

В. А. Горбунов (ОАО «Гайский ГОК»)

В 1991 г. окончил Московский горный институт (МГИ) 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. После окончания университета работал 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.

Результаты космического радарного мониторинга деформаций бортов и уступов карьеров ОАО «Гайский ГОК» и смещений земной поверхности и сооружений на промышленной площадке предприятия

ВВЕДЕНИЕ

Гайское медно-колчеданное месторождение расположено в восточной части Оренбургской области на территории Гайского района. Месторождение залегает в степной части Южного Урала, расчлененной широкими долинами, оврагами, и приурочено к водоразделу правобережных притоков реки Урал — Елшанки и Колпачки. Река Урал протекает в 18 км к востоку от месторождения. Здесь сосредоточено 76% запасов меди Оренбуржья. Гайская руда кроме меди, содержит в своем составе в промышленных концентрациях цинк, серу, золото, серебро, а также редкие и рассеянные элементы: кадмий, селен, теллур, галлий, висмут. Месторождение разрабатывалось как открытым, так и подземным способами (на сегодняшний день добыча ведётся только подземным способом). Система подземной разработки — этажно-камерная с складной выработанным пространством твердеющими смесями.

В настоящей статье приводятся результаты выполнения проекта по космическому радарному мониторингу деформаций бортов и уступов карьеров ОАО «Гайский ГОК» и смещений земной поверхности и сооружений на промышленной площадке предприятия.

Среди основных объектов ОАО «Гайский ГОК», смещения и деформации которых необходимо было зарегистрировать по результатам радарных

съемок, можно выделить следующие:

- ✦ борты и уступы карьеров № 1, 2 и 3;
- ✦ отвалы горных пород;
- ✦ районы подземной добычи горных пород;
- ✦ территории внутренних отвалов;
- ✦ гидротехнические сооружения хвостохранилищ;
- ✦ здания и сооружения промышленной площадки предприятия.

Среди объектов прилегающих территорий, подлежащих мониторингу, отметим железную дорогу, Гайский завод по обработке цветных металлов и сам город Гай.

Входными данными для мониторинга служили 30 радарных снимков территории ОАО «Гайский ГОК» и прилегающих территорий, сделанных в период с апреля по октябрь 2012 г. со спутниковой радарной группировки COSMO-SkyMed-1-4 (e-GEOS, Италия).

Интерферометрическая обработка радарных космоснимков с целью выявления смещений земной поверхности и сооружений выполнялась в программных комплексах SARscape (Exelis VIS, США — Франция) и PSP-IFSAR (e-GEOS, Италия).

Визуализация результатов выполнялась с использованием программных комплексов ENVI (Exelis VIS, США) и ArcGIS (Esri, США).

Интерферометрическая обработка данных многопроходных космических радарных съемок выполнялась 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 (на первой итерации обработки) и затем уточненная по итогам первой итерации обработки интерферометрическая ЦМР.

На выходе заказчику была поставлена информация о смещениях земной поверхности по состоянию на каждую из 30 дат съемок относительно даты первой съемки в виде:

- * растровых файлов (в пикселе – значения смещений в миллиметрах, положительные значения соответствуют поднятиям, отрицательные – оседаниям);
- * векторных файлов изолиний смещений, проведенных через каждые 10 мм;
- * векторных файлов точек – постоянных рассеивателей радарного сигнала (в атрибутах каждой точки записана информация о смещениях в миллиметрах по состоянию на каждую дату съемки, среднегодовая скорость смещений в мм/год и абсолютная высота каждой точки над эллипсоидом WGS-84).

ИСХОДНЫЕ РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ COSMO-SKYMED

Поскольку спутниковый радар выполняет съемку бокового обзора, то при использовании лишь одной интерферометрической серии снимков более точный результат получается по одной половине карьеров, отвалов или по одной из сторон сооружений. Поскольку основными объектами



Рис. 1. Схема покрытия территории ОАО «Гайский ГОК» (контур голубого цвета) данными съемок COSMO-SkyMed (зеленый контур). Обработка производилась только на территорию ОАО «Гайский ГОК» (контур голубого цвета). В качестве фоновой подложки — оптический снимок Google Earth.

