ВЗГЛЯД С ВЫСОТЫ: ОПЕРАТИВНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОСЕДАНИЙ*

В последние годы человечество все глубже понимает свою взаимосвязь с окружающей средой, что вынуждает государственные и частные организации наблюдать за изменениями окружающей среды и принимать меры для защиты нашего мира от неблагоприятных последствий деятельности человека. Одно из множества таких изменений, которые общественность считает жизненно важным отслеживать, — деформации (оседания, подъемы, смещения и провалы) земной поверхности.

Эти явления могут возникать, в том числе вследствие подземных изменений, вызванных деятельностью человека. Тщательное наблюдение за динамикой деформаций имеет решающее значение, прежде всего, для предупреждения аварийных ситуаций: ведь даже небольшие подземные изменения могут стать причиной масштабных и дорогостоящих наземных последствий.

Добывающие компании также постоянно осуществляют наблюдение за оседаниями, подъемом и смещениями земной поверхности. Например, в нефтегазодобывающей промышленности проседания могут возникать в районах добычи углеводородов, где нефтегазоносные поля склонны к провалам вследствие извлечения из-под земли минерального сырья.

Когда водоносные горизонты используются в качестве источников водоснабжения для целых округов и муниципалитетов, может произойти их обрушение, если количество извлекаемой воды превысит объем осадков, за счет которых восстанавливается уровень подземных вод. После разрушения горизонта восстановление его не всегда возможно, таким образом, будет потерян важный ресурс — источник воды.

Провалы в населенных пунктах могут быть обусловлены строительной нагрузкой (неравномерное оседание почвы под сооружением), в результате чего будут повреждены жизненно важные и дорогостоящие объекты инфраструктуры, такие как водопровод и канализация, линии электропередач, транспортные артерии. Компании, участвующие в прокладке дорожных туннелей, должны контролировать локальные последствия своей деятельности. Для подобных задач, как и для многих других, ценную информацию о состоянии земной поверхности можно получить посредством локального измерения деформаций земной поверхности.

Наблюдения за оседаниями

Хотя такая информация помогает предупредить аварию и, как следствие, многомиллионные убытки, ее получение также может быть затратным. Это — серьезная проблема, поскольку текущие экономические условия заставляют организации работать в условиях ограниченных финансовых ресурсов. В настоящее время мониторинг оседаний проводится с помощью периодических измерений, выполняемых традиционным или спутниковым методами нивелирования. Другие методики предусматривают использование записывающих устройств, непрерывно измеряющих вертикальные деформации грунта, — экстензонометров. Такие подходы довольно ограничены, поскольку это — точечные данные, и их слишком дорого применять на больших территориях, а полученные результаты будут нерепрезентативны и могут ввести в заблуждение.

Дистанционное зондирование, в котором используются технологии радарной интерферометрии, — наиболее привлекательный вариант для мониторинга оседаний. С одной стороны, данный метод требует минимального количества дорогостоящих полевых работ, если

* Статья написана Деррольдом В. Холькомбом (Derrold W. Holcomb), специалистом по обработке радарных данных компании Intergraph. Перевод и адаптация выполнены сотрудниками компании НАВГЕОКОМ — официального дистрибьютора Intergraph | ERDAS на территории России.

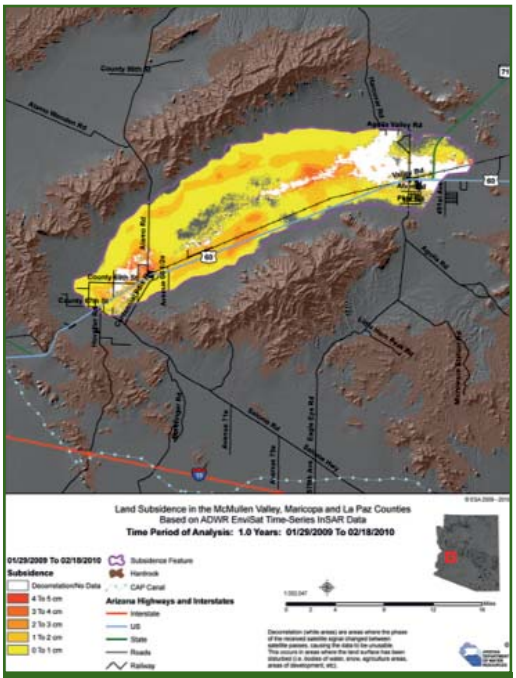

Рис. 1
Пробное применение радарной интерферометрии для исследования области оседаний в Аризоне

