

**Д.А. Горский** (УП «Геоинформационные системы», Республика Беларусь)

В 2006 г. окончил радиотехнический факультет Белорусского государственного радиотехнического университета по специальности «микро- и нанотехнологии». В настоящее время — начальник отдела обработки данных ДЗЗ УП «Геоинформационные системы».

**К.А. Хоменков** (УП «Геоинформационные системы», Республика Беларусь)

В 2007 г. окончил географический факультет Белорусского государственного университета по специальности «геоинформационные системы». В настоящее время — начальник сектора отдела обработки данных ДЗЗ УП «Геоинформационные системы».

## Оценка влияния добычи калийных солей на состояние окружающей среды в виде деформаций земной поверхности методами радиолокационной съемки в Республике Беларусь

Старобинское месторождение калийных солей — одно из крупнейших в мире и второе по величине на территории СНГ. Площадь месторождения составляет 325 кв. км. Общие запасы руды — 7,8 млрд т. Руда добывается подземным способом. Производство состоит из четырех обогатительных фабрик и пяти рудников (строится шестой). Выработка начинается в 500–800 м от Солигорска. Солеотвалы имеют высоту от 120 до 150 м. Они состоят из продукта, непригодного для переработки. Горы постоянно растут, но и оседают — примерно на 5 м в год. ОАО «Беларуськалий» выпускает каждую шестую тонну калийных удобрений в мире.

В то же время интенсивная эксплуатация месторождений калийных солей создала ряд отрицательных экологических последствий. ОАО «Беларуськалий» является горнорудным предприятием, деятельность которого вызывает значительные негативные воздействия на окружающую природную среду. Это проявляется прежде всего в загрязнении атмосферы,

гидросферы и земельных ресурсов. За более чем 40-летний период эксплуатации Старобинского месторождения калийных солей на поверхности накопилось свыше 830 млн т отходов обогащения на общей площади свыше 1350 га, и при существующих способах разработки руд количество отходов и занимаемая ими площадь будут расти.

Таким образом, к экологическим проблемам при освоении месторождений калийных солей можно отнести: изъятие значительных территорий на технологические нужды; оседание земной поверхности над горными выработками; засоление почвы и подземных вод, в связи с чем вопрос о дальнейшем освоении Старобинского месторождения необходимо решать комплексно с учетом экологических проблем.

Наиболее опасным геодинамическим процессом, развивающимся при эксплуатации Старобинского месторождения, является просадка территории. При возникновении просадок и повышении уровня грун-

товых вод имеют место заболачивание, деформации в зданиях и сооружениях, выход из строя подземных коммуникаций. Процесс проседания начинается сразу же вслед за подработкой участка, достигая наибольшей интенсивности через 5 лет, далее постепенно затухает. На поверхности земли они проявляются через 0,5–5 лет после отработки шахтной выработки в виде пологих просадочных мульд площадью до 20 тыс. га, из которых 6,5 тыс. га подвержены заболачиванию. Размеры мульд в поперечнике колеблются от нескольких десятков до первых сотен метров, глубина простираения таких форм до 3–5 м. Зона негативного влияния при добыче калийных солей, связанного преимущественно с просадками земель, прослеживается на площади 120–130 кв. км. Следует отметить, что 76% от всего объема отходов, образующихся в Беларуси, – это отходы при добыче калийных солей.

В настоящее время мониторинг геодинамических процессов осуществляется путем выполнения традиционных геодезических маркшейдерских работ на основании инструментальных измерений высокоточными геодезическими приборами. Реализация такого рода подхода влечет значительные временные, трудовые и как следствие – большие финансовые затраты. Очевидно, что такой подход не может быть и достаточно точным: реальную информацию о смещениях можно получить только в точке измерений или на нивелирном ходе, тогда как на всей территории данные получают путем интерполяции, а также надежным, поскольку за время между съемками могут произойти геодинамические и геомеханические изменения. Использование спутниковых радарных систем

позволяет практически измерениями получить точную (миллиметровую) картину смещений земной поверхности и, таким образом, подтвердить и существенно уточнить расчетные ожидаемые параметры движения земной поверхности, возникающие при разработке месторождения.

### Цель проекта

Оценка техногенного влияния на земную поверхность путем создания цифровой карты вертикальных смещений земной поверхности методами спутниковой радарной интерферометрии на участке добычи калийных солей в Республике Беларусь.

### Предназначение проекта

Своевременная разработка и реализация необходимых корректирующих и предупреждающих действий для снижения техногенных и экологических рисков в районе г. Солигорска.

