

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА БАЗЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ



Александр Сальман

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР
ООО «ЭС-ПАС»

Стремительное развитие космических систем способствует интенсивному проникновению новых технологий дистанционного мониторинга во многие области человеческой деятельности. Не является исключением и такое направление технических работ, как геодезия и маркшейдерское дело.

Обеспечение безопасности гражданского и промышленного строительства, контроль технического состояния зданий и сооружений, мониторинг процессов эксплуатации объектов горной и нефтегазовой промышленности представляют собой комплексные инженерные задачи, связанные с необходимостью регулярного выполнения сложных высокоточных измерений на местности. Реализация таких работ с использованием наземных технических средств связана со значительными затратами людских, вре-

менных и финансовых ресурсов. Оптимизировать контроль крупных объектов и значительно повысить экономическую эффективность такого мониторинга позволяют дистанционные методы наблюдения за земной поверхностью.

В настоящее время во всем мире все активнее используется технология радарной интерферометрии, позволяющая с миллиметровой точностью оценивать деформации земной поверхности и смещения объектов инфраструктуры без установки на местности какого-либо измерительного оборудования. В качестве исходных данных для выполнения таких работ используются радиолокационные спутниковые изображения. Технология радарной интерферометрии обладает рядом важных преимуществ:

- измерения деформаций земной поверхности выполняются

на базе радиолокационной спутниковой съемки, которая может быть выполнена при любой освещенности местности и при любых погодных условиях;

- технология позволяет как организовывать мониторинг текущего состояния исследуемой зоны на базе актуальных изображений, так и выполнять исторические ретроспективные исследования с использованием архивных спутниковых данных;
- измерения выполняются без установки и последующего обслуживания наземного измерительного оборудования;
- радарная интерферометрия позволяет выполнять измерения скорости развития деформаций с точностью до 1 мм в год, что сопоставимо с традиционными наземными методами;
- технология используется для исследования обширных территорий, каждое спутниковое изображение охватывает участок местности площадью в тысячи квадратных километров;
- используемые радиолокационные данные имеют высокое пространственное разрешение, что позволяет выполнять до нескольких тысяч измерений на каждом квадратном километре;
- интенсивность интерферометрического мониторинга может варьироваться от нескольких измерений в год до нескольких измерений в неделю в зависимости от потребностей заказчика и характера деформаций исследуемой местности.

Радарная интерферометрия применяется для решения следующих задач:

- анализ состояния важных объектов инфраструктуры (городских территорий, туннелей, железных дорог, автомагистралей, мостов,

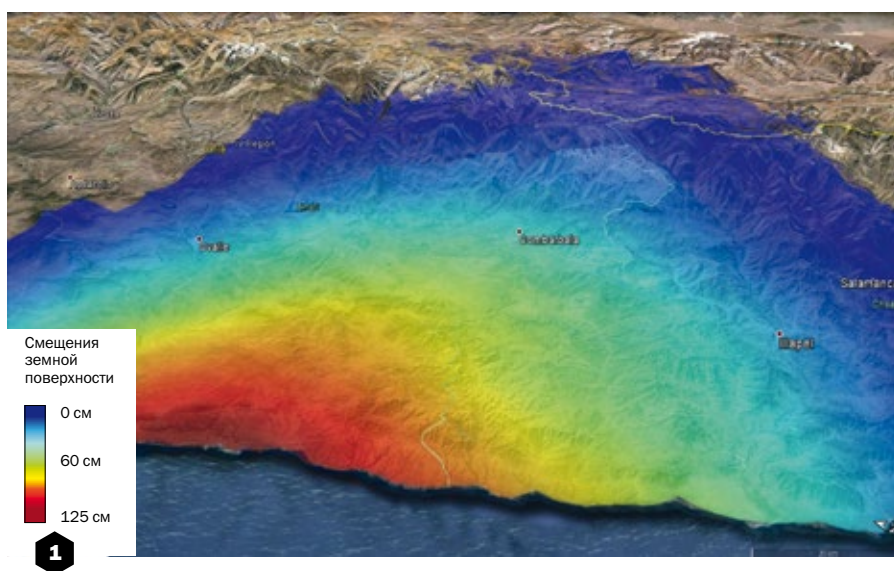
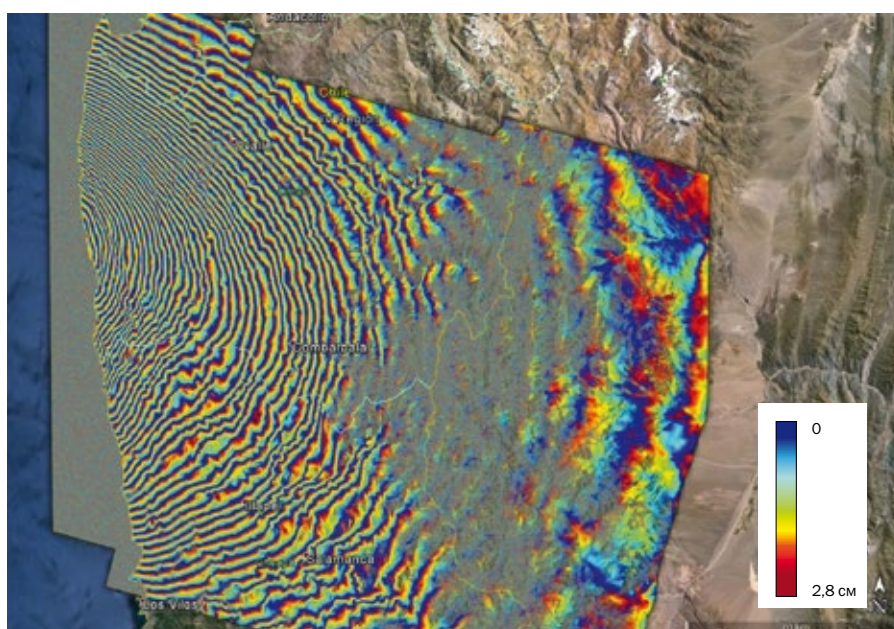