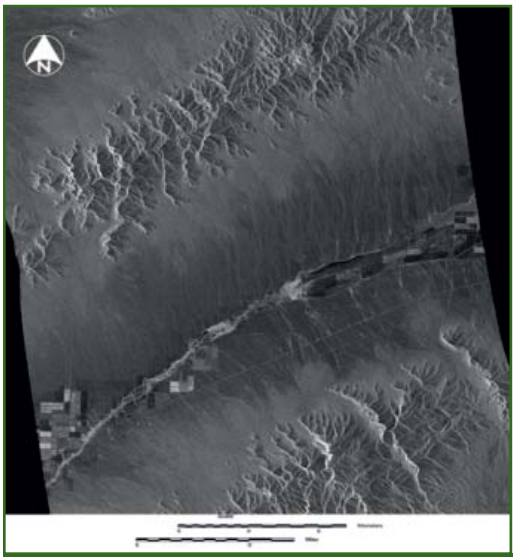

Рис. 2
Радарный снимок долины МакМуллен: показан пример геокодированных данных TerraSAR-X

в них вообще возникнет необходимость. С другой — и это главное преимущество — вместо нескольких одиночных, удаленных друг от друга участков метод позволяет получить плотный массив (например, через каждые несколько метров) геокодированных пикселей изменения высоты, на основе которых можно составить детальную карту смещений поверхности.

Для демонстрации возможностей данного метода оперативного мониторинга в штате Аризона (США) было проведено изучение оседаний на территории, расположенной над водоносным горизонтом (рис. 1). Этот район исследовался и картографировался в течение ряда лет Департаментом водного хозяйства штата, поэтому он хорошо известен.

Из-за засушливого климата в Аризоне произрастает минимальное количество растительности. Это — важное преимущество для радарной интерферометрии. Наличие густой растительности может вызвать декорреляцию, которая в свою очередь может поставить под угрозу или сделать невозможным точный анализ данных.

Технология DInSAR

В рамках данного исследования подробные карты смещений земной поверхности были получены с помощью технологии, называемой дифференциальной радарной интерферометрией (DInSAR). Говоря простым языком, радарный спутник получает два снимка интересующего района за два пролета над ним. Для каждого пикселя этих снимков обрабатывается фазовая информация радиолокационного сигнала, вычисляется разница фаз и создается так называемая интерферограмма.

В зависимости от различных факторов, таких как системные шумы и атмосферные изменения, эта разница может быть определена с точностью, равной четверти длины волны. Таким образом, для радара, работающего в X-диапазоне и имеющего длину волны 3 см, при оптимальных условиях возможно определение смещений величиной в 0,75 см. Пример такой интерферограммы приведен на рис. 4.

Снимки, использованные в этом пилотном проекте, были получены радиолокационным спутником TerraSAR-X (Германия) и предоставлены компанией Infoterra. Как следует из названия спутника, он использует радар с синтезированной апертурой, работающий в X-диапазоне. Радар может получить изображения с различным разрешением (размером пикселя), в зависимости от предполагаемой области применения и требуемой зоны покрытия.

В рамках данного проекта были проанализированы 20 сцен, полученных в маршрутном режиме с разрешением около 2 м. Размер сцены — 32x56 км. Один из снимков показан на рис. 2. Бортовое устройство определения местоположения и постобработка обеспечивают точность позиционирования спутника на орбите менее 0,5 м, что позволяет проводить точные измерения деформации поверхности и геопозиционирование.

Программное обеспечение, требуемое для столь точных вычислений, — сложное, комплексное — и ранее существовало, в основном, в университетах и специализированных научно-исследовательских организациях. Однако программное обеспечение, использованное для данного проекта, — модуль Radar Interferometry из IMAGINE Radar Mapping Suite — было разработано специально для компаний, которые нуждаются в картах смещений, но не обладают знаниями или возможностями для обработки радиолокационных данных.

Во многих случаях это полностью автоматический процесс: достаточно указать два снимка и подождать, пока будет проведен расчет и построена

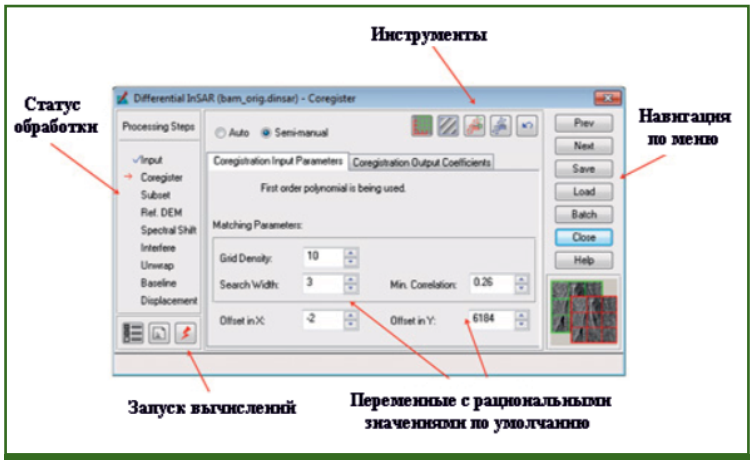

Рис. 3
Рабочий процесс DInSAR в ПО ERDAS IMAGINE

карта смещений. На рис. 3 показан один из интерфейсов организации рабочего процесса в этом программном обеспечении: большинство параметров и переменных интеллектуальны либо уникальны для каждой сцены, чтобы результат был оптимален. Изображения, приведенные на рис. 4 и 5, были получены в полностью автоматическом режиме. Для достижения такого результата не надо быть специалистом по работе с радарными данными.