### Задачи проекта:

- подбор и анализ исходных радиолокационных данных;
- определение оптимальной технологической цепочки создания карты вертикальных смещений в программном продукте ENVI SARscape;
- практическая реализация технологии построения смещений и подбор конкретных значений параметров обработки;
- сравнение результатов полевых измерений геодезическим GPS-приемником с результатами обработки радиолокационных данных COSMO-SkyMed;
- анализ полученной карты вертикальных смещений и принятие решения о целесообразности и разум-

Таблица 1

### Исходные радиолокационные данные

Название спутника	Поляризационный режим	Пространственное разрешение, м	Площадь сцены, км	Дата и время съемки
COSMO-SkyMed	HH	3	40x40	2011.09.19,16:28
				2011.09.20,16:28
				2011.09.23,16:28
				2011.10.05,16:28
				2011.10.06,16:28

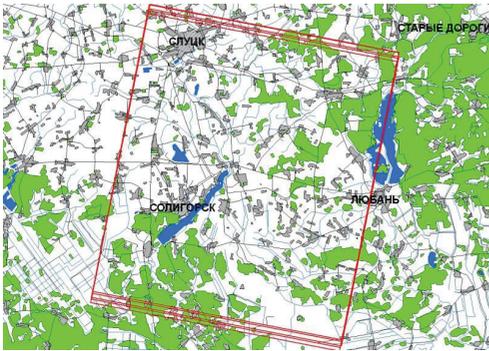


Рис. 1. Схема покрытия района добычи калийных солей на Старобинском месторождении радиолокационными данными COSMO-SkyMed

ной необходимости использования результатов в работе маркшейдерской службы и разработке природоохранных мероприятий на территории добычи калийных солей.

Данные для выполнения проекта (новая съемка со спутника COSMO-SkyMed; табл. 1, рис. 1) были предоставлены компанией «Совзонд».

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ В ENVI + SARSCAPE

Обработка исходных радиолокационных данных проводилась в программном комплексе ENVI+SARscape (рис. 2).

### 1. Импорт данных

Приведение «сырых» данных к виду Single Look Complex (фокусировка изображения) было выполнено в программном комплексе SARscape – Basic – Import Data – Standart Formats.

### 2. Расчет базовой линии

Расчет базовых линий для пяти снимков был выполнен в программном комплексе SARscape Interferometry-Tools-Multi Baseline Calculation.

После анализа значений базовых линий всех пар снимков был сделан вывод, что наиболее оптимальным вариантом для интерферометрической обработки с целью выявления смещений является пара снимков от 2011.09.23 и 2011.10.06, где перпендикулярная базовая линия составляет 11,9 м при критической 4340 м (0,25% от критической). В этом случае компонента смещений выражена очень хорошо, так как качество получаемой интерферометрическим методом карты смещений земной поверхности возрастает с уменьшением длины этой составляющей. Данная пара из имеющихся в наличии оптимально подходит для определения смещений.

Для построения опорного рельефа использовалась пара снимков 2011.09.19 и 2011.10.06, где перпендикулярная базовая линия составляет 627 м при критической 4351 м (14,4% от критической), что говорит о преобладании компоненты рельефа над компонентой смещений. Данная пара из имеющихся в наличии хорошо подходит для построения цифровой модели рельефа в качестве опорного для выявления смещений. Построение цифровой модели рельефа (рис. 3) осуществлялось по схеме представленной на рис. 4.

Средняя ошибка ЦМР, построенной по паре снимков COSMO-SkyMed, составила 1,44 м. Контроль точности производился по шести контрольным точкам.

Средняя ошибка ЦМР, построенной по паре снимков COSMO-SkyMed, составила 1,44 м. Контроль точности производился по шести контрольным точкам.

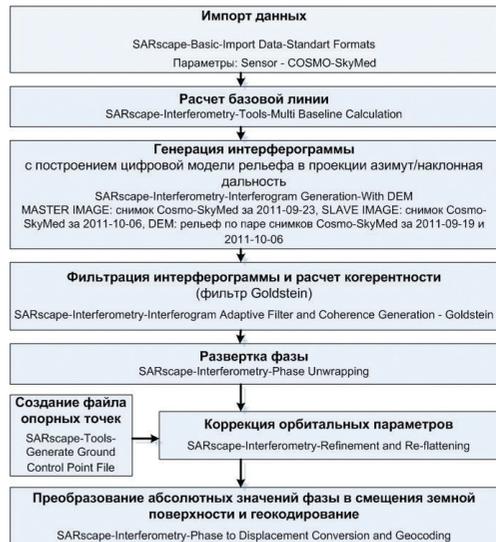
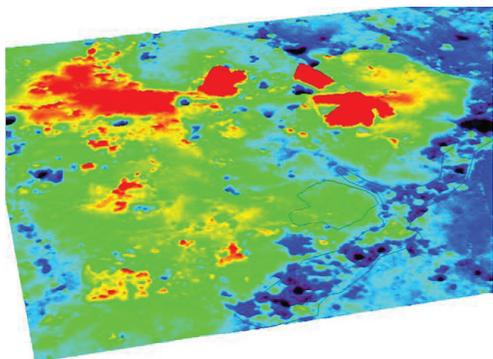


