

**В.А. Мансуров** (ТОО «Корпорация Казахмыс»)

Окончил Киргизский Государственный Университет (КГУ) в 1966 г., физико-математический факультет по специальности «интегро – дифференциальные уравнения». Главный геотехник – руководитель Геотехнического управления. Профессор, доктор физико-математических наук.

**М.Ж. Сатов** (ТОО «Корпорация Казахмыс»)

Окончил Казахский политехнический институт (Каз ПТИ) в 1973 г. по специальности «геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». Руководитель группы инструментальных наблюдений Геотехнического управления. Доктор технических наук.

**Р.Т. Жантуев** (ТОО «Корпорация Казахмыс»)

Окончил Казахский национальный технический университет (Каз НТУ) в 2001 г. по специальности «инженер маркшейдер». Ведущий инженер-геотехник по мониторингу смещений земной поверхности отдела инструментальных наблюдений Геотехнического управления.

**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.

## Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на Жезказганском месторождении меди (Республика Казахстан)

Жезказганское месторождение меди расположено в центральной части Казахстана, в бассейне реки Кара-Кенгир, юго-восточнее гор Улытау, к западу от города Жезказган и Кенгирского водохранилища, вблизи населенных пунктов Сатпаев, Кенгир и Рудник (рис. 1). Оно включает 5 рудников и охватывает площадь 10 x 7 км. Активная подземная разработка месторождения ведется с середины 20 века. В настоящее время месторождение разрабатывается корпорацией «Казахмыс».

За время разработки добыта значительная часть запасов месторождения. В настоящее время суммарный объем выработанного пространства горных пород составляет порядка 200 млн. м<sup>3</sup>. Месторождение отрабатывается камерно-столбовой системой разработки. Выработанное подземное пространство поддерживается десятками тысяч междукамерных целиков горных пород [1].

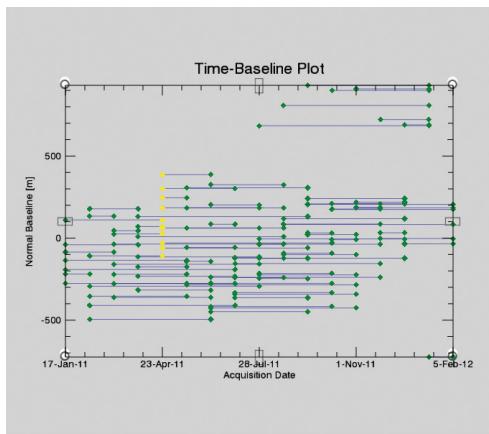
Естественно, такой объем подземных пустот вызы-



Рис. 1. Район Жезказганского месторождения меди (область желтого цвета по центру рисунка)



**Рис. 2.** Схема покрытия территории Жезказганского месторождения данными RADARSAT-2 в режиме съемки Fine (красный контур). Площадь кадра — 50x50 км, пространственное разрешение — 7 м, длина волны радара — 5,5 см



**Рис. 3.** 92 пары снимков, выбранных для интерферометрической обработки из числа возможных 136 пар 17-проходной цепочки

вает различные по амплитуде смещения и деформации земной поверхности.

Для наблюдений за смещениями и деформациями земной поверхности и сооружений на месторождении организован сейсмический мониторинг. Также выполняются регулярные традиционные геодезические

наблюдения по профильным линиям. Начиная с 2011 года для обеспечения регулярного получения информации о смещениях и деформациях земной поверхности, была организована космическая радарная съемка месторождения и прилегающих территорий со спутника Radarsat-2 (MDA, Канада). Съемка продолжается в настоящее время с периодом в 24 дня.

К настоящему моменту выполнено 17 повторных съемок (15 съемок в 2011 году и две съемки в 2012 году). Компания «Совзонд», спланировавшая эту многопроходную съемку для корпорации «Казахмыс», поставляет данные самих съемок Radarsat-2, а также выполняет обработку этих съемок по технологии радарной интерферометрии малых базовых линий «SBas» [2,3], реализованной в программном комплексе ENVI-SARscape (Exelis VIS, США). На выходе Заказчику ежемесячно поставляются карты смещений и деформаций земной поверхности и сооружений, что позволяет оперативно оценивать происходящие динамические процессы и при необходимости принимать необходимые меры. Для оценки текущей ситуации используется методика, разработанная в Корпорации Казахмыс и утверждённая в Комитете по ЧС Республики Казахстан.