мониторинга являлись карьеры и поскольку, по согласованию с ОАО «Гайский ГОК», было выяснено, что наиболее интересен мониторинг северо-западной части карьеров, то для мониторинга деформаций бортов и уступов карьеров ОАО «Гайский ГОК», а также всех остальных объектов, попадающих в выбранную заказчиком территорию 10х10 км, была выбрана 30-проходная серия радарных съемок COSMO-SkyMed на восходящем витке орбиты.

На рис. 1 показана схема покрытия территории ОАО «Гайский ГОК» данными специально запланированных интерферометрических съемок с радарных спутников COSMO-SkyMed (всего 30 повторных съемок с апреля по октябрь 2012 г.). В табл. 1 приведены даты съемок с данной спутниковой группировки.

№ п/п	ГГ-ММ-ДД
1	2012-04-09
2	2012-04-13
3	2012-04-25
4	2012-04-29
5	2012-05-03
6	2012-05-15
7	2012-05-19
8	2012-05-27
9	2012-05-31
10	2012-06-12
11	2012-06-16
12	2012-06-28
13	2012-07-14
14	2012-07-15
15	2012-07-18
16	2012-07-22
17	2012-07-30
18	2012-08-03
19	2012-08-07
20	2012-08-16
21	2012-08-19
22	2012-08-23
23	2012-08-31
24	2012-09-04
25	2012-09-16
26	2012-09-17
27	2012-09-20
28	2012-09-24
29	2012-10-02
30	2012-10-03

Таблица 1. Даты съемок со спутников COSMO-SkyMed

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Среди всех технологий интерферометрической обработки радарных снимков наиболее точный замер смещений (с субсантиметровой точностью) достигается по данным интерферометрии постоянных рассеивателей радарного сигнала, позволяющей на первом этапе интерферометрической обработки выявить так называемые постоянные рассеиватели (отражатели) радарного сигнала, т. е. наиболее стабильно отражающие радарный сигнал точки или «реперные» точки для спутникового радара. После этого только по этим точкам производится расчет смещений и деформаций.

Данный подход позволяет добиться субсантиметровых точностей замера смещений для точек – постоянных отражателей радарного сигнала. На участке 10x10 км в процессе обработки радарных снимков было выявлено более 2 000 000 постоянных отражателей радарного сигнала. То есть средняя плотность точек с известными смещениями составила около 20 000 «реперных» для радара точек на кв. км (локальная плотность точек сильно варьируется в зависимости от типа территории, достигая максимума на застроенных территориях и минимума на сельскохозяйственных полях, в лесах и на воде).

На рис. 2 и 3 показаны постоянные рассеиватели, выявленные на карьерах №1 и 3 и на прилегающих территориях. На этих рисунках хорошо заметен участок деформаций бортов в западной части карьера №1 (точки красного цвета) с максимальной величиной оседаний в 25 см за период наблюдений. Этот очаг утягивает за собой сооружения и автодорогу к западу от карьера №1 (точки желтого и оранжевого цвета). Для некоторых типовых точек показаны графики динамики смещений во времени. Этот крупный очаг оседаний вызван добычей руды подземным способом из-под западного и северного бортов карьеров.

Точки синего цвета в районе карьера №3 характеризуются поднятиями, обусловленными наличием под ними внутреннего отвала горных пород (динамика смещений для одной из точек над внутренним отвалом показана на рис. 4). Очаг деформаций к северу от карьера №2 и динамика смещений в его центре показаны на рис. 4. На рис. 5 показаны три очага деформаций в юго-западной части карьера №2.

На рис. 6 приведен анализ стабильности гидротехнических сооружений хвостохранилища (установлено отсутствие их деформаций) и показано уплотнение пород-хвостов при их складировании.