Рис. 2. Блок-схема обработки исходных радиолокационных данных в программном комплексе ENVI+SARscape



*Рис. 3. Цифровая модель рельефа, построенная по паре снимков COSMO-SkyMed за 2011-09-19 и 2011-10-06 с разрешением - 10 м*

кам вне зоны значительных смещений земной поверхности и измеренными геодезическими GPS-приемниками специалистами маркшейдерской службы ОАО «Беларуськалий».

### 3. Генерация интерферограммы

Интерферограмма (рис. 5) является результатом комплексного поэлементного перемножения основного изображения 2011.09.23 и вспомогательного 2011.10.06, геометрически совмещенного с основным. Дифференциальная интерферограмма получена путем вычитания из интерферограммы фазы опорного рельефа, построенного по паре снимков 2011.09.19 и 2011.10.06, на которой один полный спектр цветов (интерференционный цикл) соответствует смещениям земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора. На данном изображении отчетливо видны концентрические окружности с наиболее высокими значениями смещений, дальнейшая обработка позволяет получить численные значения смещений земной поверхности на всей площади снимка.

### 4. Фильтрация интерферограммы, фильтр Goldstein

Фильтрация интерферограммы позволяет в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной карты смещений земной поверхности. На данном этапе был получен файл когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую

пару, для значений от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей. Когерентность показывает стабильность измерений для каждого пикселя, рассчитанного из двух изображений. Яркие области имеют высокую когерентность и более надежны, чем темные области. При снижении когерентности точность определения смещений снижается, а сигнал становится искаженным. Пиксели со значением когерентности от 0,1 до 1 окрашены красным цветом, более насыщенным тонам соответствуют более высокие значения когерентности. Черным цветом выделены области с низкой когерентностью: водные поверхности, сельхозугодья, подвергнутые обработке. Карта когерентности говорит о ее достаточно высоких значениях на основной части территории, несмотря на разницу в 13 дней между съемками в осенний период (рис. 6).

### 5. Развертка фазы

Развертка фазы (переход от относительных значений фазы к абсолютным) и устранение разрывов фазы осуществлялись по алгоритму Minimum Cost Flow с отсечением по порогу когерентности 0,1 и Decomposition Levels 1 (рис. 7).

### 6. Создание файла опорных точек

Было создано 19 опорных точек, равномерно распределенных по снимку, с условием, чтобы они не попадали в области крупных смещений, а также в области ярко выраженного рельефа (рис. 8). Геодезические координаты точек не определялись.

### 7. Коррекция орбитальных параметров

На данном этапе осуществлялась коррекция базовой линии с помощью контрольных точек на основе сопоставления развернутой фазы, отфильтрованной интерферограммы, карты когерентности и уже имеющейся ЦМР, построенной по паре снимков COSMO-SkyMed от 2011.09.19 и 2011.10.06.

### 8. Преобразование абсолютных значений фазы в смещения земной поверхности и геокодирование

На данном этапе была рассчитана вертикальная компонента смещений, т.е. значения смещений вдоль луча радиолокатора умножаются на косинус угла съемки (рис. 9). Размер пикселя был определен 10 м (сжатие исходного размера пикселя в четыре раза), размер интерполяционного окна – 10 и отсечение по порогу когерентности – 0,1, система координат —



Рис. 4. Технология построения цифровой модели рельефа по радиолокационным данным в программе ENVI+ SARscape

UTM WGS84 Zone 35 North. На приведенном изображении синим и фиолетовым цветом показаны оседания земной поверхности, особенно отчетливо выделяются, так называемые мульды проседания — концентрические окружности темно-фиолетового цвета с наибольшими значениями просадок, как правило, им соответствует забой лавы (подземная горная выработка), который производилась в период съемки, зеленым цветом отображаются стабильные участки, красным — поднятия территории. Диапазон значений смещений земной поверхности составляет от  $-9$  см — опускание территории) до  $+4$  см (поднятие).

