

# РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ТЕРРИТОРИИ В РАЙОНЕ ГАЙСКОГО ГОК

**В.А. Горбунов** (ОАО «Гайский ГОК»)

В 1991 г. окончил Московский горный институт по специальности «маркшейдерское дело». В настоящее время — главный маркшейдер ОАО «Гайский ГОК».

**Ю.И. Кантемиров** (Компания «Совзонд»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина по специальности «разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений». После окончания университета работал научным сотрудником лаборатории космической информации для целей газовой промышленности в ООО «Газпром ВНИИГАЗ». С 2010 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время — ведущий специалист отдела программного обеспечения.

Гайское медно-колчеданное месторождение расположено в восточной части Оренбургской области, где сосредоточено 76% запасов меди области. Кроме меди, в руде этого месторождения содержится в промышленных концентрациях цинк, сера, золото, серебро, а также редкие и рассеянные элементы: кадмий, селен, теллур, галлий и висмут. Месторождение залегает в степной части Южного Урала, рассеянной широкими долинами, оврагами, и приурочено к водоразделу правобережных притоков Елшанка и Колпачка реки Урал, расположенной в 18 км к востоку от него. Добыча руды проводилась как открытым, так и подземным способом. В настоящее время ведется только подземная разработка. Используется этажно-камерная система с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями.

Разработка месторождения приводит к деформациям бортов и уступов карьеров, смещениям земной поверхности и сооружений на промышленной площадке предприятия, а также

на прилегающей к горно-обогательному комбинату территории. По заказу ОАО «Гайский ГОК» компанией «Совзонд» был разработан и реализован проект по космическому радиолокационному мониторингу смещений и деформаций на объектах, расположенных на территории Гайского горно-обогательного комбината и прилегающей к нему местности.

Среди основных объектов, на которых требовалось провести космический радиолокационный мониторинг в соответствии с требованиями заказчика, выделим следующие:

- а) на территории комбината:
- борты и уступы карьеров № 1, 2 и 3;
  - отвалы горных пород;
  - районы подземной добычи горных пород;
  - участки внутренних отвалов;
  - гидротехнические сооружения хвостохранилищ;
  - здания и сооружения промышленной площадки;
- б) на прилегающей территории:
- железная дорога;

— Гайский завод по обработке цветных металлов;

- город Гай.

Исходными данными для мониторинга служили 30 космических снимков территории комбината и прилегающей местности, полученных радиолокационной съемочной аппаратурой с группировки из 4-х космических аппаратов COSMO-SkyMed (e-GEOS, Италия) в период с апреля по октябрь 2012 г.

Интерферометрическая обработка радиолокационных космических снимков с целью выявления смещений земной поверхности и сооружений выполнялась в программных комплексах SARscape (Exelis VIS, США-Франция) и PSP-IFSAR (e-GEOS). Для визуализации результатов использовались программные комплексы ENVI (Exelis VIS) и ArcGIS (Esri, США).

Интерферометрическая обработка проводилась без наземных контрольных точек и без использования данных наземных наблюдений. В качестве опорного рельефа на первом этапе обработки применялась



Рис. 1

Схема покрытия исследуемой территории в районе Гайского ГОК данными COSMO-SkyMed

глобальная общедоступная цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM, а затем уточненная интерферометрическая ЦМР.

#### ▼ Исходные радиолокационные данные COSMO-SkyMed

Космические аппараты COSMO-SkyMed имеют съемочную аппаратуру бокового обзора, поэтому при использовании одной интерферометрической серии снимков более точный результат получается только для одной части карьеров и отвалов или для одной из сторон сооружений. Поскольку основными объектами мониторинга являлись карьеры, и наибольший интерес представлял мониторинг их северо-западной части, для определения деформаций карьеров, а также всех остальных объектов, попадавших на участок территории, размером 10x10 км, выбранный заказчиком, использовались радиолокационные снимки, полученные на восходящем витке орбиты.

На рис. 1 показана схема покрытия исследуемой территории в районе Гайского ГОК (контур голубого цвета) данными специально запланированных интерферометрических съемок с радиолокационных спутников COSMO-SkyMed (контур зеленого цвета). На рис. 1 и всех последующих рисунках в качестве

фоновой подложки использовано изображение с Интернет-ресурса Google Earth.