Рис. 1. Результаты анализа последствий землетрясения, произошедшего 16 сентября 2015 г. в Чили, полученные путем сопоставления изображений спутниковой системы Sentinel-1 от 24 августа и от 17 сентября 2015 г.: дифференциальная интерферограмма и карта смещений земной поверхности

гидротехнических и портовых сооружений);

- мониторинг нефтегазовых объектов (месторождений, подземных хранилищ газа, трубопроводов, терминалов сжиженного природного газа, нефтяных платформ на морском шельфе);
- обеспечение безопасности эксплуатации объектов горнодобывающей промышленности (карьеров, шахт, хвостохранилищ, промышленных сооружений);
- оценка последствий природных катастроф (землетрясений, извержений вулканов, наводнений).

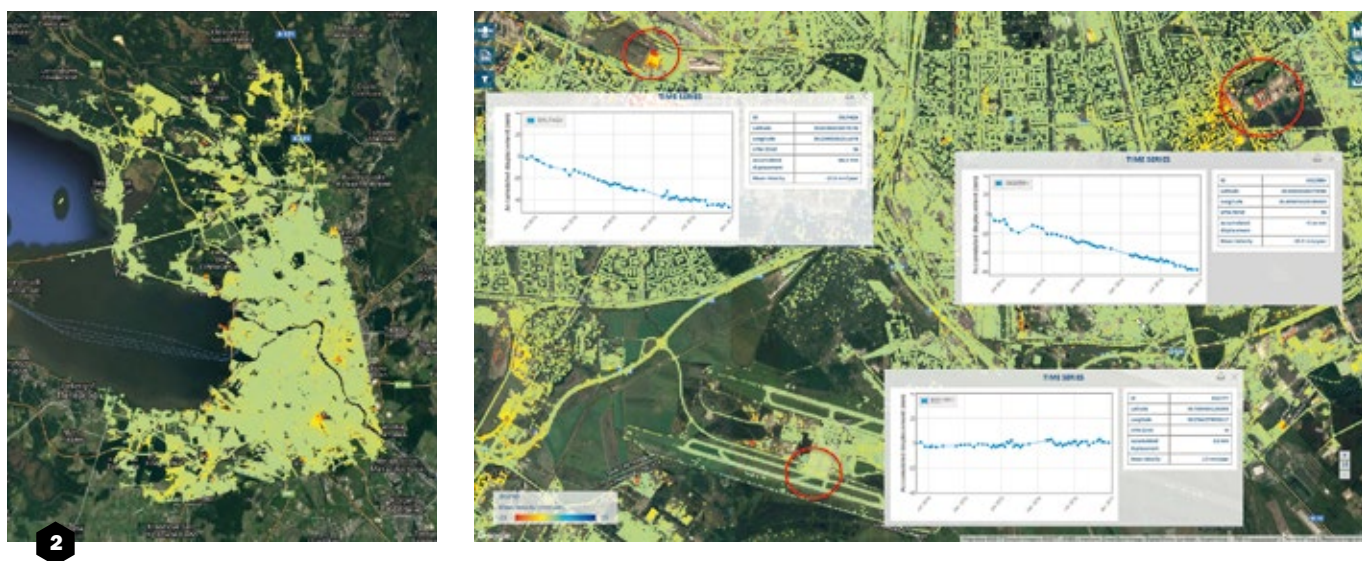


Рис. 2. Результаты исторического исследования г. Санкт-Петербурга за период с мая 2014 г. по декабрь 2016 г., реализованного с использованием технологии радарной интерферометрии на базе 56 изображений спутника TerraSAR-X: зеленым цветом показаны стабильные участки местности, желтым и красным цветом показаны оседания объектов инфраструктуры, голубой и синий цвет соответствуют подъему земной поверхности

Одним из признанных мировых лидеров в области выявления деформаций земной поверхности на базе радиолокационных спутниковых данных является компания TRE Altamira, отделения которой расположены в Милане, Барселоне и Ванкувере. Эта организация, входящая в международную группу компаний CLS, обладает целым рядом уникальных технологических приемов, позволяющих добиваться исключительно качественных результатов при выполнении проектов любой сложности. Все используемые компанией TRE Altamira алгоритмы разработаны собственными экспертами и постоянно модернизируются по мере решения все более сложных задач.

Специалисты компании, обладающие двадцатилетним опытом реализации самых разнообразных проектов, применяют в своей работе данные всех основных радиолокационных спутниковых систем, что позволяет использовать те или