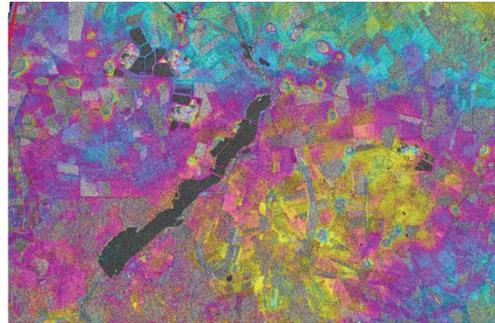


Рис. 5. Результирующая дифференциальная интерферограмма за 13 дней: 2011.09.23 и 2011.10.06. Один полный спектр цветов (интерференционный цикл) соответствует смещениям земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора

### СВЕДЕНИЯ О ВЫПОЛНЕНИИ ПОЛЕВЫХ РАБОТ И СРАВНЕНИИ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Натурные инструментальные измерения производились высокоточным геодезическим GPS-приемником на территории третьего рудоуправления ОАО «Беларуськалий» специалистами местной маркшейдерской службы. Даты полевых измерений: 23.09.2011 и 27.10.2011 г., было измерено пять одинаковых точек за приведенные даты, период между измерениями 35 дней, смещения от 0 см на точке 650 до 8,3 см (опускание) на точке 663а. Исходные радиолокационные данные COSMO-SkyMed были получены за 23.09.2011 и 06.10.2011 г., период между съемками 13 дней, т.е. начальные даты полевых измерений и радиолокационной съемки совпадают. Сравнение результатов приведено в табл. 2.

Был сформирован векторный файл точек полевых измерений и совмещен с дифференциальной интерферограммой (рис. 10).

Из приведенной иллюстрации видно, что точки 661, 662, 663 и 663а лежат в зоне наибольших смещений земной поверхности, что находит отражение в данных полевых измерений, причем точка 663а находится в зоне наиболее интенсивных смещений

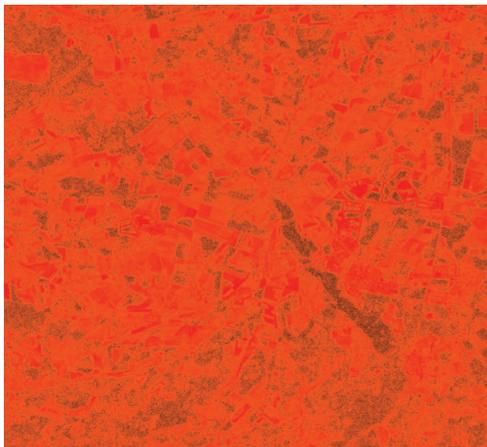


Рис. 6. Карта когерентности, рассчитанные по паре снимков COSMO-SkyMed от 2011.09.23 и 2011.10.06

и по полевым данным она опустилась на 8,3 см за 35 дней.

Чтобы получить абсолютные значения смещений, точки полевых измерений совмещались с картой вертикальных смещений (рис. 11). Белый цвет иллюстрирует стабильные участки земной повер-