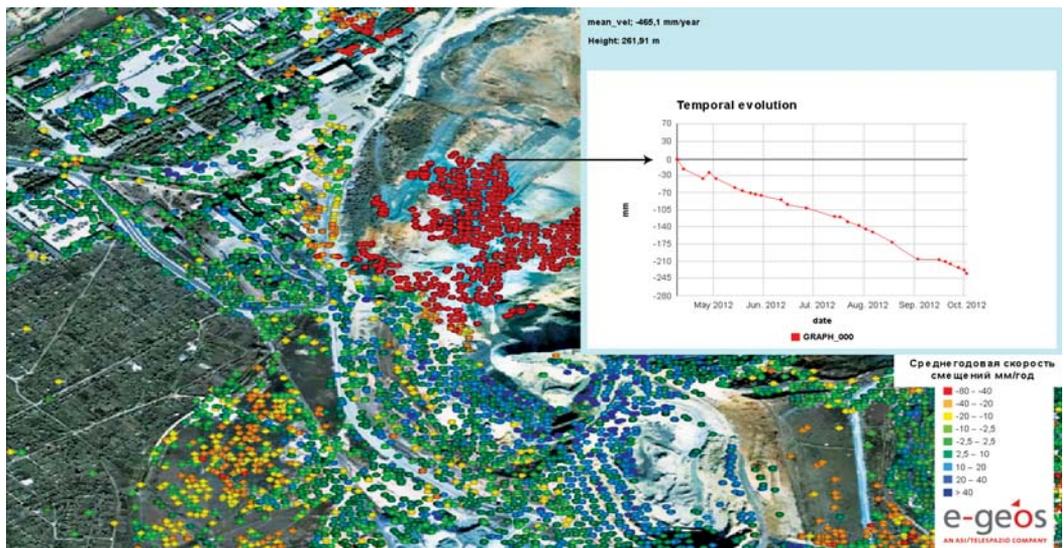


Рис. 2. Постоянные рассеиватели радарного сигнала, выявленные по методу интерферометрии постоянных рассеивателей на бортах и уступах карьеров ОАО «Гайский ГОК». От желтого цвета к красному – возрастающие оседания, синий цвет – поднятия. В правом верхнем углу – динамика смещений для одной из наиболее интенсивно оседающих точек над районом подземной добычи (западный борт карьера №1). Точка оседает с апреля по октябрь примерно на 25 см. Фоновая подложка — оптический снимок из Google Earth

