

УДК: 528.8

DOI: 10.47148/1609-364X-2020-3-53-61

© В.М. Филатова, И.В. Назаров, А.В. Филатов

В.М. Филатова, И.В. Назаров, А.В. Филатов

КРУПНОМАСШТАБНЫЙ МОНИТОРИНГ СМЕЩЕНИЙ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Введение

Технологии спутникового мониторинга земной поверхности стремительно развиваются с каждым годом. Среди них активное развитие получили спутниковые радиолокационные данные. Интерферометрическая обработка радиолокационных космоснимков является эффективным методом, позволяющим получать площадные оценки вертикальных и плановых смещений земной поверхности. Преимуществом радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) перед оптическими сенсорами является способность получать изображение земной поверхности независимо от условий освещенности и облачности, что особенно актуально для северных широт. С момента запуска первого искусственного спутника с РСА на борту для зондирования Земли (SEASAT, 1978 г.) накоплен огромный объем радиолокационных данных. В нашей стране первыми космическими РСА были «Космос-1870» и «Алмаз-1» (1987-1992 гг.). В настоящее время на орбите работает российский космический аппарат (КА) «Кондор» с РСА S-диапазона на борту. В ближайшее время Роскосмос планирует к запуску новый спутник с радиолокатором на борту «Обзор-Р». Активно используются европейские спутниковые системы TerraSAR-X/TanDEM-X, Cosmo-SkyMed 1-4, Sentinel-1A/B, канадский Radarsat-2, японский ALOS-2. Радиолокационные измерения являются уникальной информацией об отражающей способности земной поверхности.

Разработка действующих месторождений полезных ископаемых, строительство и эксплуатация объектов энергетического комплекса, крупных промышленных предприятий, горных отвалов требует постоянного геодинамического мониторинга за состоянием земной поверхности и техногенных объектов для своевременного предупреждения о возможных авариях и возникающих в результате ЧС. Мониторинг горных и оползневых природных зон позволяет своевременно предупреждать о возможных ЧС природного характера, что позволяет

существенно сократить негативные последствия от происшествий. В то же время наземный мониторинг с использованием станций геодинамического контроля не может быть реализован в полном объеме в связи с обширностью контролируемых территорий и, как следствие, высокой стоимостью создания полноценной системы контроля и предупреждения.

В условиях постоянно растущих городов и усложнения конструкций гражданских и промышленных сооружений требуется постоянный мониторинг техногенных объектов, который в настоящее время также реализуется путем выполнения большого объема дорогостоящих наземных измерений. Использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет существенно сократить затраты на осуществление контроля за объектами природного и техногенного характера, осуществлять мониторинг всей площади РФ, предупреждать о возможных ЧС в кратчайшие сроки, что позволит принимать меры по предотвращению ЧС или существенному сокращению негативного воздействия.

Метод спутниковой радиолокационной интерферометрии использует эффект интерференции электромагнитных волн и основан на математической обработке нескольких когерентных амплитудно-фазовых измерений одного и того же участка земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны РСА. Преимущество интерферометрического метода перед обработкой стереоснимков заключается в более высокой точности получаемых результатов, достигаемой за счет использования фазовой компоненты отраженного поверхностью радиосигнала.

Тематические карты на основе результатов интерферометрической обработки радиолокационных изображений (РЛИ) находят свое применение в задачах геодинамического и геотехнического мониторинга:

- ЧС природного характера [2, 4];
- месторождений нефти и газа [1, 7, 14, 15];
- открытых горных разработок [5, 8, 10];
- гражданский и промышленных объектов [3, 6].

Таким образом, применение новых методов для мониторинга смещений техногенных объектов и, в частности, на основе радиолокационных данных ДЗЗ является актуальной научно-технической задачей. Потенциал радиолокационных данных способен эффективно решать поставленные задачи по высоко-точной оценке смещений на больших площадях и отдельных точечных отражателях.

Материалы и методы исследования

Исходные данные. В работе использованы радиолокационные данные, полученные с пары спутников Sentinel-1A/B. Оператором спутников является Европейское космическое агентство (ESA). Характеристики радиолокационной съемки приведены в табл. 1.

Съемка земной поверхности радиолокатором Sentinel/SAR выполняется в режиме TOPSAR, что является более эффективной версией широкополосного режима ScanSAR. Радиолокатор зондирует участок земной поверхности вдоль линий пролета КА тремя парциальными полосами, переключая сканирующий луч. В результате радиолокационный кадр размером 250×250 км состоит из 3 полос по 9-10 парциальных кадров, каждая размером ~87×27 км, каждый с некоторым перекрытием.