На 2012 год запланирована поставка программного обеспечения ENVI-SARscape в корпорацию «Казахмыс» и обучение специалистов корпорации работе в нем. Таким образом, осуществляется полное внедрение технологии космического радарного мониторинга смещений земной поверхности и сооружений на базе корпорации «Казахмыс». Применяемая схема обработки радарных снимков и первые результаты выполнения проекта на Жезказганском месторождении меди приводятся ниже.

Применяемая технология обработки радарных космических снимков – интерферометрия малых базовых линий «SBas» [2,3] – реализована в программном комплексе ENVI-SARscape. Рассмотрим подробно цепочку обработки на примере 17-проходной серии радарных снимков со спутника Radarsat-2 на территорию Жезказганского месторождения. Контур выполняемых съемок приведен на рисунке 2. Контур съемки по согласованию с заказчиком был выбран таким образом, чтобы покрывать как само Жезказганское месторождение, так и два хвостохранилища, а также населенные пункты Сатпаев, Жезказган, Рудник и др.

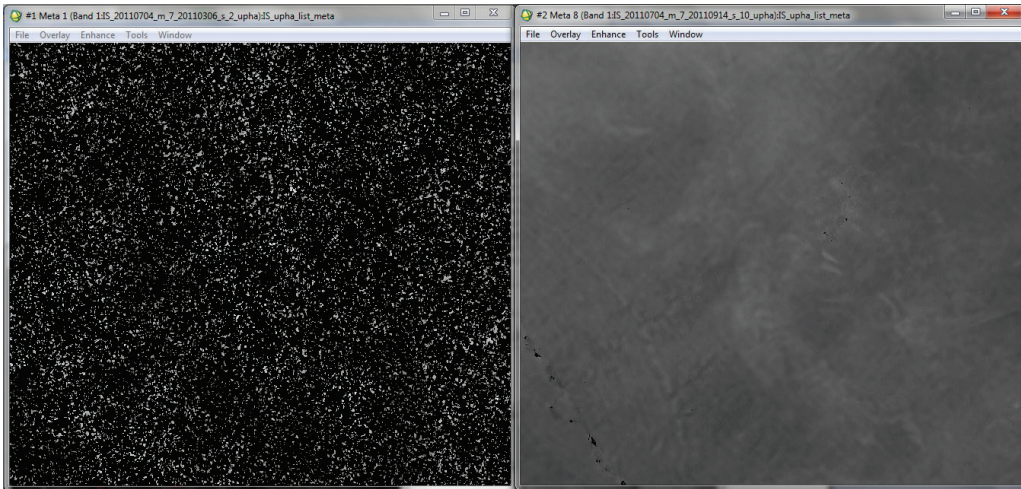


Рис. 4. Иллюстрация визуального отличия «рваной» (низкокогерентной) развернутой фазы (слева) от качественной (высококогерентной) фазы (справа)

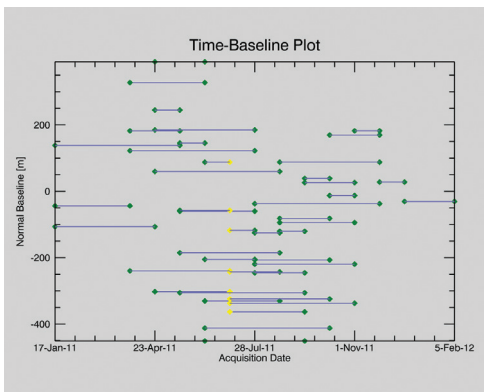


Рис. 5. 46 пар снимков, оставшихся для второй итерации обработки после визуального анализа рассчитанных на первом шаге 92 развернутых фаз и удаления из дальнейшей обработки выявленных низкокогерентных пар

Съемка выполняется с января 2011 года по настоящее время с периодом в 24 дня. Обработка снимков по методике SBAS предусматривает попарную интерферометрическую обработку большого количества перекрещивающихся во времени интерферометрических пар. Первым шагом обработки в SARscape, таким образом, является выбор пар для интерферометрической обработки из общего числа возможных