иные исходные изображения в зависимости от потребностей заказчика, принимая во внимание пространственное разрешение, размеры и расположение кадров спутниковой съемки, частотный диапазон, интенсивность пролетов космических аппаратов над исследуемой зоной. Используемые радиолокационные изображения обрабатываются с применением целого ряда различных алгоритмов, предназначенных для решения как классических проблем радарной интерферометрии, так и смежных задач, что позволяет выявлять деформации земной поверхности всех типов: от медленных миллиметровых до быстрых метровых смещений.

Простейшим приемом, используемым для дистанционной оценки деформаций земной поверхности, является использование метода дифференциальной интерферометрии на базе изображений, формируемых спутниковыми радиолокаторами с синтезированной апертурой

(DInSAR). Путем сопоставления двух радиолокационных изображений, полученных в результате съемки одной и той же территории в разные моменты времени, формируется интерферограмма, представляющая собой отображение фазовых различий между сопоставляемыми изображениями. Изменения фазы могут быть вызваны деформациями земной поверхности, произошедшими за период между двумя спутниковыми съемками, а также топографическими особенностями местности, атмосферными декоррелирующими шумами и прочими явлениями. В том случае, если декоррелирующие шумы невелики, а изменения фазы, связанные с топографическими факторами, могут быть учтены с помощью точной цифровой модели рельефа, на базе интерферограммы удастся сформировать карту смещений земной поверхности, которые произошли за период между двумя спутниковыми съемками (рис. 1). Такая карта демонстрирует

смещения вдоль направления съемки. Точность измерений, обеспечиваемых с помощью дифференциальной интерферометрии, составляет около 1 см.

В том случае, если необходимо обеспечить более точное выявление медленных миллиметровых деформаций, используется мультиинтерферограммная технология (InSAR), основанная на использовании устойчивых отражателей — объектов на местности, хорошо отражающих радиолокационный сигнал и характеризующихся слабым изменением когерентности на протяжении всего периода исследования. Компания TRE Altamira реализует такие проекты на базе комплекса алгоритмов SqueeSAR™, обеспечивающего высокоточные измерения деформаций земной поверхности путем совместной обработки не менее 15 радиолокационных изображений исследуемой территории, полученных в различные моменты времени в одном режиме спутниковой съемки с одного и того же орбитального витка.