В дополнение к интерферометрической паре требуется точная цифровая модель рельефа (ЦМР) для расчета смещений. Удобно то, что она может быть получена с помощью соответствующего процесса создания ЦМР InSAR, который позволяет «развернуть» интерферограмму для определения высоты каждого пикселя. В данном исследовании использовалось несколько снимков TerraSAR-X для создания перекрывающихся ЦМР, которые впоследствии были усреднены.

Анализ снимков

20 сцен TerraSAR-X могут быть объединены в интерферометрические пары, охватывающие различные периоды времени. Каждую пару можно обработать для получения значений смещения поверхности за конкретный период. Это позволяет составить прогрессивную последовательность изображений, показывающих движение поверхности с течением времени, и осуществлять мониторинг.

В процессе расчета смещений создается несколько промежуточных изображений, которые при необходимости могут просмотреть аналитики. Эти изображения будут полезны для оценки оптимальности настроек и внесения небольших корректив, чтобы получить лучший результат.

Одно из наиболее полезных промежуточных изображений — это изображение когерентности между сценами, в котором числовое значение (от 0 до 1) 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. Пример изображения когерентности приведен на рис. 4 вместе с соответствующим изображением смещений.

На рис. 4, слева, темные пиксели указывают на значительное снижение когерентности вдоль реки, протекающей с востока на запад через центр сцены. Также на изображении присутствуют темные области с низкой когерентностью, связанные с зонами растительности вдоль реки. Они отображены в виде темных прямоугольников.

На рис. 4, по центру, приведена соответствующая интерферограмма (выделена цветом), наложенная на радарное

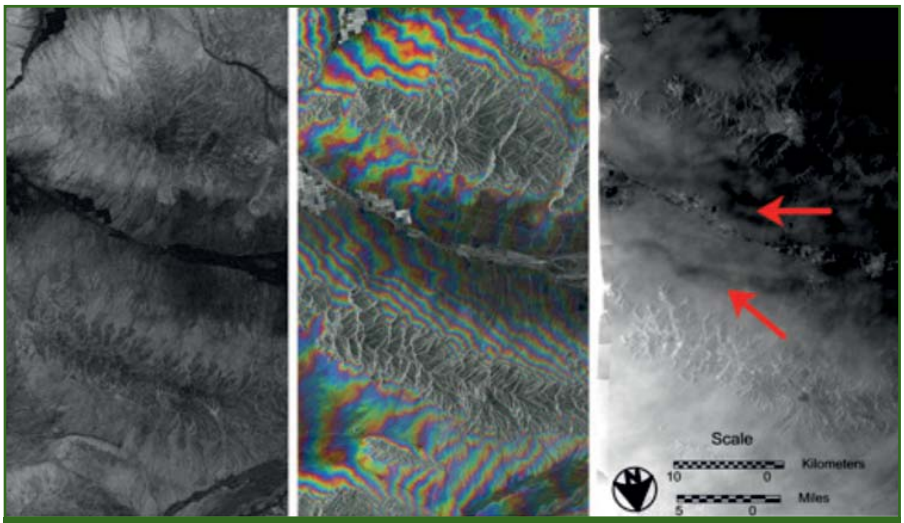

Рис. 4
Изображение когерентности между сценами (слева), интерферограмма (в центре) и соответствующее изображение смещений (справа). Эти данные получены из интерферометрических пар снимков TerraSAR-X, сделанных с интервалом в 6 месяцев

изображение. Интерференционные полосы показывают смещение поверхности между двумя снимками в интерферометрической паре. Разворот этой серии полос создает итоговое изображение с оседаниями, как показано на рис. 4 (справа). Красные стрелки указывают зоны возможного оседания, определенные с высокой точностью. Особый интерес представляют две темные извилистые области в центре, это — области проседаний. Каждый пиксель данного изображения имеет значение, соответствующее величине проседания в миллиметрах.