Дополнительно к радиолокационным данным в качестве опорной топографии использована цифровая модель местности Tandem-X 90 m, полученная в результате обработки глобальной радиолокационной съемки поверхности Земли с пары спутников TerraSAR-X/Tandem-X. Данные доступны в сети Интернет по адресу geoservice.dlr.de. На текущий момент Tandem-X 90 m является самой актуальной информацией о топографии дневной поверхности Земли. Размер элемента разрешения (пиксела) составляет 3 угловых секунды, что равно 90 м на экваторе. Каждый файл покрывает участок размером

1 градус широты на 1 градус долготы (для территории севернее 60 параллели 2 градуса долготы).

Метод дифференциальной интерферометрии. Метод площадной дифференциальной интерферометрии подробно описан в работах Howard Zebker, Alessandro Ferretti, Ramon Hanssen [16, 11, 12].

Интерферограмма получается путем перемножения двух РЛИ, представленных в комплексном виде:

$$I = S_1 \cdot S_2^* = A_1 e^{j\phi_1} \cdot A_2 e^{-j\phi_2} = A_1 A_2 \cdot e^{j(\phi_1 - \phi_2)} = A_1 A_2 \cdot e^{j\Phi}, \quad (1)$$

где I – комплексная интерферограмма, S_1 – комплексный сигнал, принятый при первом пролете, S_2^* – комплексно-сопряженный сигнал, принятому при повторной съемке, A_1, A_2 – амплитуды сигналов, ϕ_1, ϕ_2 – фазы сигналов, Φ – результирующая (интерферометрическая) фаза.

Фаза интерферограммы состоит из нескольких составляющих:

$$\Phi = W(\Phi_{flat} + \Phi_{topo} + \Phi_{def} + \Phi_{atm} + \Phi_n),$$

где Φ_{topo} – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами, Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения поверхности за время между съемками, Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала, Φ_n – вариации фазы в результате спекл-шума, вызванного неполной компенсацией фазы переотражений ввиду переориентации точечных объектов и их перемещения внутри элемента разрешения, $W(\bullet)$ – означает взятие остатка по модулю 2π .

На рис. 1 приведена геометрическая схема расчета высоты земной поверхности H и смещения Δh произошедшего за время между повторными съемками. Используемый метод интерферометрической обработки позволяет определить данные величины на основе известных параметров: положения спутника при первом пролете; взаимного расположения

Таблица 1

Параметры радиолокационной съемки Sentinel-1A/B

Sentinel-1A/B radar acquisition parameters

Космический аппарат (КА)	Sentinel-1A/B
Прибор	SAR
Длина волны зондирующего излучения	5,6 см (С-диапазон)
Минимальный период повторной съемки след-в-след	12 суток, 6 при съемке с двух КА
Режим съемки используемых данных	TOPSAR IW
Пространственное разрешение	20 м
Размер сцены	250 × 250 км
Формат данных	SLC
Размер участка земной поверхности, соответствующего одному пикселу РЛИ	15 м по азимуту 4 м по наклонной дальности