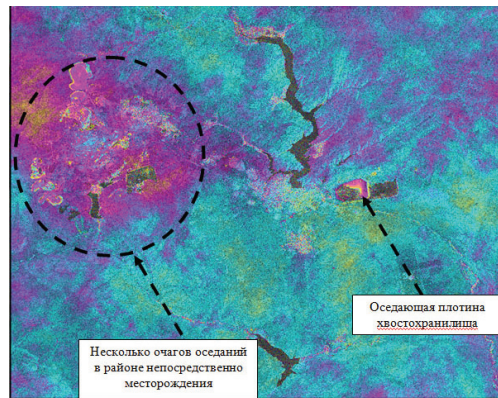


Рис. 6. Фильтрованная дифференциальная интерферограмма (разность фаз), построенная по паре снимков с разницей 72 дня. Один полный спектр цветов на такой интерферограмме соответствует смещениям, равным половине длины волны радара (длина волны RADARSAT-2 – 5,5 см)

пар по некоторым критериям (максимально допустимой базовой линии, максимально допустимого временного промежутка между съемками и др.). 17 повторных съемок – это  $17 \times 16 / 2 = 136$  возможных пар снимков. Инструмент «Connection Graph» программы SARscape позволяет в интерактивном автоматизированном режиме выбрать пары для дальнейшей обра-



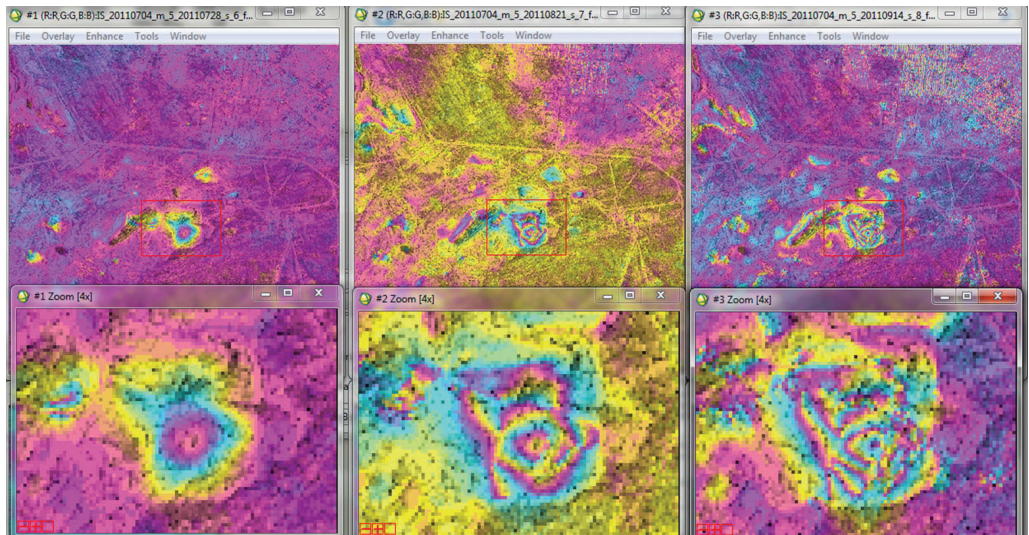


Рис. 7. Иллюстрация развития оседаний земной поверхности на интерферограммах. Сверху показана область внутри контура месторождения, на которой заметны несколько очагов смещений. Снизу — развитие во времени наиболее крупного из этих очагов (слева направо: смещения за 24, 48 и 72 дня соответственно)

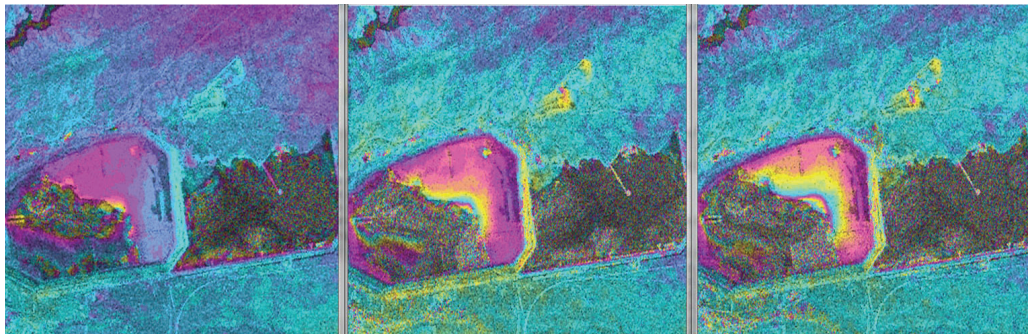


Рис. 8. Оседания плотины хвостохранилища за период (слева направо) в 24, 72 и 120 дней. Один спектр цветов — смещения в половину длины волны радара

ботки с учетом вышеуказанных критериев. Съемки, выбранные для обработки в нашем случае 17-проходной цепочки на Жезказганское месторождение, показаны на диаграмме на рисунке 3 в координатах «дата съемки – базовая линия».