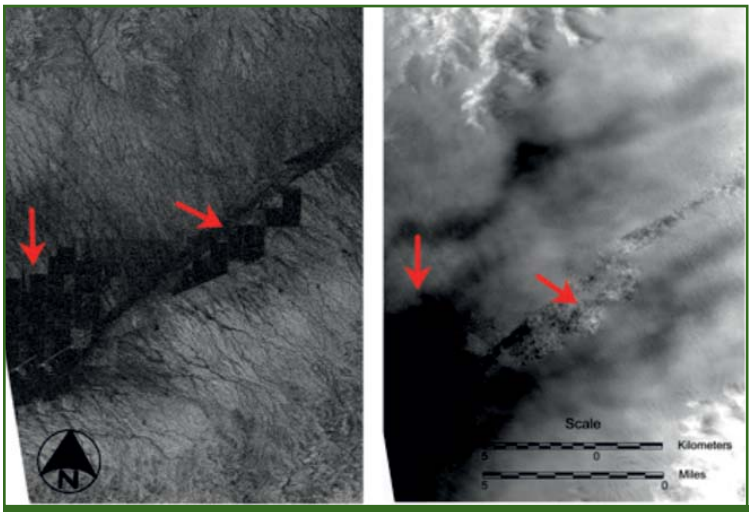

Рис. 5
Изображение карты смещений двух сцен. Красными стрелками показаны области, соответствующие низкой когерентности (слева), и с недостаточной достоверностью данных (справа)

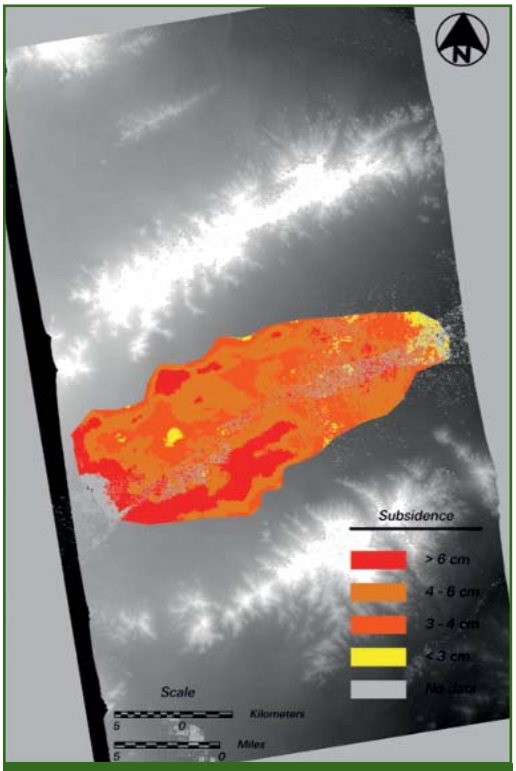

Рис. 6
Цветокодированное изображение карты оседаний, наложенное на ЦМР

На рис. 5 приведен подробный анализ, позволяющий специалистам интерпретировать карту смещений в контексте когерентности между сценами. Например, река показывает полную потерю когерентности, также как и некоторые сельскохозяйственные участки. Следует обратить внимание, что некоторые сельскохозяйственные участки демонстрируют высокую когерентность (это может быть пашня, ожидающая засева) и соответствуют пятнистым зонам на изображении. В данном случае результат определений проседания неустойчив.

Слева — сочетание реки, низкой когерентности и края изображения приводит к появлению очень темной области. Это могло бы быть оседанием, так как поля поливаются выкачиваемой водой, но совершенно ясно, что в данном случае присутствует ошибка. Похожая ошибка имеется на правом краю рис. 4. Эти области необходимо рассматривать как области с низкой достоверностью данных.

На рис. 6 информация с этих двух изображений объединена для помощи в интерпретации. Здесь представлена геокодированная карта (картограмма) оседаний, связанная с местной ЦМР, также созданной на основе интерферометрических снимков TerraSAR-X. При создании карты пиксели со значением когерентности ниже 0,35 считались ненадежными и окрашены серым. Они показывают на реку, текущую через центр сцены, особенно — в сельскохозяйственных или жилых районах на восточном и западном краях изображения. Данное изображение хорошо согласуется с изображением на рис. 1.

Стоит учитывать геометрию оседаний, зафиксированных с помощью дифференциальной интерферометрии, отмечая их неравномерность. Несколько точек, на которых проводятся измерения методами, описанными в начале статьи, не смогли бы дать представления о проседаниях в этой области. Данный же метод определения проседаний также позволяет увидеть подземные структуры, предоставляя инженерам дополнительную информацию об объекте, на котором ведутся разработки.

Автор благодарит компании Astrium Services и Infoterra GmbH за предоставленные 20 сцен с КА TerraSAR-X, которые послужили источником исходных данных для этой работы. В дополнение он отмечает участие в этих исследованиях отдела геофизики Департамента водных ресурсов Аризоны.