Выполняя статистический анализ всего набора изображений, алгоритмы SqueeSAR™ выделяют на земной поверхности пункты измерения, характеризующиеся стабильной амплитудой и когерентной фазой отраженного сигнала. При этом различают пункты измерения трех разных типов:

- устойчивые отражатели: точечные объекты, характеризующиеся стабильно высоким уровнем отражаемого радиолокационного сигнала (здания, сооружения, скальные породы и т. д.);
- распределенные отражатели: участки земной поверхности, характеризующиеся менее интенсивным, но однородным отражением радиолокационного сигнала (необработанные участки земли, пустынные территории и т. д.);

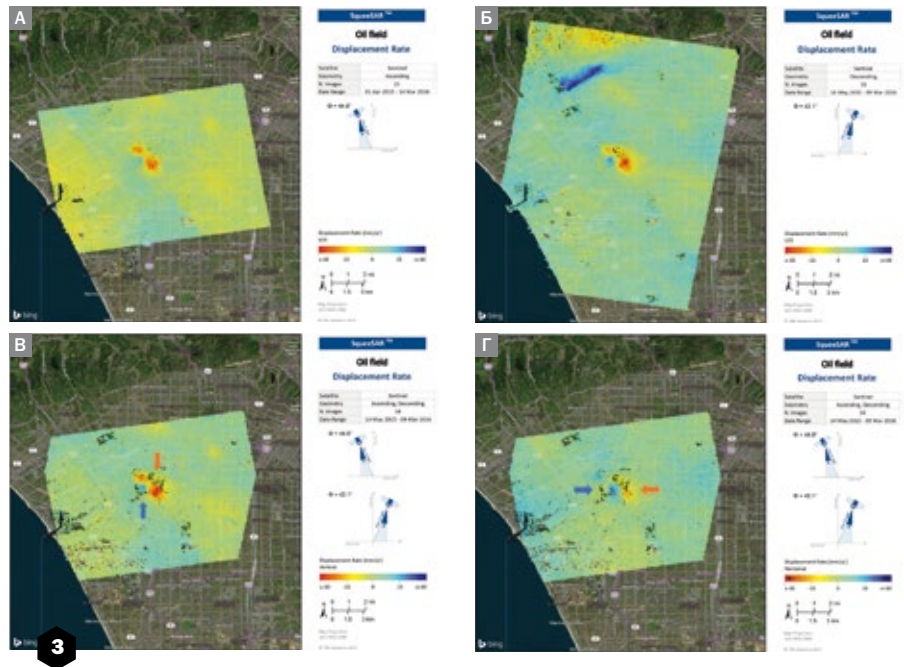


Рис. 3. Результаты мониторинга нефтяного месторождения в США на базе 21 изображения с восходящего витка и 16 изображений с нисходящего витка спутниковой системы Sentinel-1, полученных в период с апреля 2015 г. по март 2016 г.: а) результаты интерферометрического исследования на базе данных с восходящего витка, б) результаты интерферометрического исследования на базе данных с нисходящего витка, в) карта вертикальных смещений; г) карта горизонтальных смещений в направлении «восток — запад»

- временные когерентные отражатели: пункты измерения, в которых радиолокационный сигнал устойчиво отражается только на части используемого набора исходных изображений (например, зоны со значительной сезонной изменчивостью когерентности из-за появления снежного покрова или растительности).

В результате комбинации пунктов измерения различных типов удастся добиться высокой плотности интерферометрических измерений даже при неблагоприятных особенностях исследуемого полигона. При этом точность интерферометрических измерений скорости смещений может достигать 1 мм в год.

Однако в рамках некоторых проектов все же не удастся обеспечить необходимый уровень плотности

интерферометрических измерений. Это может быть связано с выполнением строительных работ на исследуемой территории, с наличием густой растительности, со слишком длительным зимним периодом. В этом случае приходится прибегать к установке искусственных уголкового отражателей, гарантирующих регулярное выполнение высокоточных измерений в любое время года и при любых окружающих условиях. С использованием искусственных отражателей удастся обеспечить измерение скорости медленных деформационных процессов с точностью до 0,5 мм в год.

В результате интерферометрической обработки исходного набора радиолокационных изображений формируется карта исследуемой территории, состоящая из сотен ты-

сяч пунктов измерения, в каждом из которых определяется как средняя скорость, так и весь временной ряд смещений этого пункта в течение всего периода спутниковой съемки (рис. 2).