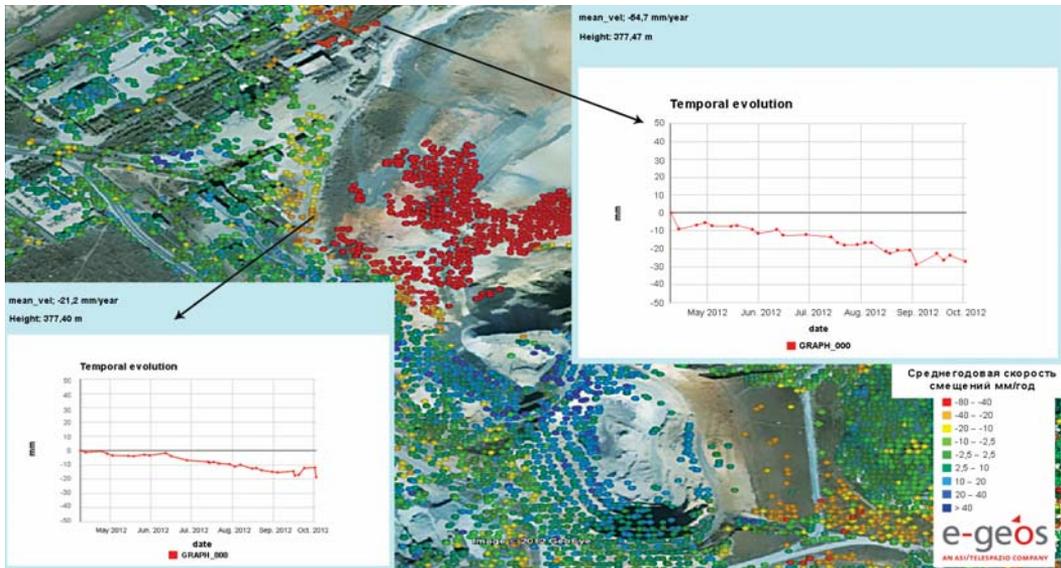


Рис. 3. Динамика смещений для одной из точек вдоль автодороги вблизи западного борта карьера №1 (оседания в 1 см) и для одной из точек, приуроченных к сооружениям промышленной площадки, к северо-западу от карьера №1 (оседания до 3 см). Фоновая подложка — оптический снимок из Google Earth

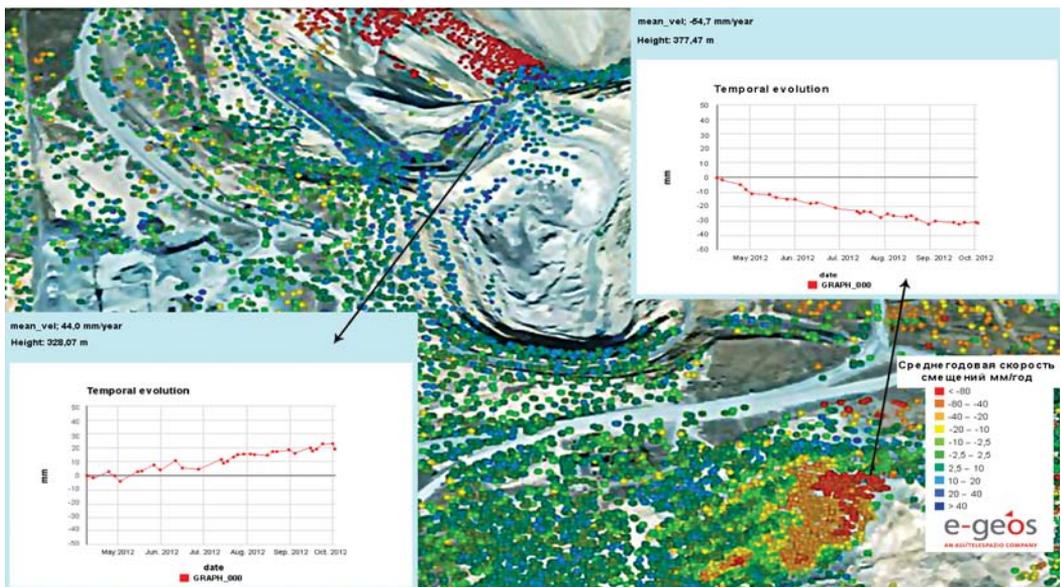


Рис. 4. Динамика смещений для одной из точек в северной части карьера № 3 (поднятия в 2 см над внутренним отвалом горных пород) и для одной из точек в центре локального очага деформаций в северной части карьера № 2 (оседания более 3 см). Фоновая подложка — оптический снимок из Google Earth