#### ▼ Результаты интерферометрической обработки

Среди всех технологий интерферометрической обработки радиолокационных снимков наиболее точное определение смещений достигается по данным интерферометрии постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала. Постоянными рассеивателями (или «реперными» точками для спутникового радара) являются точки, расположенные на земной поверхности и наиболее стабильно отражающие радиолокационный сигнал. Постоянные рассеиватели выявляются на первом этапе интерферометрической обработки и в дальнейшем по ним рассчитываются смещения и деформации. Данный подход позволяет определить смещения постоянных рассеивателей величиной менее 1 см.

На участке размером 10x10 км в процессе обработки радиолокационных снимков было выявлено более 2 млн постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала. То есть, средняя плотность точек с известными смещениями на исследуемой территории составила около 20 тыс. точек на 1 км<sup>2</sup>. Следует отметить, что локальная плотность этих точек сильно варьи-

руется в зависимости от состояния земной поверхности, достигая максимума на застроенных территориях и минимума на полях, занятых сельхозугодьями, в лесах и на водных объектах.

На рис. 2–9, приведенных ниже, точками разного цвета показаны выявленные постоянные рассеиватели и характер их смещений. Изменение цвета от желтого к красному характеризует возрастание величины оседания точек, синий цвет — поднятие, а зеленый — отсутствие деформаций. На рисунках также приведены графики динамики смещения наиболее характерных точек (постоянных рассеивателей).

Рассмотрим подробнее результаты, представленные на этих рисунках.

На рис. 2 хорошо заметен участок деформаций бортов в западной части карьера № 1 за период наблюдений (точки красного цвета). В правом верхнем углу приведен график динамики смещений для одной из наиболее интенсивно оседающих точек над участком подземной добычи (западный борт карьера № 1). За весь период наблюдений величина ее осадки составила около 25 см. Этот крупный очаг оседаний вызван добычей руды подземным способом из-под западного и северного бортов карьеров. Он вызывает деформации соору-

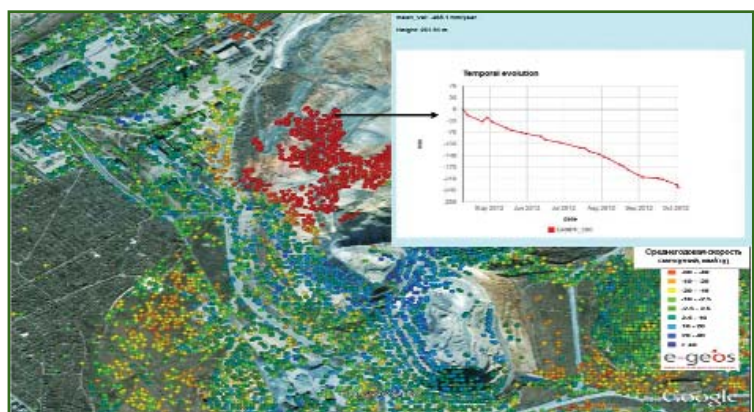


Рис. 2

Динамика смещений на бортах и уступах карьера № 1

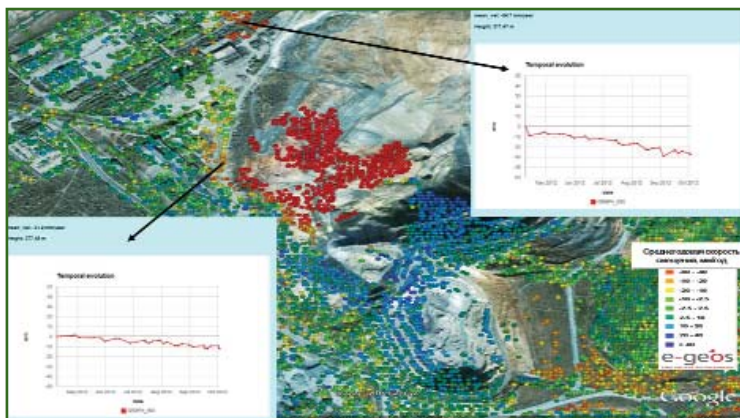


жений промышленной площадки и автодороги (точки желтого и оранжевого цветов). На рис. 3 приведены графики динамики смещений: для одной из точек около сооружений промышленной площадки, к северо-западу от карьера № 1 (оседания до 3 см), и для другой — вдоль автодороги, вблизи западного борта карьера № 1 (оседания в 1 см).