При этом следует особо отметить, что описанные выше методы позволяют определять величины смещений земной поверхности вдоль направления спутниковой съемки, отличающегося от вертикали. То есть выполняются измерения проекции реального смещения на линию визирования спутникового радиолокатора.

Однако радиолокационная съемка может быть произведена как с восходящего витка траектории спутника (при пролете над исследуемой территорией приблизительно с юга на север), так и с нисходящего витка (при пролете приблизительно с севера на юг). Выполнив в один и тот же период времени съемку с обоих витков, удастся определить смещения земной поверхности вдоль двух различных направлений. Последующее комбинирование этих результатов позволяет оценить вертикальные смещения, а также горизонтальные смещения в направлении «восток — запад», то есть выполнить двумерный анализ деформаций исследуемой территории (рис. 3). Расчеты горизонтальных смещений в направлении «север — юг» при этом не производятся, так как это направление примерно соответствует траектории полета спутника и чувствительность технологии к возможным смещениям земной поверхности вдоль линии «север — юг» оказывается недостаточной для получения качественных результатов.

Представленная выше технология радарной интерферометрии базируется на сопоставлении фазовых параметров радиолокационных изо-

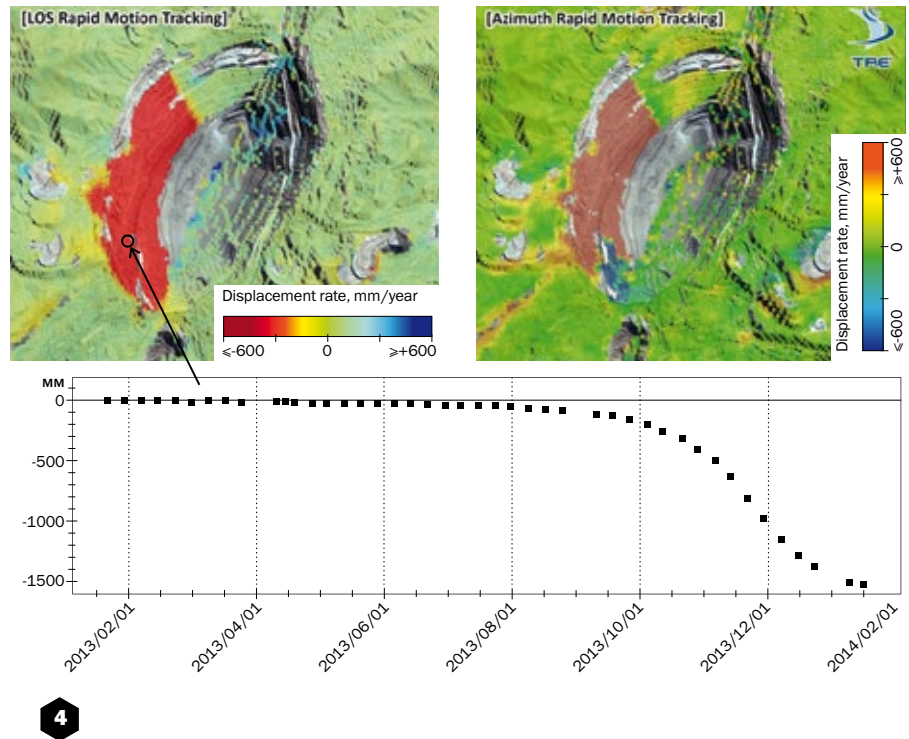


Рис. 4. Результаты выявления быстрых деформаций при мониторинге медного рудника в Чили в течение временного периода с января 2013 г. по январь 2014 г. на базе данных спутниковой системы COSMO-SkyMed: продемонстрированы смещения вдоль направления спутниковой съемки, смещения вдоль направления полета спутника (примерно соответствует направлению «север — юг») и временной ряд смещений одного из пунктов измерения вдоль направления съемки

