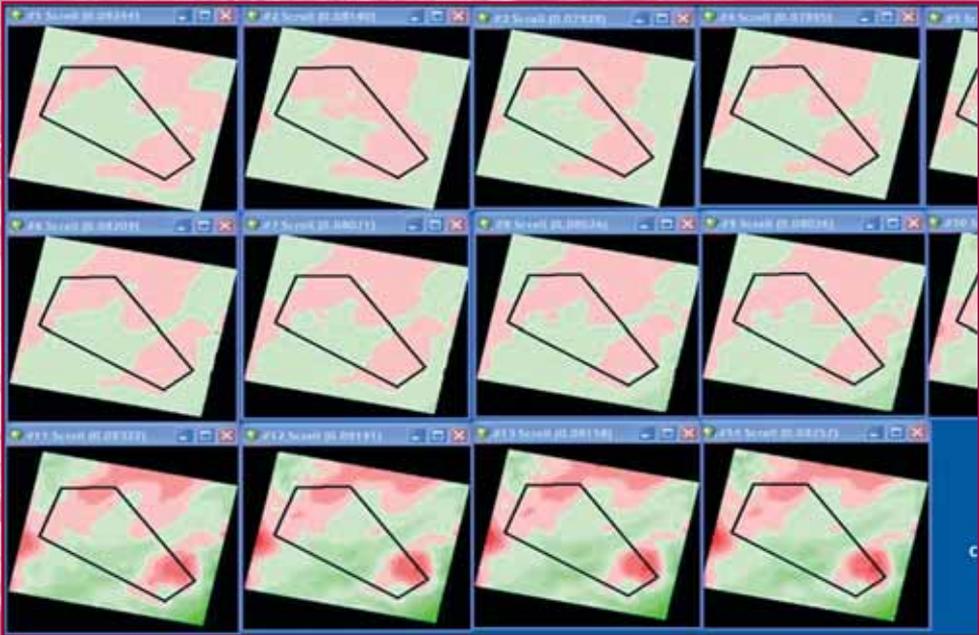


Рис. 6.
Карты смещений земной поверхности на месторождении Кандым за периоды между первой съемкой и всеми последующими. Контур черного цвета – месторождение Кандым

оценки смещений земной поверхности, то такими критериями могут быть:

- 1) величина пространственной базовой линии;
- 2) временной промежуток между съемками снимков пары;
- 3) когерентность между съемками снимков пары.

Выбор пороговых значений по каждому из вышеприведенных критериев должен обеспечивать получение в итоге достаточного количества интерферометрических пар, удовлетворяющих этим критериям, чтобы не было потеряно преимущество многопроходной съемки. В случае месторождения Гумбулак из имеющихся 15 проходов спутника Envisat/ASAR была выбрана двадцать одна пара для последующей интерферометрической обработки, а именно:

- Пары, построенные от снимка 01_10_2004:
- 1) с 10_12_2004 (база 236 м, временная база 70 дней);
 - 2) с 03_06_2005 (база 61 м, временная база 245 дней);
 - 3) с 10_11_2006 (база 318 м, временная база 770 дней).

Пары, построенные от снимка 05_11_2004:

- 4) с 10_12_2004 (база 130 м, временная база 35 дней);
- 5) с 12_08_2005 (база 290 м, временная база 280 дней);
- 6) с 30_12_2005 (база 67 м, временная база 420 дней);
- 7) с 13_07_2007 (база 109 м, временная база 980 дней);
- 8) с 05_09_2008 (база 229 м, временная база 1400 дней);
- 9) с 23_01_2009 (база 87 м, временная база 1540 дней).

Пары, построенные от снимка 10_12_2004:

- 10) с 03_06_2005 (база 209 м, временная база 175 дней);
- 11) с 12_08_2005 (база 158 м, временная база 245 дней);
- 12) с 10_10_2008 (база 48 м, временная база 1400 дней);
- 13) с 23_01_2009 (база 205 м, временная база 1505 дней).

Пары, построенные от снимка 13_07_2007:

- 14) с 10_10_2008 (база 28 м, временная база 455 дней);
- 15) с 23_01_2009 (база 184 м, временная база 560 дней).

Пары, построенные от снимка 25_03_2005:

- 16) с 10_11_2006 (база 125 м, временная база 595 дней).