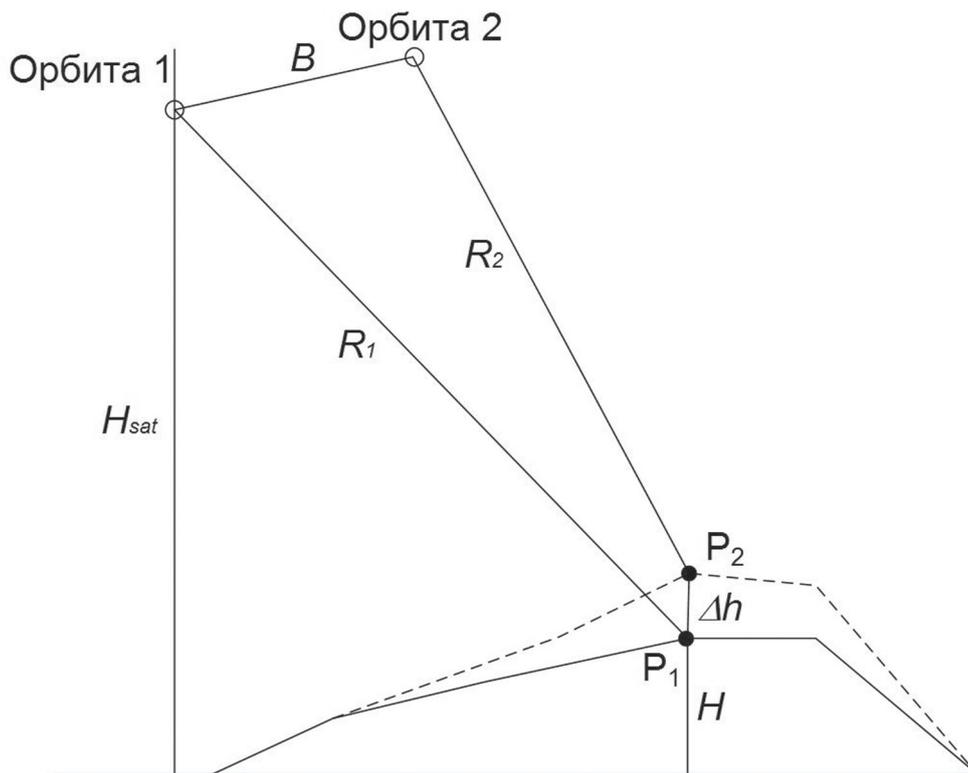


Рис. 1. Геометрия двухпроходной интерферометрической съемки

Fig. 1. Two-pass radar interferometry geometry

спутников при одновременных пролетах (длина и ориентация базовой линии B), разность расстояний от антенны радара до точки на земной поверхности при повторных съемках ($R_1 - R_2$).

Исходя из геометрии интерферометрической съемки, разность одновременных радиолокационных сигналов зависит от высоты отражающей поверхности и деформации произошедшей за время между съемками в соответствии со следующей формулой:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_p^0 - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{1,p} \sin \theta_p^0} H_p - \frac{4\pi}{\lambda} D_p, \quad (2)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения, B – расстояние между антенной радиолокатора при одновременной съемке (пространственная база), θ_p^0 – угол обзора земной поверхности, рассчитанный для опорной поверхности, α – угол наклона базовой линии, $B_{\perp,p}^0$ – перпендикулярная составляющая базовой линии, рассчитанная для опорной поверхности, $R_{1,p}$ – расстояние между антенной при первом пролете и точкой на опорной поверхности, H_p – высота отражающей поверхности над опорной, D_p – деформация отражающей поверхности за время между съемками.

Метод интерферометрии постоянных отражателей. Для обработки данных многопроходной

съемки Sentinel-1A/B применен метод интерферометрии постоянных отражателей StaMPS [13].

В обработке используются $K+1$ радиолокационных кадров одной и той же области, снятые с повторных орбит космического аппарата. Первым этапом является выбор основного кадра в соответствии со следующей формулой:

$$\gamma_m = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^K g(B_{\perp,k,m}, B_{\perp,cr}) \times g(T_{k,m}, T_{cr}) \times g(fdc_{k,m}, fdc_{cr}), \quad (3)$$

где:

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - |x|/c & \text{при } |x| < c \\ 0 & \text{при } |x| \geq c \end{cases}$$

где $B_{\perp,k,m}$, $T_{k,m}$, $fdc_{k,m}$ – перпендикулярная пространственная база, временная база и разница доплеровских центроидов для каждой пары кадров; $B_{\perp,cr}$, T_{cr} , fdc_{cr} – критические значения данных параметров.

Относительно выбранного кадра рассчитываются K дифференциальных интерферограмм, в которых скорректирована топографическая компонента, пропорциональная высотам рельефа земной поверхности. Для устранения рельефа применяются доступные цифровые модели рельефа, например SRTM или TanDEM-X 90 m, или результаты оцифровки топографических карт.

На следующем этапе выполняется предварительный выбор точек, являющихся постоянными интерферометрическими отражателями в соответствии с индексом дисперсии амплитуды:

$$\sigma_v = \frac{\sigma_A}{m_A} = D_A, \quad (4)$$

где σ_v – дисперсия фазы, σ_A – дисперсия амплитуды, m_A – среднее значение амплитуды, D_A – индекс дисперсии амплитуды.

Дальнейшие расчеты проводятся для N точек из предварительной выборки, в соответствии с компонентами дифференциальной интерферометрической фазы:

$$\Phi_{x,i} = W(\Phi_{\varepsilon,x,i} + \Phi_{def,x,i} + \Phi_{atm,x,i} + \Phi_{orb,x,i} + \Phi_{n,x,i}),$$

где x – координаты точки (постоянного отражателя) на радиолокационном кадре (по азимуту и наклонной дальности), i – индекс интерферограммы, $W(\bullet)$ означает остаток от деления на 2π , т.к. фаза радиолокационного сигнала регистрируется в интервале от $-\pi$ до $+\pi$.