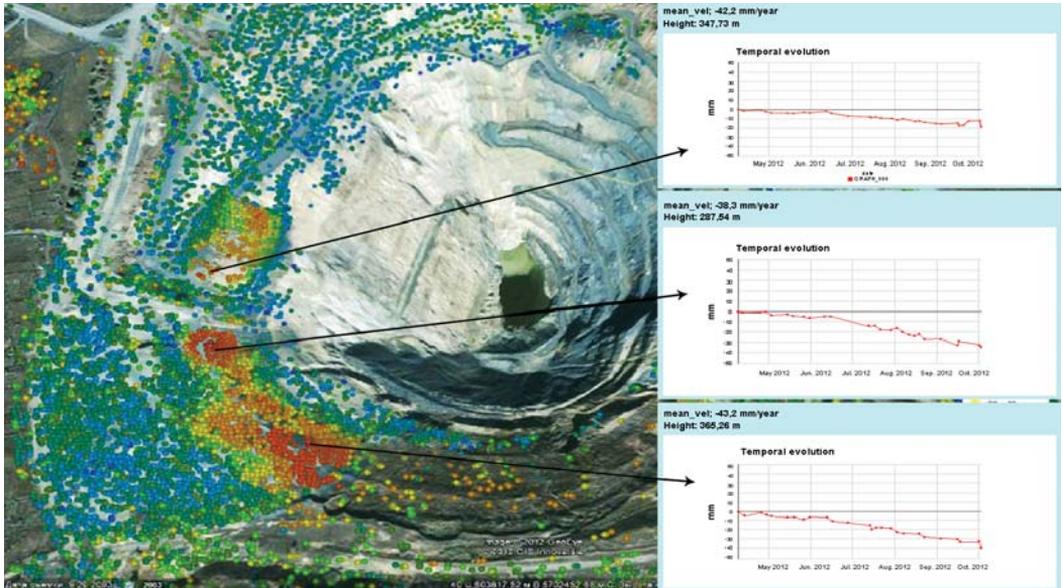


Рис. 5. Динамика смещений за апрель–октябрь 2012 г. для точек в центрах очагов деформаций в юго-западной части карьера № 2 (северный и южный очаги характеризуются линейными оседаниями в 2 и 4 см соответственно, а очаг между ними — ускоряющимися оседаниями до 4 см). Фоновая подложка — оптический снимок из Google Earth

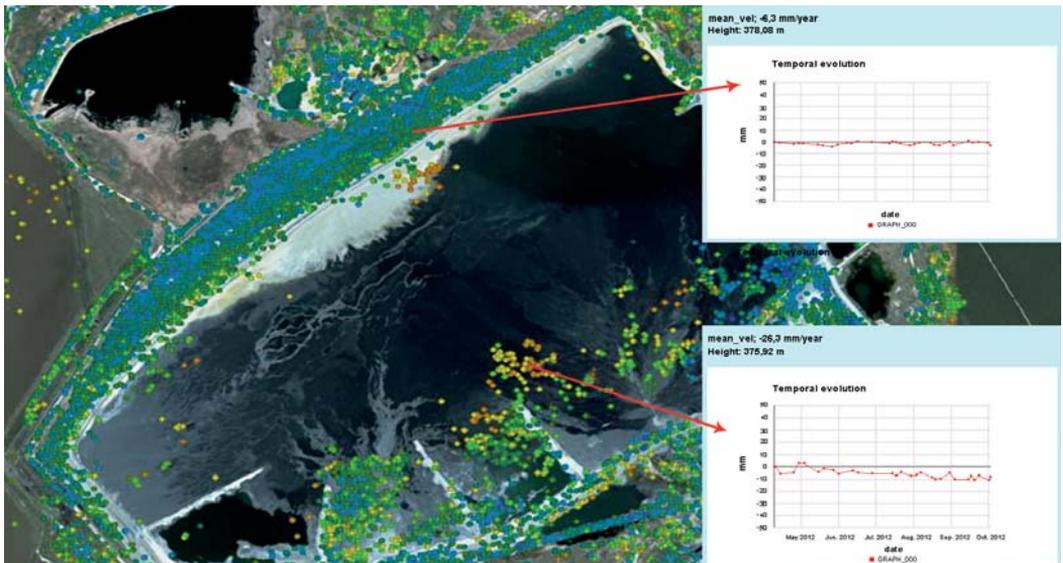


Рис. 6. Хвостохранилище. Тренд смещений гидротехнических сооружений хвостохранилища близок к нулю (приведена динамика для одной типовой точки). Хвосты на некоторых участках уплотняются (точки желтого и оранжевого цвета). Приведена динамика одной из точек, оседающих со скоростью до 1 см за апрель — октябрь 2012 г. Фоновая подложка — оптический снимок из Google Earth