Несложно заметить, что смещения за один и тот же анализируемый период вычисляются не по одной паре снимков, которая теоретически может содержать атмосферные артефакты, помехи за неточность

определения орбиты спутника, помехи, вызванные изменением влажности и шероховатости отражающей поверхности, сезонные эффекты, влияние растительности и т.д. Напротив, смещения за практически каждый рассматриваемый период анализируются по нескольким (и даже по многим) парам снимков. Это особенность технологии SBAS позволяет статистически удалить все вышеперечисленные помехи и наилучшим образом выделить именно полезный сигнал

(в нашем случае – смещения и деформации земной поверхности и сооружений).

Затем каждая пара в автоматизированном режиме прошла всю цепочку интерферометрической обработки (генерация интерферограммы, дифференциальной интерферограммы, фильтрованной дифференциальной интерферограммы и карты когерентности, затем развертка фазы) [2]. Эти операции были выполнены в автоматизированном режиме в рамках процесса SARscape «Interferogramm To Phase Unwrapping» после ввода 17 исходных снимков и выбора 92 пар для дальнейшей обработки.

Далее рассчитанные изображения 92 развернутых фаз были визуально проанализированы специалистами-обработчиками. При визуальном анализе, занимающем не более 15 минут, из дальнейшей обработки удаляются пары с «рваной» развернутой фазой и с низкой средней по кадру когерентностью фаз. Рисунок 4 иллюстрирует относительную простоту данной операции, выполняемой вручную средствами процедуры SARscape «Edit Connection Graph». Пары, оставшиеся для второй итерации обработки после удаления «рваных» фаз, показаны на рис. 5 (всего 46 пар).

Очень низкую когерентность по отношению ко всем остальным снимкам серии показали 2-ой, 3-ий и 16-й снимки цепочки. Удаление пар, построенных от этих снимков, из дальнейшей обработки вызвало уменьшение числа анализируемых пар (т.е. уменьшение числа независимых замеров смещений) в периоды январь—март 2011 г. и декабрь 2011—январь 2012 г. В эти периоды замер смещений выполнялся по 1 – 3 парам. В период с апреля по ноябрь 2011 г. замер смещений выполнялся по данным 5 – 15 независимых друг от друга наблюдений. Таким образом, наибольшая точность замера смещений достигнута именно на этапе наблюдений с апреля по ноябрь 2011 г. Однако, в принципе, значение смещений получено по состоянию на каждую дату съемки. Максимальная заявляемая точность замера смещений, а именно 2—4 мм, будет достигнута при наборе 30 проходов, то есть к концу 2012 г.

На оставшихся 46 развернутых фазах был выполнен предварительный анализ на предмет наличия, пространственной локализации и оценки величины смещений земной поверхности. Это было необходи-

мо, поскольку перед следующим этапом обработки необходим выбор стабильных контрольных точек, не подверженных смещениям. Даже беглый анализ 46 фильтрованных дифференциальных интерферограмм позволил выявить несколько основных очагов зарегистрированных смещений (рис. 6).

В первую очередь, это несколько очагов оседаний непосредственно внутри контура Жезказганского месторождения. Также совершенно явно определяются оседания плотины хвостохранилища, расположенного к востоку от г. Жезказган. Динамика смещений во времени на интерферограммах для одного из очагов внутри контура месторождения и для плотины хвостохранилища проиллюстрирована на рисунках 7 и 8.

На следующем этапе было выполнено создание файла контрольных точек, необходимых для следующего шага обработки, а именно, для коррекции орбитальных параметров съемки. Точки ставились равномерно по изображению, но не попадая в участки резкого перепада высот, а также в участки происходящих смещений земной поверхности. Высота точек бралась с ЦММ SRTM. После набора точек коррекции орбиты и автоматического выполнения этой коррекции для всех оставшихся 46 пар средствами процедуры SARscape «Orbital Re-finement and Re-flattening», была выполнена атмосферная коррекция интерферограмм, затем трехмерная развертка фазы в координатах «дальность – азимут – время» и, наконец, инверсия SBAs, позволяющая перейти от смещений за различные, перекрещивающиеся во времени периоды, к последовательным во времени смещениям — от первой съемки – к последней.

Получена результирующая карта смещений (рис. 9). В каждом пикселе этой растровой карты – смещения по состоянию на каждую дату съемки в миллиметрах. Динамика смещений для некоторых участков проиллюстрирована на рисунках 10 и 11.