Расчет смещений постоянных отражателей (техногенных объектов и элементов микрорельефа земной поверхности) основан на разделении компонент дифференциальной интерферометрической фазы на составляющие, различающиеся по характеру изменений в пространстве кадра и во времени наблюдений. Особенности и характеристики компонент приведены в табл. 2:

Особенность метода StaMPS заключается в использовании параметра фазовой стабильности для идентификации постоянных интерферометрических отражателей. Индекс дисперсии амплитуды

используется только для предварительной выборки, чтобы сократить объем вычислений. Такой подход позволяет обнаруживать смещения и техногенных объектов, и элементов микрорельефа земной поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение

Описание разработанной системы мониторинга деформаций земной поверхности. При выполнении данного проекта разработана система, представляющая собой законченный набор этапов, необходимых для автоматизированной обработки, начиная от исходных радиолокационных данных Sentinel-1A/B и заканчивая публикацией результатов. На рис. 2 приведена схема работы системы.

Первый этап – получение исходных данных. Источниками для данных Sentinel-1A/B служат два геоинформационных сервиса: Alaska SAR Facility (ASF) и Copernicus Open Access Hub (SciHub). Начиная с 2017 года SciHub архивирует старые радиолокационные снимки, что затрудняет доступ к ним и увеличивает время получения данных. На момент написания статьи для свободного скачивания доступны РЛИ не ранее декабря 2018 года. В связи с этим для скачивания данных 2014-2018 гг. предпочтительным источником является ASF. Для устранения топографической составляющей фазы и расчета дифференциальной интерферограммы необходимо использовать опорную цифровую модель рельефа. В разработанной системе предусмотрено автоматическое скачивание ЦМР Tandem-X 90 m.

Как ранее было описано, съемка со спутника Sentinel-1A/B в режиме TOPSAR выполняется парциальными кадрами. Однако для скачивания доступны целые кадры размеров 250×250 км, которые могут

Таблица 2

Характеристики компонент интерферометрической фазы

Interferometric phase components characteristics

	Компонента	Изменения в пространстве кадра	Во времени
$\Phi_{def,x,i}$	Смещения	Медленные изменения	Медленные изменения
$\Phi_{atm,x,i}$	Атмосферный сдвиг	Медленные изменения	Быстрые изменения
$\Phi_{orb,x,i}$	Ошибка определения орбиты	Медленные изменения	Быстрые изменения
$\Phi_{n,x,i}$	Некоррелируемый фазовый шум	Быстрые изменения	Быстрые изменения
$\Phi_{\varepsilon,x,i}$	Ошибка устранения рельефа	Быстрые изменения	Пропорционально перпендикулярной базовой линии