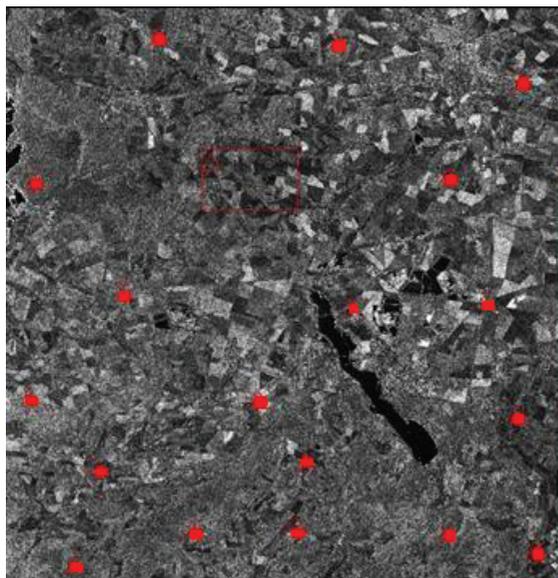


Рис. 8. Размещение опорных точек на снимке COSMO-SkyMed

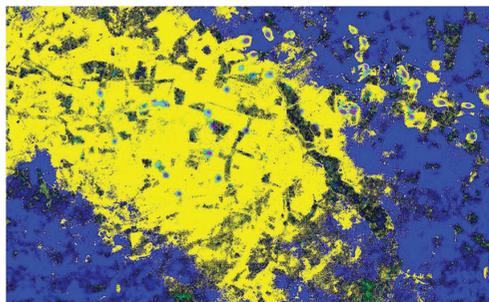
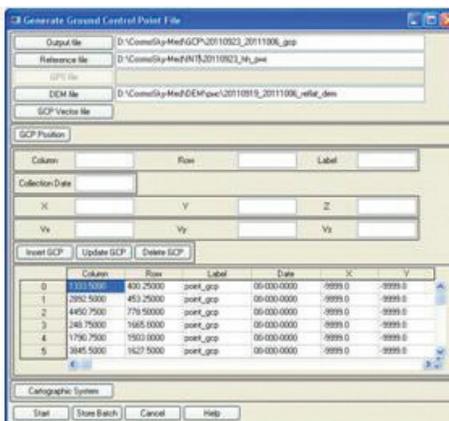


Рис. 7. Развертка фазы, рассчитанная по паре снимков COSMO-SkyMed от 2011.09.23 и 2011.10.06

хности, салатовый – опускания в диапазоне от 1 до 3 см, зеленый – опускания в диапазоне от 3 до 5 см.

По линии, соединяющей точки полевых измерений, был построен профиль смещений в масштабе местности, отражающий вертикальные движения земной поверхности за 13 дней, и совмещен с графиком смещений точек по данным полевых измерений за 35 дней (рис. 12). По горизонтальной оси отложены точки полевых измерений в масштабе местности, по вертикальной оси – значения смещений в метрах. График наглядно иллюстрирует тен-



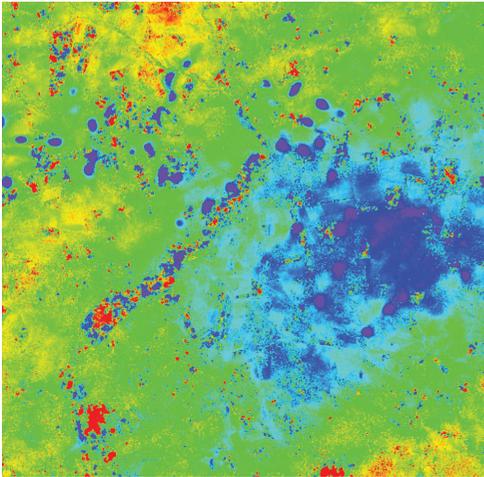


Рис. 9. Вертикальные смещения земной поверхности, рассчитанные по паре снимков COSMO-SkyMed от 2011.09.23 и 2011.10.06

денцию смещений земной поверхности по линии, соединяющей точки полевых измерений, начиная от точки 650, где практически отсутствуют смещения, до точки 663а, где опускание земной поверхности достигает 8,3 см по полевым данным за 35 дней и 3,2 см по данным дифференциальной интерферометрии за 13 дней. Разница в абсолютных значениях между полевыми данными и данными дифференциальной интерферометрии в данном случае объясняется разными периодами наблюдений: 35 дней –

период между полевыми измерениями (с 23.09.2011 по 27.10.2011) и 13 дней – период между съемками COSMO-SkyMed (с 23.09.2011 по 06.10.2011), но даты начала наблюдений совпадают: 23.09.2011. Кроме того, информация по смещениям земной поверхности, полученная по данным интерферометрической обработки радиолокационных снимков, может быть получена в любой точке пространства, тогда как информация по наземным данным, только в точке измерений, на остальной территории возможна интерполяция значений, что ведет к искажению реальной картины, что и продемонстрировано на рис. 12.

Проводилось сопоставление маркшейдерско-геодезической информации с картой вертикальных смещений (рис. 13). На графиках иллюстрируется смещение земной поверхности (опускание) на четырех точках, на которые имела информация полевых наблюдений геодезическим GPS-приемником. По горизонтальной оси отложены дни наблюдений: 35 дней между повторными наблюдениями GPS-приемником и 13 дней между повторными съемками с радиолокационного спутника COSMO-SkyMed (начало наблюдений одинаковое), по вертикальной оси — смещения в метрах. График наглядно иллюстрирует положительную корреляцию между полученными результатами значений смещений по данным радиолокационной съемки интерферометрическим методом и натуральных инструментальных измерений геодезическими приборами.