Помимо смещений земной поверхности, анализировались смещения зданий и сооружений в населенных пунктах. Здания и сооружения являются стабильными отражателями радиолокационного сигнала. Пространственное разрешение выполняемых съемок позволило стабильно выявлять по несколько постоянных рассеивателей на каждом конкретном здании (углы между двумя стенами, между стеной и крышей и т.д.). Это позволило анализировать различия ско-



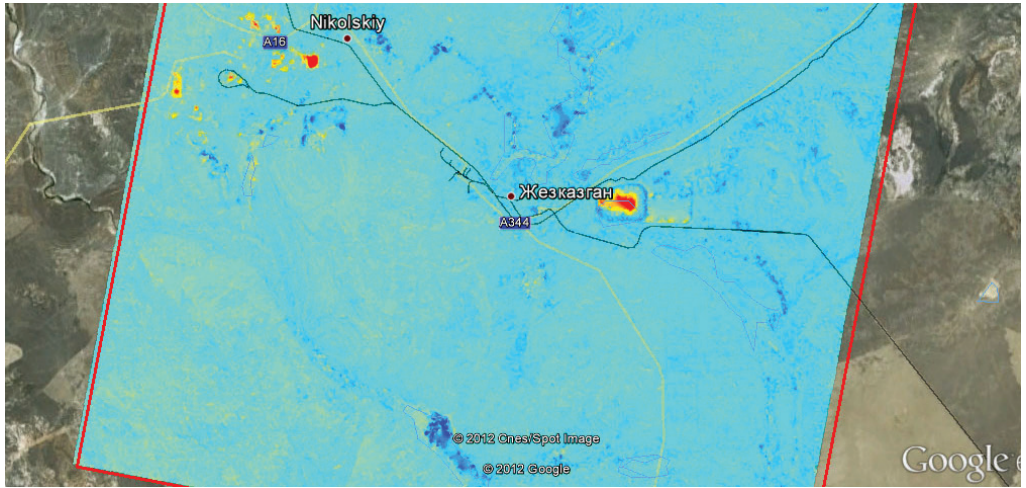


Рис. 9. Карта смещений земной поверхности за период с января 2011 г. по февраль 2012 г. Голубой цвет — стабильные участки, желтый и красный цвет — оседания земной поверхности

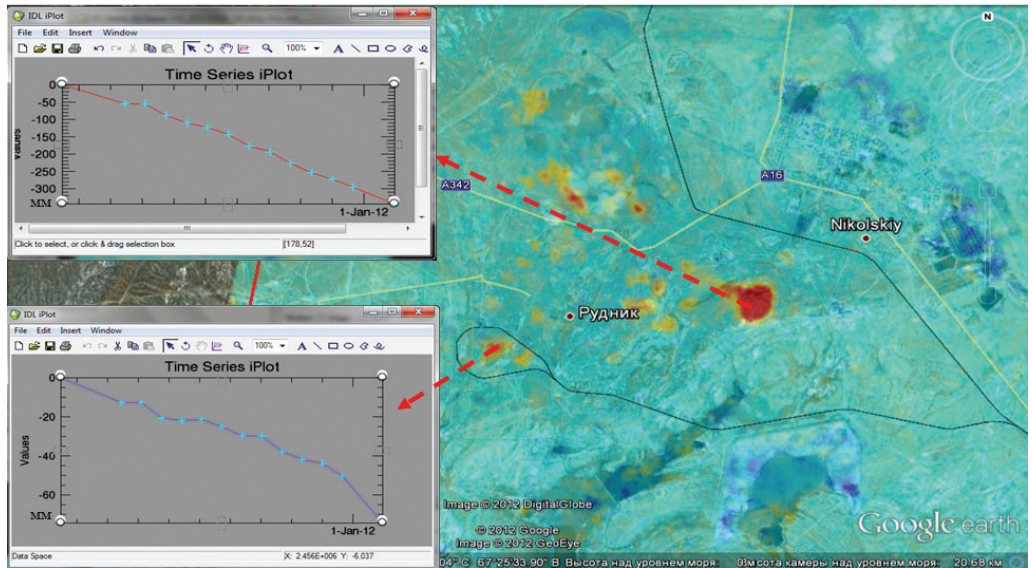


Рис. 10. Полупрозрачная карта смещений, наложенная на оптический снимок в интерфейсе Google Earth. Для двух точек, расположенных в центрах двух очагов оседаний, показаны графики оседаний в миллиметрах за весь период наблюдений

ростей смещений даже в пределах одного здания. Однако для полноценного анализа по методу постоянных рассеивателей (Persistent Scatterers Interferometry) все же необходимо не менее 30 съемок, поэтому анализ смещений зданий и сооружений

в населенных пунктах Сатпаев, Рудник, Жезказган и других будет выполнен при наборе 30 проходов (к концу 2012 г.). В дальнейшем (после набора 30 проходов), и по зданиям и сооружениям результаты будут поставяться с ежемесячной частотой.