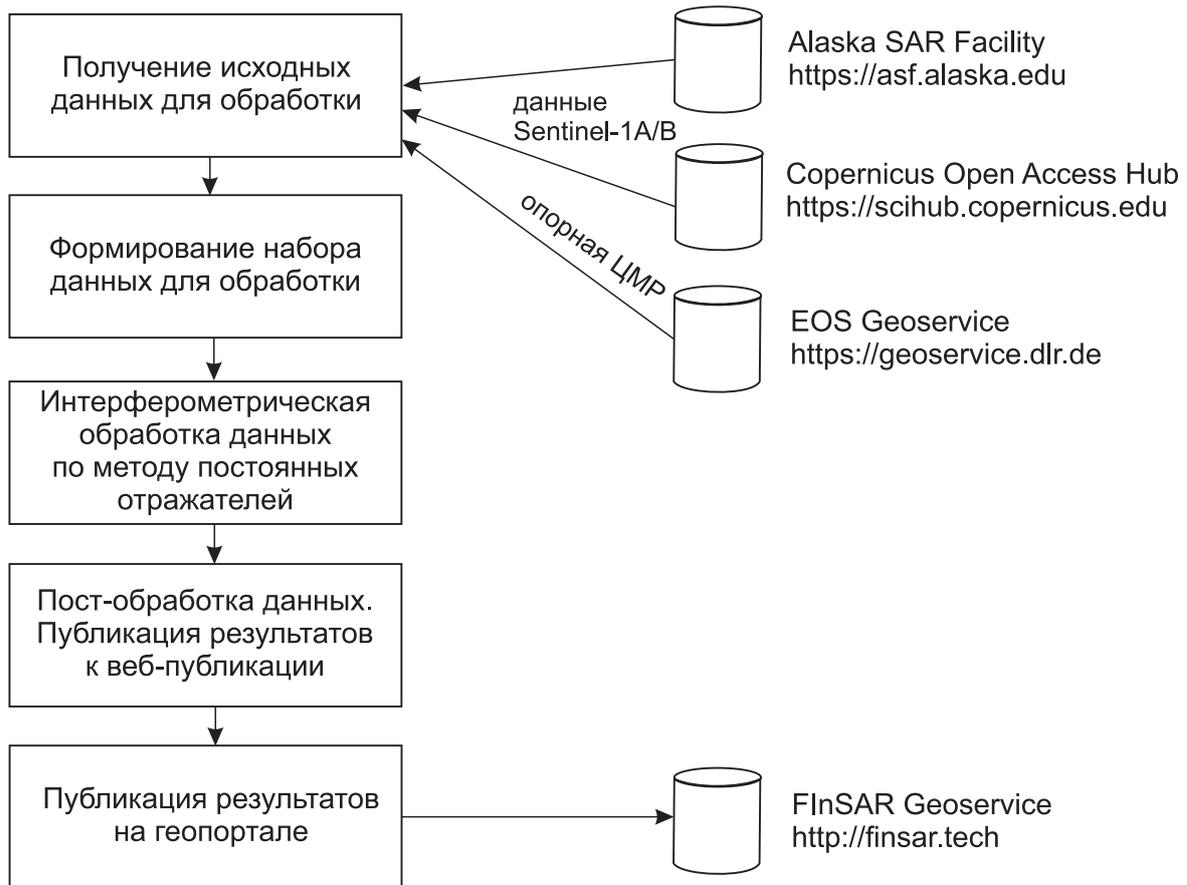


Рис. 2. Схема автоматизированной обработки радиолокационных данных Sentinel-1A/B

Fig. 2. The diagram of Sentinel-1A/B radar data automatic processing

иметь сдвиг вдоль линии следования КА. На **втором этапе** производится анализ метаданных, разбиение исходных радиолокационных сцен и составление наборов парциальных кадров, покрывающих одни и те же участки. На рис. 3 для примера представлено покрытие территории Калининградской области 14 парциальными кадрами. Автоматизированное скачивание и формирование набора данных для обработки реализовано при помощи программ на языке Python.

Третий этап (рис. 2) заключается в непосредственной обработке данных многопроходной радиолокационной съемки по методу постоянных отражателей, которая реализована в программном обеспечении FInSAR, написанном на языке C/C++ [9]. Процесс обработки состоит из следующих шагов:

1. Импорт исходных радарных данных, представленных в формате комплексных чисел (SLC – Single Look Complex).
2. Вырезание части радиолокационного кадра, соответствующей исследуемой территории.
3. Выбор основной (master) сцены и составление интерферометрических пар (формула 3).

4. Расчет дифференциальных интерферограмм. Этап состоит из нескольких шагов, параметры которых объединены в один файл:

4.1. Расчет смещения между двумя кадрами (master и slave) на основе орбитальной информации о движении космического аппарата.

4.2. Расчет смещения между двумя кадрами на основе параметра кросс-корреляции амплитудных компонент.

4.3. Расчет локальных смещений между двумя кадрами на основе параметра кросс-корреляции амплитудных компонент с передискретизацией (увеличением разрешения) для достижения субпиксельной точности совмещения.

4.4. Расчет коэффициентов полинома преобразования.

4.5. Преобразование slave кадра в координаты master.

4.6. Расчет интерферограммы (формула 1).

4.7. Расчет топографической компоненты фазы (формула 2).



Рис. 3. Покрытие данными Sentinel-1A/B территории Калининградской области

Fig. 3. Sentinel-1A/B data coverage of Kaliningrad region

4.8. Расчет дифференциальной интерферограммы.