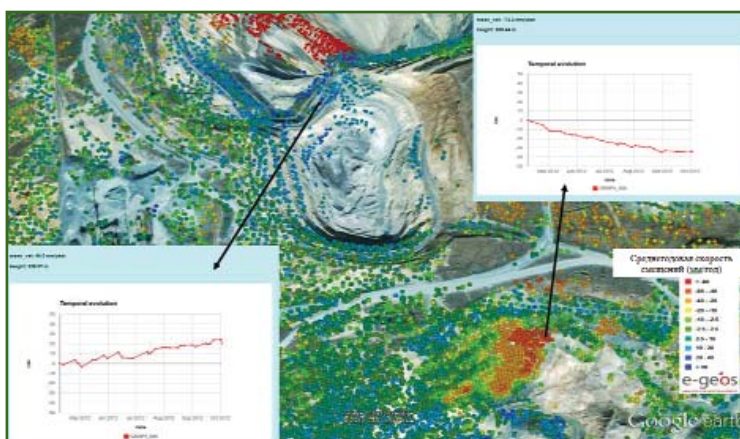
На рис. 4 точками синего цвета в районе карьера № 3 показаны поднятия, обусловленные наличием под ними внутреннего отвала горных пород, а оранжевого цвета — очаг деформаций (оседаний) к северу от карьера № 2. В нижней части рисунка приведен график смещений одной из точек в северной части карьера № 3 — поднятие составляет 2 см над внутренним отвалом горных пород. В верхней части рисунка приведен график смещений для одной из точек в центре локального очага деформаций в северной части карьера № 2 — оседание составляет более 3 см.

На рис. 5 показаны три очага деформаций в юго-западной части карьера № 2. На верхнем и нижнем графиках приведены деформации (оседания) в северном и южном очагах, которые составляют 2 и 4 см, соответственно. Средний график показывает ускоряющиеся до 4 см оседания в очаге деформаций, расположенном между северным и южным очагами.

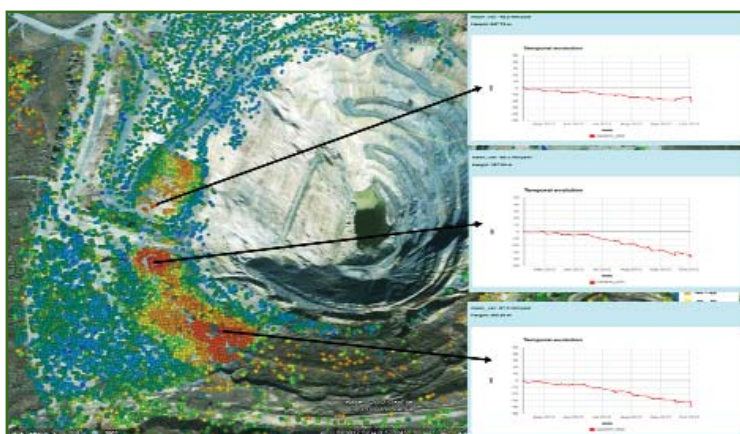
На рис. 6 приведены результаты интерферометрической обработки постоянных рассеивателей в районе хвостохранилища. Тренд смещений гидротехнических сооружений хвостохранилища близок к нулю. На рисунке также показан график динамики смещений для одной типовой точки, оседание которой за весь период наблюдений составило 1 см. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о стабильности гид-



**Рис. 3**  
Динамика смещений сооружений промышленной площадки и автодороги в районе карьера № 1



**Рис. 4**  
Динамика смещений в районе карьеров № 2 и № 3

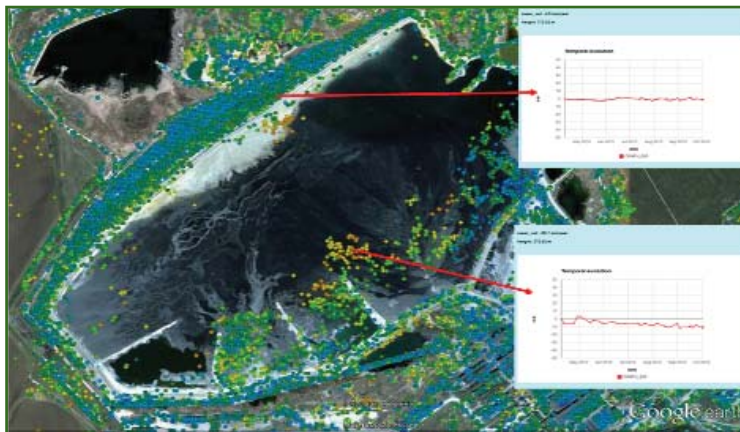


**Рис. 5**  
Динамика смещений в центрах очагов деформаций в юго-западной части карьера № 2

ротехнических сооружений хвостохранилища (установлено отсутствие их деформаций) и уплотнении пород-хвостов при их складировании. Хвосты на некоторых участках уплотняют-