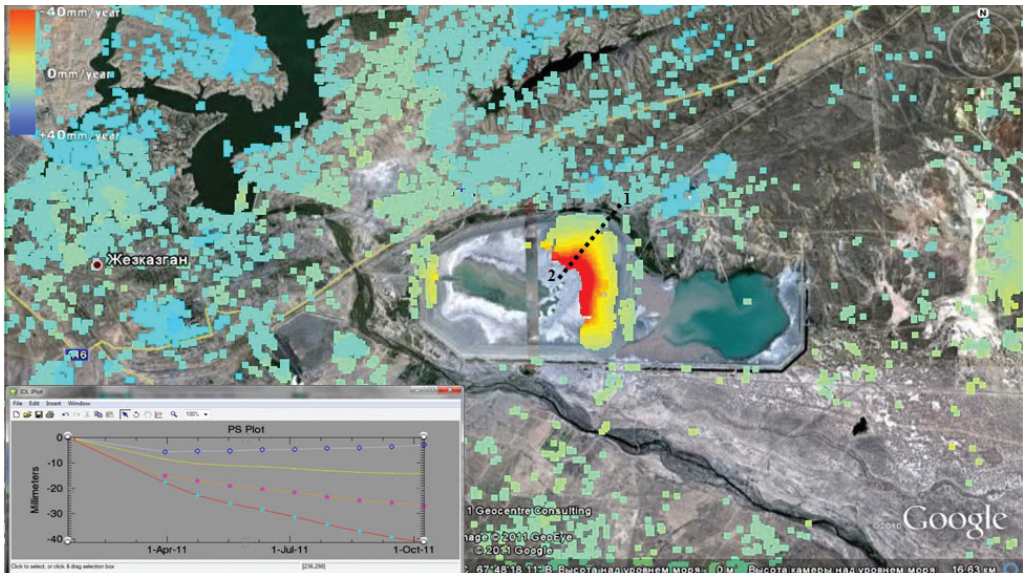


Рис. 11. Район хвостохранилища. Наиболее когерентные точки — постоянные рассеиватели радарного сигнала (естественные реперы для радара). Голубой цвет — стабильные точки, желтый и красный цвет — оседающие точки. Графики смещений для некоторых точек вдоль профиля 1–2, проведенного поперек плотины хвостохранилища, показаны в левом нижнем углу

В настоящее время, по состоянию на февраль 2012 г., опасных смещений непосредственно на территории населенных пунктов не выявлено.

Цифровые продукты обработки радарных снимков (растровые и векторные карты смещений и деформаций земной поверхности и сооружений), аналогичные приведенным на рисунках 9 —11, поставляются в корпорацию «Казахмыс» ежемесячно. Карты смещений и деформаций по зданиям и сооружениям будут поставляться ежемесячно после набора 30-проходов. Информация поставляется в цифровом формате средствами электронной связи, что обеспечивает дистанционный мониторинг происходящих динамических процессов земной поверхности на Жезказганском месторождении меди и получение этой информации как добывающим предприятием в Жезказгане, так и головными подразделениями корпорации в г. Алматы.

Технология полностью отработана, ее применение для решения производственных задач полностью себя оправдало, точность замера смещений подтверждается локальными наземными верификационными наблюдениями, запланировано применение

радарной интерферометрической технологии космического дистанционного мониторинга смещений на других объектах корпорации «Казахмыс», а также обучение специалистов корпорации данной технологии, поставка программного обеспечения ENVISARscape и полноценное внедрение данной технологии на базе корпорации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И. Герман, В.А. Мансуров. Прогноз обрушений на Жезказганском медном месторождении. Горный информационно-аналитический бюллетень. — №1.— 2010.— С. 95—104.
2. M. Richards. "A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing". IEEE Aerospace and Electronic, Vol. 22, No. 9, September 2007.
3. 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.