Пример отображения постоянных рассеивателей, приуроченных к зданиям в городе Гай, приведен на рис. 7. Детальный анализ выявленных рассеивателей показывает, что практически на каждом пролете многоквартирных домов (на их стороне, обращенной навстречу лучу радара, т. е. на юго-запад) «отбиваются» многочисленные рассеиватели. Выявлены 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 простираения. Возможно, оседания вызваны геологическим разломом или подземным линейным объектом.



Рис. 7. Трехмерное отображение постоянных рассеивателей, выявленных между улицами Ленина и Молодежной города Гая, показывающее, что многочисленными рассеивателями покрыт практически каждый пролет многоквартирных жилых домов. Фоновая подложка — оптический снимок из Google Earth

Трехмерное отображение постоянных рассеивателей в районе западного борта карьера №1 (в том числе покрытие рассеивателями копра шахты «Скиповая» и башенного копра шахты «Эксплуатационная») приведено на рис. 8.

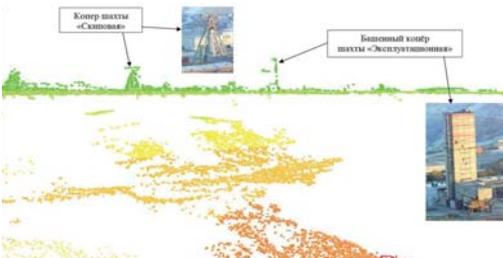


Рис. 8. Трехмерное отображение постоянных рассеивателей, вид со стороны карьера №1 на копер шахты «Скиповая» и на башенный копер шахты «Эксплуатационная». Рассеиватели раскрашены по высоте: от красного цвета к зеленому — возрастание высоты

Как видно из рис. 2 и 3, на северном борту карьера №1 постоянных рассеивателей радарного сигнала не выявлено. Это связано как с геометрией съемки бокового обзора, так и с интенсивными деформациями, происходящими там (сильно оседающие точки не являются высококогерентными). Поэтому для получения информации о смещениях на северном борту карьера №1 дополнительно была выполнена обработка по менее требовательному к когерентности (но чуть менее точному) методу интерферометрии SBAs. Сопоставление результатов PSP и SBAs показано на рис. 9.

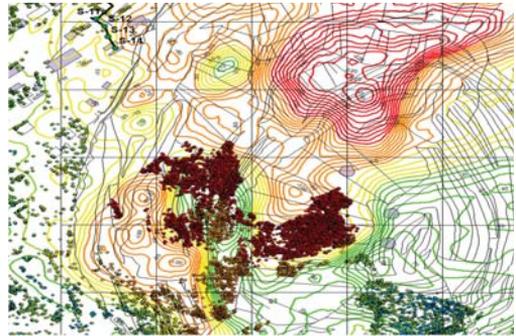


Рис. 9. Сопоставление результатов обработки снимков COSMO-SkyMed по методам PSP (точки — постоянные рассеиватели) и SBAs (изолинии смещений). Изолинии проведены через каждые 10 мм. Результаты PSP и SBAs пространственно дополняют друг друга

ОСНОВНЫЕ ПРОДУКТЫ, ПОСТАВЛЕННЫЕ В ОАО «ГАЙСКИЙ ГОК»

1. Карта смещений земной поверхности за период с апреля по октябрь 2012 г., рассчитанная по методу интерферометрии SBAs (сантиметровой точности, дает более пространственно полные результаты по участкам наиболее интенсивных оседаний в районе карьера №1, но менее точные результаты по относительно стабильным участкам, а также ложные смещения на лес и на воду). Данная карта поставлена в виде растрового файла в цветовом кодировании и растрового файла с реальными значениями смещений в миллиметрах. Отрицательные значения соответствуют оседаниям, положительные — поднятиям.