ся (точки желтого и оранжевого цветов).

На рис. 7 в трехмерном виде приведено расположение постоянных рассеивателей между улицами Ленина и Молодежной



**Рис. 6**  
Динамика смещений в районе хвостохранилища

в городе Гае. Детальное изучение полученных результатов показывает, что практически на каждом пролете многоквартирных домов (на стороне, обращенной навстречу лучу радара, т. е. на юго-запад) выявляются многочисленные постоянные рассеиватели. Обнаружены оседания крайнего северного пролета д. 56 и крайнего южного пролета д. 54а по ул. Ленина, западной части здания школы № 5 и земной поверхности между зданием детского сада № 18 и улицей Молодежная. Все эти очаги оседаний пространственно выровнены вдоль прямой линии северного направления. Возможно, они вызваны геологическим разломом или подземным линейным объектом.

На рис. 8 приведено трехмерное изображение постоянных рассеивателей в районе западного борта карьера № 1 и покрытие постоянными рассеивателями копра шахты «Скиповая» и башенного копра шахты «Эксплуатационная». Цвет точек постоянных рассеивателей в данном случае характеризует их абсолютную высоту, которая наряду с величинами смещений вычисляется для каждой из точек в ходе интерферометрической обработки (от красного цвета к зеленому — возрастающие высоты).

Как видно из рис. 2 и 3, на северном борту карьера № 1

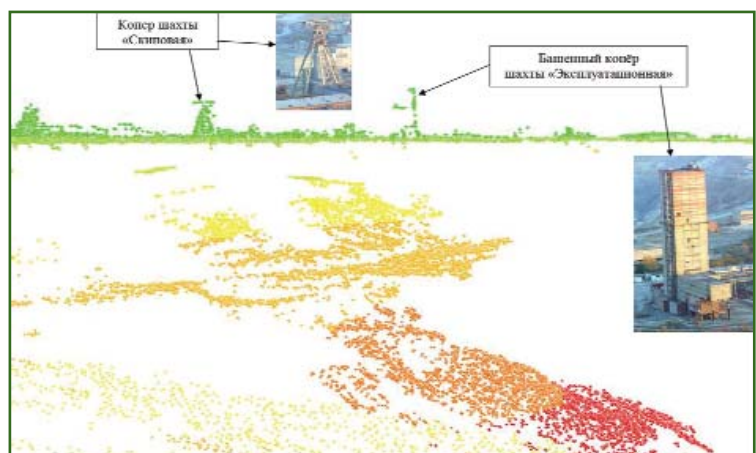
постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала не выявлено. Это связано как с геометрией съемки бокового обзора, так и с интенсивными деформациями, происходящими

там (сильно оседающие точки не являются высоко-когерентными). Поэтому для получения информации о смещениях на северном борту карьера № 1 дополнительно была выполнена обработка по методу интерферометрии SBAs (Small Baseline Series Interferometry). Он менее требователен к когерентности, но не такой точный. На рис. 9 приведены величины деформаций точек постоянных рассеивателей и изолинии через каждые 10 мм — по методу интерферометрии SBAs. Сопоставление результатов показывает, что эти данные пространственно дополняют друг друга.