Таблица 2

**Сравнение результатов полевых данных и результатов обработки радиолокационных данных**

Номер точки	Высота, м, 1-е полевое обследование, 23-09-2011	Высота, м, 2-е полевое обследование, 27-10-2011	Смещения по полевым данным, м, период 35 дней	Смещения по данным дифференциальной интерферометрии, м, период 13 дней, 23-09-2011 и 06-10-2011
650	148,047	148,047	0,000	-0,002
661	147,604	147,547	-0,057	-0,022
662	147,483	147,425	-0,058	-0,026
663	147,596	147,535	-0,061	-0,028
663а	146,931	146,848	-0,083	-0,032

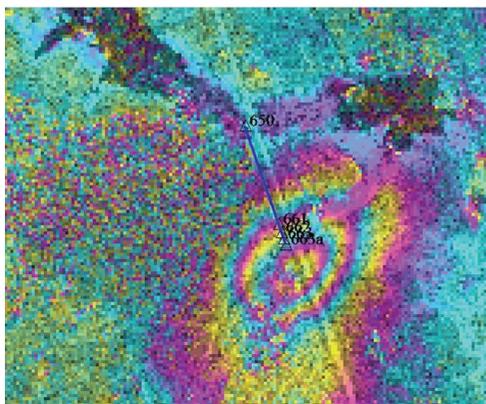


Рис. 10. Точки полевых измерений, совмещенные с картой дифференциальной интерферограммой

На рис. 14 отображен план горных работ, совмещенный с картой вертикальных смещений. Красными прямоугольниками обозначены места забоя лавы (подземные горные выработки), который проводился в период между двумя радиолокационными съемками, зелеными концентрическими окружностями различной интенсивности – просадки земной поверхности, произошедшие за данный период (более насыщенный зеленый цвет обозначает более интенсивные оседания), выявленные по данным радиолокационной съемки. Практически всем забоям лавы, как правило, они располагаются в центре смещений, соответствуют просадки земной

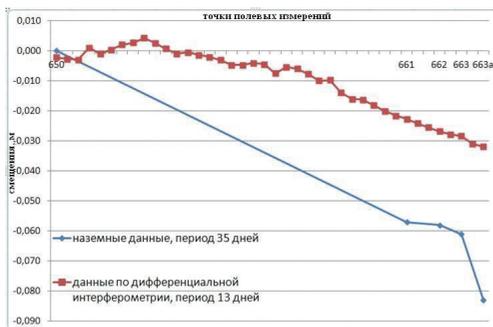


Рис. 12. Профиль смещений, отражающий вертикальные движения земной поверхности по данным дифференциальной интерферометрии и полевым данным

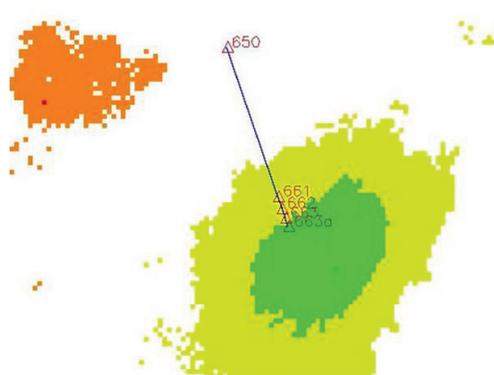


Рис. 11. Точки полевых измерений, совмещенные с картой вертикальных смещений, полученной по данным радиолокационной съемки

поверхности, нашедшие отражение на карте вертикальных смещений, построенной по данным обработки радарной съемки.

Специалисты ОАО «Беларуськалий» также подтвердили, что результаты корреляции весьма неплохие: на полученной карте вертикальных смещений распознается абсолютное большинство зон, в которых в период сентября — октября 2011 г. происходили деформации земной поверхности, вызванные подземными горными работами. Причем отклонения смещения центров мульд проседания (концентрические окружности на карте) от их теоретического положения составляет от нескольких метров до нескольких десятков метров.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена карта вертикальных смещений земной поверхности района Старобинского месторождения калийных солей по данным интерферометрической обработки пары радиолокационных космических снимков COSMO-SkyMed (рис. 15) в программной среде ENVI SARscape за период с 23 сентября 2011 г. по 6 октября 2011 г. За 13 дней произошли смещения земной поверхности от 8,7 см (опускание) до +3,2 см (поднятия). Основная часть территории за столь короткий срок практически не претерпела изменений, значения смещений колеблются от -1 см до +1 см, что, ско-