2. Изолинии смещений (через каждые 10 мм), произошедших за период с апреля по октябрь 2012 г., в формате ESRI Shapefile. В атрибутах каждой изолинии — смещения в миллиметрах.

Отрицательные значения соответствуют оседаниям, положительные — поднятиям.

3. Основной результат — точечный векторный файл постоянных рассеивателей радарного сигнала в формате *shp. В атрибутах к каждой точке смещения на каждую дату съемки в миллиметрах, среднегодовая скорость смещений в мм/год и высота точки над эллипсоидом WGS-84.

4. Дополнительно — точечный векторный файл постоянных рассеивателей в формате *kmz для свободно распространяемой программы Google Earth, позволяющий трехмерно визуализировать постоянные рассеиватели на фоновой подложке из архивных оптических снимков. При выборе мышкой конкретного рассеивателя всплывает график динамики его смещений.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ КАРТ СМЕЩЕНИЙ

1. Выявлен крупный очаг интенсивных оседаний земной поверхности в западной и северной частях карьера №1 (скорость оседаний – до 50 см в год).

2. Вышеуказанный очаг интенсивных оседаний «утягивает» за собой дорогу к западу от карьера №1 и промышленные сооружения к северо-западу от карьера №1.

3. Выявлены поднятия земной поверхности над внутренним отвалом в районе карьера №3.

4. Выявлены три очага деформаций бортов карьера №2 (в юго-западной, западной и северной его частях).

5. Установлена стабильность и в основном отсутствие деформаций гидротехнических сооружений хвостохранилища.

6. Закартировано уплотнение пород-хвостов в хвостохранилище, проявляющееся в оседании поверхности складываемых пород-хвостов.

7. Установлено наличие нескольких оседающих и, возможно, деформирующихся сооружений (в том числе отдельные пролеты жилых многоквартирных домов) в городе Гай, выровненные вдоль прямой линии северного простираения, что может свидетельствовать о возможном наличии геологического разлома либо линейного подземного объекта, вызывающего смещения.

Плотность точек — постоянных рассеивателей радарного сигнала составила в среднем около 20 000 точек на кв. км. Однако реально рассеиватели распространены неравномерно: есть участки с гораздо большей плотностью рассеивателей (отвалы, город Гай, ГТС хво-

стохранилища), а есть участки вообще без рассеивателей (водная поверхность, лес, восточная и северо-восточная части карьеров, подверженные эффекту переналожения). Всего на участке 10x10 км выявлено чуть более 2 000 000 постоянных рассеивателей.

В целом по результатам работ можно сделать следующие выводы:

- ✦ несмотря на пространственную неравномерность размещения постоянных рассеивателей радарного сигнала на территории ОАО «Гайский ГОК» и прилегающих территориях, плотность рассеивателей (2 млн точек на 100 кв. км) достаточно велика и превышает любую возможную плотность геодезических реперов для наземных наблюдений;

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

- ✦ недостаточное количество точек в очагах наиболее интенсивных оседаний компенсируется дополнительным – чуть менее точным, но более пространственно выдержанным – площадным результатом, получаемым по методу интерферометрии SBAs;

- ✦ восточные части карьеров при съемке только лишь 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 годовой стоимости проекта в два раза.

Технология радарной интерферометрии доказала свою эффективность в качестве дополнения к традиционным инструментальным наблюдениям за смещениями. Точность интерферометрического замера смещений была подтверждена наземными наблюдениями на промышленной площадке предприятия. При этом непосредственно в зоне интенсивных деформаций бортов карьера №1, где наземных наблюдений не проводилось, была получена новая информация о смещениях и деформациях. Полученные результаты позволяют рекомендовать технологию радарной интерферометрии к внедрению на горнодобывающих предприятиях в качестве одного из методов наблюдений за смещениями и деформациями земной поверхности и сооружений.