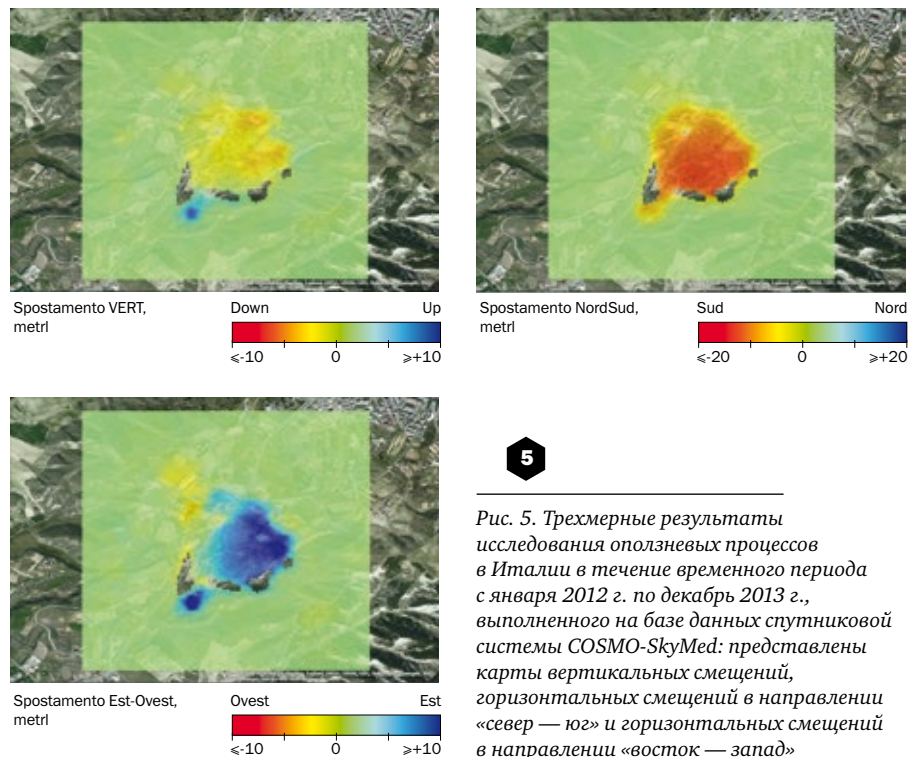
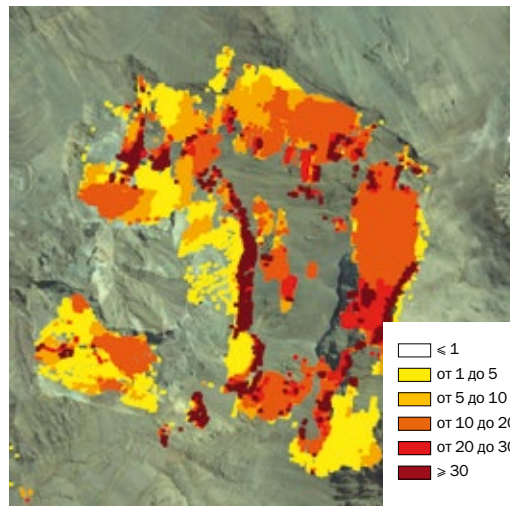
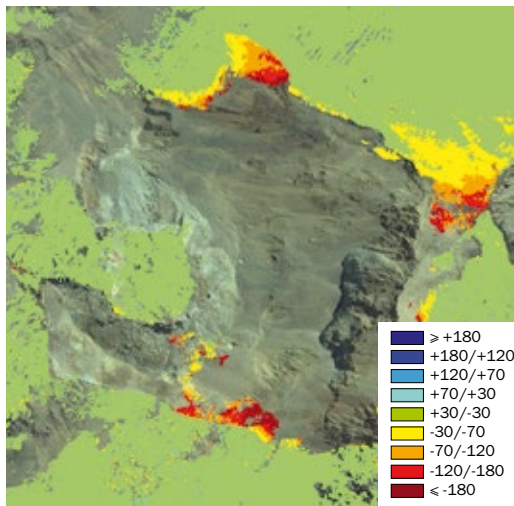


Рис. 5. Трехмерные результаты исследования оползневых процессов в Италии в течение временного периода с января 2012 г. по декабрь 2013 г., выполненного на базе данных спутниковой системы COSMO-SkyMed: представлены карты вертикальных смещений, горизонтальных смещений в направлении «север — юг» и горизонтальных смещений в направлении «восток — запад»



6

Рис. 6. Результаты мониторинга подземного рудника в Чили в течение шести летних месяцев с выявлением всех типов деформаций на базе данных спутниковой системы COSMO-SkyMed: показаны медленные миллиметровые смещения (слева) и быстрые метровые смещения (справа)