Пары, построенные от снимка 03_06_2005:

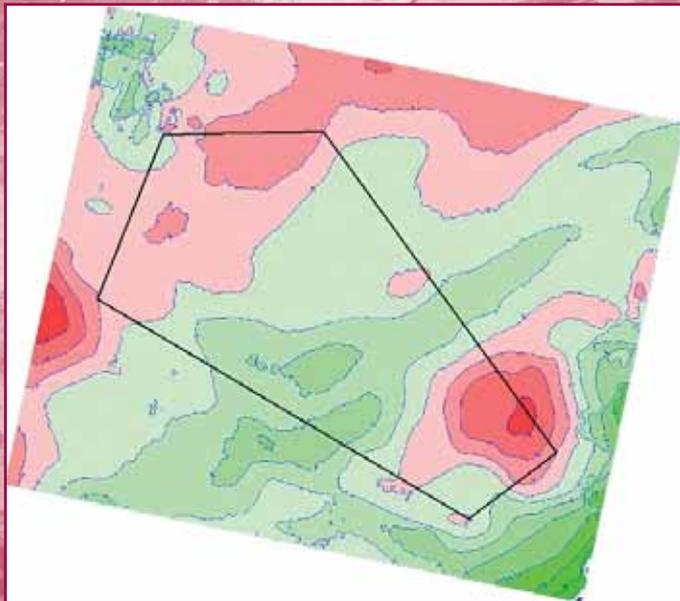


Рис. 7.
Итоговая карта смещений за весь период наблюдений (с 07.10.2003 г. по 31.08.2010 г.) с нанесением контура месторождения Кандым (черный контур) и изолиний смещений (синие линии)

17) с 10_10_2008 (база 256 м, временная база 1225 дней).

Пары, построенные от снимка 12_08_2005:

18) с 13_07_2007 (база 181 м, временная база 700 дней).

Пары, построенные от снимка 05_09_2008:

19) с 23_01_2009 (база 145 м, временная база 140 дней).

Пары, построенные от снимка 10_10_2008:

20) с 14_11_2008 (база 169 м, временная база 35 дней).

Пары, построенные от снимка 14_11_2008:

21) с 23_01_2009 (база 21 м, временная база 70 дней).

По каждой из этих пар была построена интерферограмма. Из каждой интерферограммы последовательно были удалены фаза рельефа (за счет использования опорной ЦМР SRTM), электромагнитный шум (за счет адаптивной фильтрации) и атмосферные артефакты (за счет статистического анализа и отфильтровки резких вариаций фазы, выделяемых относительно более спокойных трендов). В результате по каждой из пар была получена развернутая фаза.

Затем был выполнен пересчет всех полученных промежуточных продуктов интерферометрической обработки. Пересчет выполнялся таким образом, чтобы из пар, перекрывающихся между собой во времени, восстановить фазовую историю смещений и упорядочить ее – от первого снимка цепочки до последнего – пятнадцатого снимка.

Снимки от 29.04.2005 г. и от 08.07.2005 г. были исключены из обработки по причине слишком значительной пространственной декорреляции по отношению ко всем остальным снимкам цепочки.

Итоговые карты смещений за периоды с первой съемки до всех последующих (исключая снимки от 29.04.2005 г. и от 08.07.2005 г.) приведены на рис. 4. На этих картах красным цветом показаны оседания, зеленым – поднятия. На рис. 5 приведена итоговая карта смещений за весь период наблюдений (с 01.10.2004 г. по 23.01.2009 г.) с нанесением контура месторождения Гумбулак и изолиний смещений. Также была рас-

считана карта среднегодовой скорости смещений, которую с определенными допущениями можно использовать для прогнозирования процесса смещений на несколько лет вперед (по крайней мере до момента начала разработки месторождений, когда к природной компоненте смещений, существующей сейчас, добавится техногенная компонента, вызванная добычей углеводородов).

Результаты интерферометрической обработки радарных съемок месторождения Кандым

15-проходная цепочка радарных снимков на месторождение Кандым оказалась более сложна для обработки, поскольку в ней присутствует перерыв в три с половиной года (с 2005 по 2009 гг.). Динамика сме-

шений также оказалась более сложной для интерпретации.

Для обработки по критерию малых базовых линий были выбраны следующие пары радиолокационных снимков:

Пары, построенные от снимка 11_10_2005:

1) с 13_07_2004 (база 56 м, временная база 455 дней).

Пары, построенные от снимка 07_10_2003:

2) с 08_06_2004 (база 188 м, временная база 245 дней);

3) с 13_07_2004 (база 265 м, временная база 280 дней).