В результате обработки данных интерферометрии заказчи-



**Рис. 7**  
Трехмерное изображение города Гаи и положение постоянных рассеивателей, выявленных между улицами Ленина и Молодежной



**Рис. 8**  
Трехмерное изображение постоянных рассеивателей в районе западного борта карьера № 1



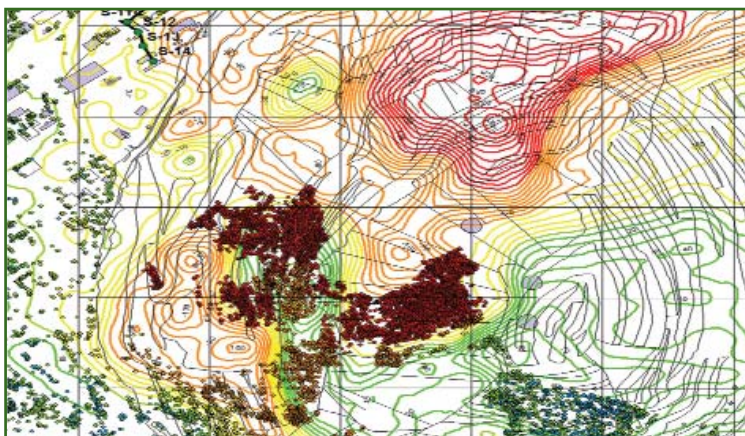


Рис. 9

Величины деформаций, полученные по данным интерферометрии постоянных рассеивателей и методу интерферометрии SBAs

ку были переданы следующие материалы.

1. Карта смещений земной поверхности за период с апреля по октябрь 2012 г., рассчитанная по методу интерферометрии SBAs в двух файлах растрового формата. В одном — обозначены деформации в цветовом кодировании, а в другом — приведены реальные значения смещений в миллиметрах. Отрицательные значения соответствуют оседаниям, положительные — поднятиям.

2. Файл с изображением изолиний смещений (через каждые 10 мм), произошедших за период с апреля по октябрь 2012 г., в формате ESRI Shapefile. В атрибутах каждой изолинии приведены смещения в миллиметрах. Отрицательные значения соответствуют оседаниям, положительные — поднятиям.

3. Основным результатом стал файл с изображением точек постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала в формате SHP. В атрибутах к каждой точке приведены смещения в миллиметрах на каждую дату съемки, среднегодовая скорость смещений в мм/год и высота точки над эллипсоидом WGS-84.

4. В качестве дополнительной информации предоставлен файл с изображением точек постоянных рассеивателей в формате KMZ, позволяющем ви-

зуализировать в трехмерном виде постоянные рассеиватели на фоновой подложке из архивных космических снимков Интернет-ресурса Google Earth. При выборе конкретного рассеивателя на экране отображается график динамики его смещений.

#### ▼ Анализ полученных результатов

По результатам радиолокационного космического мониторинга деформаций территории Гайского горно-обогатительного комбината и прилегающей местности можно сделать следующие выводы:

— несмотря на пространственную неравномерность размещения постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала на исследуемой территории, плотность рассеивателей 2 млн точек на 100 км<sup>2</sup> достаточно велика и превышает любую возможную плотность контрольных точек (реперов) при наземных геодезических наблюдениях;

— частота съемок (максимально — до 8 раз в месяц) достаточна, чтобы за безснежный период года определить не только итоговые смещения, но и проанализировать их динамику за полгода;

— недостаточное количество точек на участках наиболее интенсивных оседаний компенси-

руется дополнительным — чуть менее точным, но более пространственно выдержанным — площадным результатом, получаемым по методу интерферометрии SBAs;

— восточные части карьеров при съемке только на восходящем витке орбиты остаются засвеченными вследствие эффекта переналожения. Эту проблему в будущем можно решить, используя съемку сразу с двух витков орбиты (30 съемок с восходящего витка и 30 съемок с нисходящего витка). Однако это вызовет удорожание стоимости проекта в два раза.

Технология радиолокационной интерферометрии доказала свою эффективность в качестве дополнения к традиционным наблюдениям за смещениями инструментальными методами. Точность интерферометрического замера смещений была подтверждена наземными наблюдениями на промышленной площадке предприятия. При этом непосредственно в зоне интенсивных деформаций бортов карьера № 1, где наземные наблюдения не проводились, была получена новая информация о смещениях.

Полученные результаты позволяют рекомендовать технологию радиолокационной интерферометрии к внедрению на горнодобывающих предприятиях в качестве одного из методов наблюдений за смещениями и деформациями земной поверхности и сооружений.

#### RESUME

The results of determining earth surface displacement by the radar interferometry using data of the thirty surveys performed by the COSMO-SkyMed s/c cluster within the period from April till October 2012, are given. High efficiency, reliability and accuracy of the proposed technology for determining the displacement are marked together with the emphasize on the obtained confirmation by the ground-based observations.