бражений, что позволяет оценивать медленные миллиметровые деформации. Для выявления более интенсивных процессов используется альтернативная технология отслеживания быстрых смещений (Rapid Motion Tracking или RMT). При этом на основе амплитудной спутниковой информации с помощью алгоритма перекрестной корреляции удается выявить на различных радиолокаци-

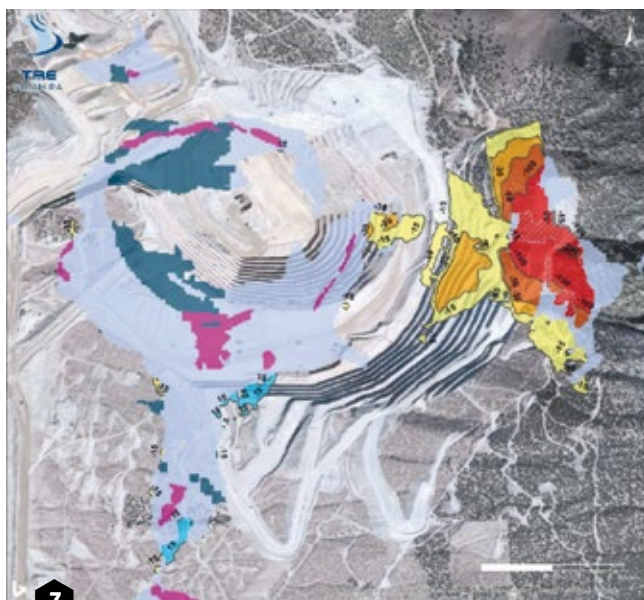
онных изображениях одни и те же характерные участки местности и проследить смещения этих участков на протяжении всего периода спутниковой съемки. Площадь каждого такого фрагмента местности обычно соответствует 50 — 100 пикселям радиолокационного изображения.

В результате удастся измерить быстрые деформации земной поверхности, характеризующиеся

сантиметровыми, дециметровыми и метровыми смещениями. Точность измерений с помощью технологии RMT составляет около десяти сантиметров. При этом оцениваются смещения вдоль направления спутниковой съемки и вдоль направления полета спутника. То есть речь идет о двумерном мониторинге быстрых деформаций (рис. 4).

Съемка исследуемой территории в течение одного и того же периода как с восходящего, так и с нисходящего витков траектории позволит одновременно выполнить измерение быстрых смещений на базе двух наборов изображений. Последующее тригонометрическое комбинирование результатов этих работ дает возможность определить смещения вдоль вертикали, а также горизонтальные смещения в направлениях «север — юг» и «восток — запад». В итоге формируются карты быстрых деформаций исследуемой местности в трех направлениях (рис. 5).

Обладая всем набором описанных выше технологий, компания TRE Altamira реализует комплексные проекты, в рамках которых на исследуемой территории выявляются все типы деформаций (рис. 6).



7

Рис. 7. Пример карты карьера, сформированной в 2016 г. на базе данных спутника TerraSAR-X в рамках подготовки оперативного информационного бюллетеня