Пары, построенные от снимка 11_11_2003:

4) с 16_12_2003 (база 34 м, временная база 35 дней);

5) с 04_05_2004 (база 79 м, временная база 175 дней).

Пары, построенные от снимка 20_01_2004:

6) с 13_07_2004 (база 358 м, временная база 175 дней);

7) с 08_02_2005 (база 47 м, временная база 385 дней).

Пары, построенные от снимка 04_05_2004:

8) с 08_02_2005 (база 402 м, временная база 280 дней).

Пары, построенные от снимка 08_06_2004:

9) с 15_03_2005 (база 96 м, временная база 280 дней).

Пары, построенные от снимка 18_05_2010:

10) с 17_02_2009 (база 143 м, временная база 455 дней).

Пары, построенные от снимка 31_08_2010:

11) с 17_02_2009 (база 50 м, временная база 560 дней);

12) с 27_07_2010 (база 327 м, временная база 35 дней).

Динамика зарегистрированных смещений приведена на рис. 6. Итоговая карта смещений приведена на рис. 7. В левом верхнем углу наблюдается сложная для интерпретации картина – скорее всего, краевой эффект, вызванный потерей когерентности.

Также была рассчитана карта среднегодовой скорости смещений, которую с определенными допущениями можно использовать для прогнозирования процесса смещений на несколько лет вперед (по крайней мере, до момента начала разработки месторождений, когда к природной компоненте смещений, существующей сейчас, добавится техногенная компонента, вызванная добычей углеводородов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

При выполнении работ по анализу архивных многопроходных цепочек Envisat/ASAR преимуществом была достаточная глубина архива (съемка с 2003 по 2009–2010 гг.). Однако у архивных данных есть и свои недостатки – недостаточная и не выдерживаемая во времени частота съемки. Например, в серии снимков на месторождение Кандым присутствовал перерыв в три с

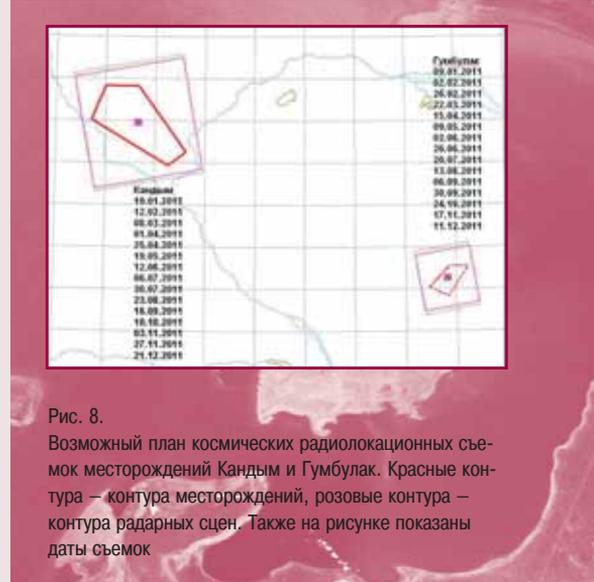


Рис. 8.

Возможный план космических радиолокационных съемок месторождений Кандым и Гумбулак. Красные контура – контура месторождений, розовые контура – контура радарных сцен. Также на рисунке показаны даты съемок

половиной года. С другой стороны, у многих пар снимков были довольно большие базовые линии, что могло уменьшить точность выявляемых смещений.

Поэтому для максимально высокоточного анализа смещений авторы рекомендуют в общем случае планировать целевую многопроходную радиолокационную съемку с выдерживаемым интервалом и с гораздо меньшими базовыми линиями (особенно с началом разработки месторождений). Наилучшим образом для этой задачи, по мнению авторов, подходит спутник RADAR-SAT-2 (MDA, Канада).

Например, на рис. 8 представлен виртуальный план съемки на 2011 г. месторождений Кандым и Гумбулак. Как видно из этого рисунка, для каждого из месторождений может быть подобран оптимальный по соотношению «пространственное разрешение / площадь сцены» режим съемки. Кроме того, съемка может быть выполнена с выдержанным и постоянным во времени интервалом в 24 дня.

Таким образом, предлагаемый в данной статье метод (многократно валидированный и верифицированный как в условиях Крайнего Севера и средней полосы, так и в условиях Средней Азии) является важным независимым источником информации о смещениях земной поверхности и может служить надежным дополнением к традиционным и спутниковым геодезическим методам.