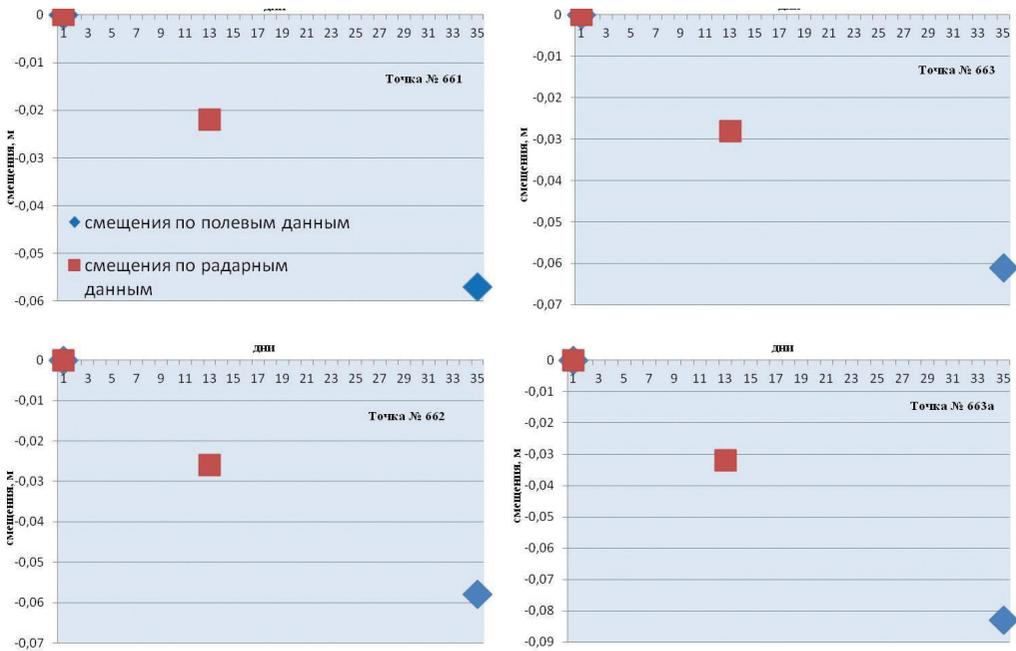


Рис. 13. Смещения по точкам, отражающее вертикальные движения земной поверхности на основании полевых измерений и радарных данных

рее всего, объясняется погрешностями измерений и потерей когерентности, однако на отдельных локальных участках наблюдаются значительные опускания, так называемые мульды проседания, где опускание земной поверхности достигает 9 см. Как правило, они имеют округлую форму диаметром 150–300 м и связаны с добычей калийных солей на данной территории подземным способом.

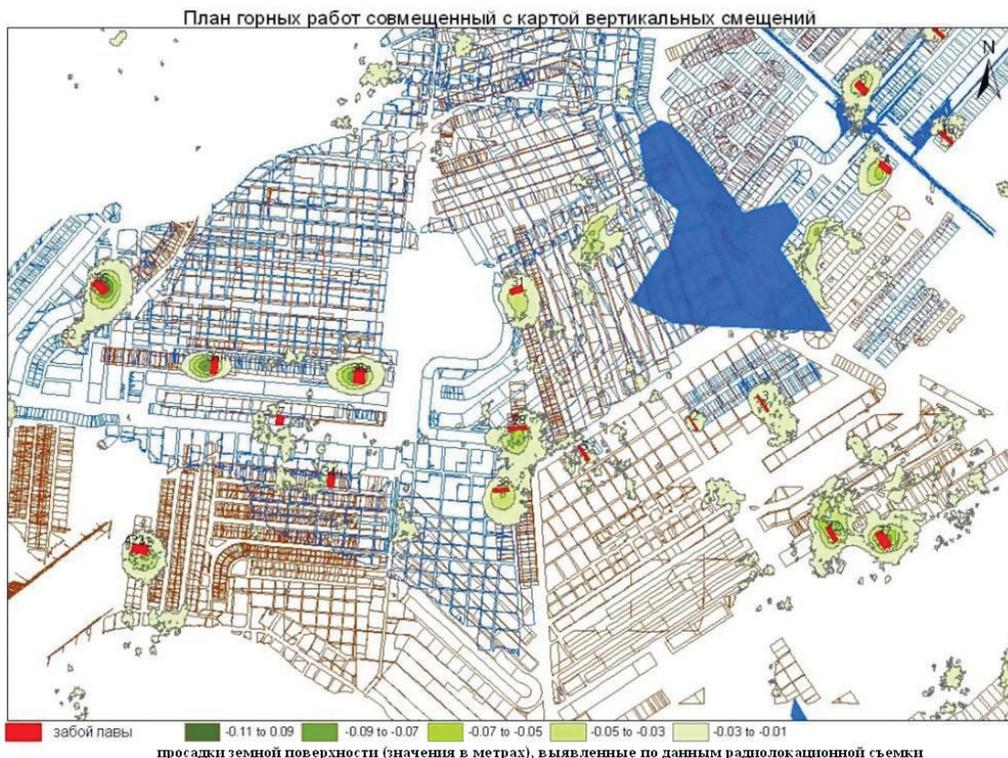
2. В ходе выполнения проекта была реализована на практике технология выявления вертикальных смещений по данным интерферометрической обработки пары космических снимков COSMO-SkyMed в программе ENVI SARscape.