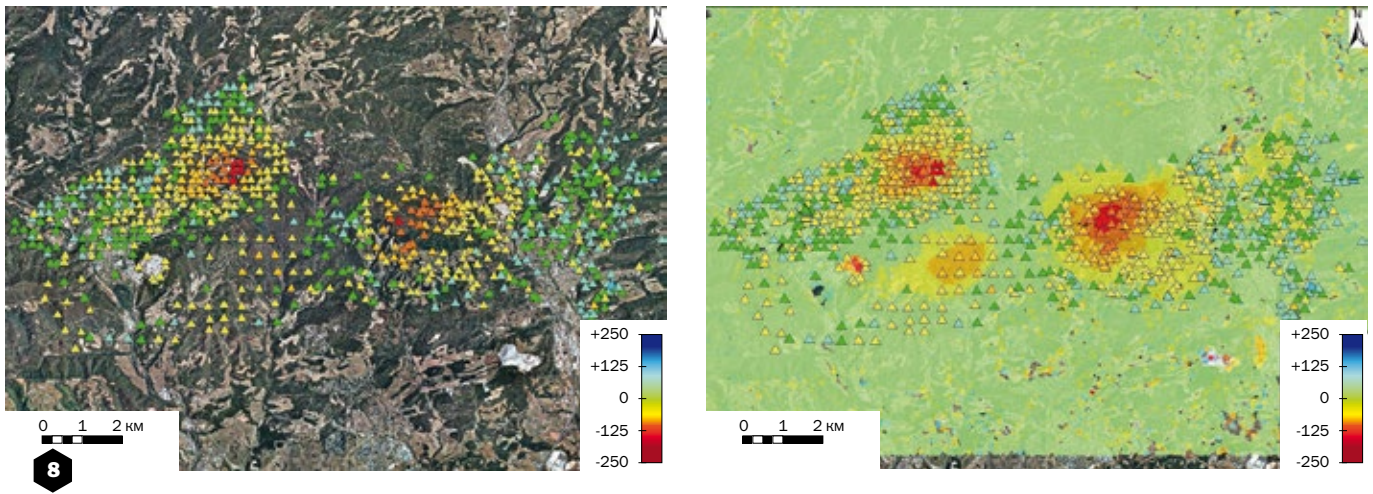


Рис. 8. Карты деформаций земной поверхности, охватывающие территорию подземного калийного рудника в Испании: карта, составленная по результатам измерений с помощью устройств системы GPS в период с 2008 по 2010 гг. (слева), и комбинированная карта, дополнительно демонстрирующая результаты интерферометрического исследования местности за тот же временной период, выполненного на базе радиолокационных изображений спутника TerraSAR-X (справа)

Это позволяет использовать дистанционный мониторинг местности для решения широкого круга задач без использования какого-либо наземного измерительного оборудования.

Наличие быстрых деформационных процессов наиболее характерно для территорий, используемых предприятиями горнодобывающей промышленности. Для таких заказчиков дополнительно формируются оперативные бюллетени. Этот информационный продукт предоставляется заказчику после каждой очередной спутниковой съемки и описывает изменения, произошедшие на местности в период между моментами получения двух последовательных радиолокационных изображений.

Информационный бюллетень формируется путем обработки спутниковых данных в оперативном режиме. Предоставляемая информация заметно уступает по точности традиционным интерферометрическим результатам, рассчитываемым с помощью алгоритмов SqueeSAR™, но она позволяет заказчику быстро получить сведения об опасных про-

цессах, протекающих на интересующей его территории.

Бюллетень содержит информацию о смещениях вдоль направления спутниковой съемки, о градиентах деформаций, а также об участках местности, на которых произошли значительные изменения, характеризующиеся резкими вариациями отражательной способности земной поверхности (рис. 7). Эти данные сопровождаются кратким словесным описанием наиболее важных результатов выполненных работ.

Таким образом, описанные выше методы обработки радиолокационных спутниковых изображений позволяют выполнять исследования на всех этапах разработки, строительства и эксплуатации крупных инженерных сооружений:

- выявлять деформации земной поверхности с целью выбора оптимальных участков для строительства крупных объектов инфраструктуры;
- оценивать влияние строительных работ на окружающие территории и соседние сооружения;

- обеспечивать постоянный мониторинг крупных объектов инфраструктуры и окружающей их местности на протяжении всего периода их эксплуатации.

При этом следует отметить, что использование результатов спутникового мониторинга не заменяет традиционные методы наземных геодезических измерений, а является дополнительной возможностью наблюдения за деформациями земной поверхности. Особый интерес вызывает комбинирование спутниковых и наземных измерений, при котором интерферометрические результаты позволяют оптимизировать расстановку традиционных измерительных средств, сократив их общее количество и снизив затраты на их эксплуатацию. В свою очередь, наземные измерения позволяют проверить и откалибровать результаты интерферометрических исследований (рис. 8).

С вводом в эксплуатацию все новых радиолокационных спутниковых систем и благодаря дальнейшему совершенствованию алгоритмов

обработки данных компаниям, специализирующимся на интерферометрических исследованиях, удастся добиваться все более качественных результатов и все большей экономической эффективности дистанционного мониторинга деформаций земной поверхности и смещений объектов инфраструктуры. Особый эффект достигается при использовании этих технологий в странах с хорошо развитой промышленной инфраструктурой, эксплуатируемой на удаленных и труднодоступных территориях в сложных климатических условиях. Россия в полной мере относится к таким странам, а значит, полномасштабное внедрение методов дистанционного мониторинга в повседневную деятельность российских организаций имеет несомненные технические и экономические перспективы. ¶