3. Произведено сравнение результатов полевых обследований с полученными данными по радиолокационным снимкам COSMO-SkyMed и сделан вывод об их положительной корреляции (рис. 16).

4. Проанализирована полученная информация и сделан вывод о перспективности использования данного метода для применения в маркшейдер-

ско-геодезической службе ОАО «Беларуськалий» для поддержки принятия своевременных решений, разработки и планирования природоохранных мероприятий в данном районе соответствующими службами.

На карте (рис. 15) от белого до темно-зеленого показаны возрастающие оседания (темно-зеленый цвет — оседания до 9 см), от белого к красному — возрастающие поднятия (красный цвет — поднятия до 5 см). Белый цвет — стабильные участки. За период в 13 дней по данным интерферометрической обработки радиолокационных данных COSMO-SkyMed было выявлено более 40 концентрических мульд проседания земной поверхности размером 0,1–0,3 кв. км, которые приурочены к районам добычи калийных солей с максимальными значениями оседаний до 9 см. 37 из них нашли подтверждение согласно плану горных работ и локализируются вокруг забоев лавы.



*Рис. 14. План горных работ, совмещенный с картой вертикальных смещений, полученной по данным радиолокационной съемки*

Таким образом, использование спутниковой радарной съемки позволяет:

- получить точную картину смещений земной поверхности на всем участке и таким образом оценить техногенное влияние на окружающую среду в виде оседаний земной поверхности методами радиолокационной съемки;
- подтвердить и существенно уточнить расчетные ожидаемые параметры вертикальных движений земной поверхности, возникающих при разработке месторождения;
- осуществлять контроль за характером деформаций земной поверхности над обрабатываемыми участками месторождения.

Использование натуральных инструментальных измерений с использованием высокоточных геоде-

зических приборов дает возможность верифицировать радарные данные, а совместное их использование позволяет с точностью до нескольких миллиметров получать численные значения смещений земной поверхности и их координаты на всей площади месторождения. Такая технология выполнения наблюдений для решения маркшейдерских задач на территории добычи калийных солей имеет преимущество по сравнению с традиционными геодезическими решениями как по скорости получения результата, так и по стоимости.

Анализ вертикальных смещений даже за такой короткий срок — 13 дней — показывает актуальность проблемы деформации земной поверхности для данного региона (локальные просадки земной поверхности достигают 9 см) и целесообразность осуществления постоянного мониторинга с приме-

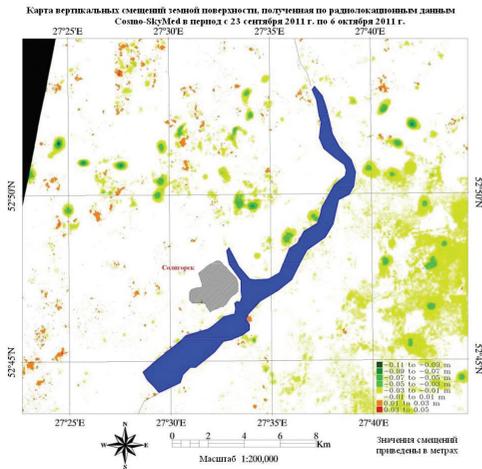


Рис. 15. Итоговая карта вертикальных смещений земной поверхности

нением технологий радарной интерферометрии на территории Старобинского месторождения калийных солей. Представляется перспективным создание многоуровневой геоинформационной системы геодинамического мониторинга деформационных процессов земной поверхности на участке добычи калийных солей с применением наземных измерительных средств и интерферометрических технологий радиолокационной съемки.

Кроме того, полученные результаты позволяют оценить влияние горного производства на окружающую среду путем прогнозирования изменения уровня и миграции загрязнений в подземных водах, снижения урожайности сельхозкультур в результате колебаний уровней грунтовых вод. Спутниковый мониторинг вертикальных смещений земной поверхности на данной территории может служить основой для последующей разработки природоохранных мероприятий.



Рис. 16. Просадки земной поверхности, совмещенные с радиолокационным снимком COSMO-SkyMed