5. Выбор точек – потенциальных постоянных отражателей (формула 4).
6. Оценка фазовой стабильности потенциальных интерферометрических отражателей. Для каждой точки рассчитывается и удаляется топографическая компонента дифференциальной интерферометрической фазы, оставшаяся вследствие неточности опорной модели рельефа. По соотношению полезный сигнал/шум для остаточной компоненты можно оценить фазовую стабильность потенциальных интерферометрических отражателей.
7. Выбор постоянных отражателей.
8. Устранение ложных стабильных отражателей. В случае техногенных объектов отражатели, являющиеся элементами зданий или металлических конструкций, имеют достаточно сильный уровень обратного отражения и засвечивают несколько соседних пикселей радиолокационного изображения (боковые лепестки). Такие ложные стабильные отражатели со значением фазовой стабильности выше порогового необходимо устранить из дальнейшей обработки, так как значение топографической компоненты для них не может быть корректно рассчитано.
9. Корректировка фазы постоянных отражателей. Из фазы постоянных отражателей устраняется остаточная топографическая компонента.
10. Развертка фазы. Выполняется двумерная процедура развертки фазы для каждой интерферо-

граммы, а также одномерная во времени для каждого постоянного отражателя. Развертка фазы необходима для устранения неоднозначности, возникающей вследствие измерения фазы радиолокационного сигнала в интервале от 0 до 2π , и расчета абсолютной фазы.

11. Оценка скоростей и временных рядов смещений постоянных интерферометрических отражателей; геокодирование результатов.

В программном обеспечении FInSAR реализована поддержка распределенных вычислений с использованием рабочих станций одной локальной сети или высокопроизводительного компьютерного кластера.

На четвертом этапе работы системы выполняется экспертный анализ и пост-обработка полученных результатов. Данный процесс включает:

1. Удаление точек с высоким значением среднеквадратического отклонения от линии скорости.
2. Удаление точек, которые несут недостоверную информацию, например точек, расположенных на сельскохозяйственных полях, водных объектах.
3. Сглаживание временных рядов смещений.
4. Расчет среднегодовой скорости и смещений и оценка точности для каждой точки измерения.
5. По окончании анализа из результатов формируется файл в формате ESRI ShapeFile, который содержит все необходимые атрибуты и может быть импортирован в геоинформационные системы, например ArcGIS или QGIS, или опубликован на геопортале.

Геоинформационный портал (**пятый этап**) реализован на базе доступного программного обеспечения GeoServer, которое, получая на входе файл в формате ESRI ShapeFile, формирует растровые тайлы, которые потом загружаются пользователем. Таким образом, взаимодействие с интерактивной картой осуществляется через веб-браузер (рис. 4). Интерфейс пользователя реализован на языке JavaScript с использованием библиотеки Leaflet. В качестве фона применяются оптические снимки, загружаемые с геоинформационного сервиса Яндекс.Карты. Разработанный геопортал и интерактивная карта смещений на территории Калининградской области за 2017-2018 гг. доступны в сети интернет по адресу <http://finsar.tech>.

Пользователю доступен небольшой набор инструментов, облегчающий анализ полученных результатов (рис. 5). Для каждой точки или группы точек возможно отследить всю историю смещений в течение интервала наблюдений. Также возможно проанализировать скорости смещений точек, расположенных вдоль пространственного профиля. В правой нижней части экрана размещена цветовая шкала, позволяющая оценить скорость смещения точки в мм/год. Для примера на рис. 5 представлен район расположения стадиона, построенного в городе Калининграде к чемпионату мира по футболу 2018.

Выводы

В представленной работе разработана система автоматизированной обработки спутниковых радио-

локационных данных Sentinel-1A/B. Два спутника выполняют съемку всей территории земного шара с периодичностью 6-12 дней, начиная с апреля 2014 г. Информация о состоянии земной поверхности, получаемая этой парой радиолокаторов, доступна бесплатно, и в этом ее главное преимущество. Современные средства высокопроизводительных вычислений и достижения в области обработки данных дистанционного зондирования Земли сделали возможным оперативно получать информацию о состоянии поверхности на обширных территориях. Геопространственная информация о лесных пожарах, незаконных вырубках леса и паводковой обстановке уже доступна и активно используется. Информация о смещениях техногенных объектов и деформациях земной поверхности имеет обширную область применения для решения задач управления в регионах.

В дальнейшем в рамках данного проекта планируется обновление результатов на Калининградскую область с использованием радиолокационных данных Sentinel-1A/B за 2019 г., а также добавление новых территорий: Московской и Ленинградской областей. Кроме того, планируется анализ выделенных областей на основании совмещения результатов автоматизированной обработки спутниковых радиолокационных данных Sentinel-1A/B и водных индексов (MNDWI и NDWI2) по оптическим снимкам Sentinel-2A/B для земельных участков, прилегающих к автодорогам.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 19-45-390002.



Рис. 4. Интерактивная карта скоростей смещений техногенных объектов на территории Калининградской области

Fig. 4. Interactive map of technogenic objects displacements rates in the territory of Kaliningrad region

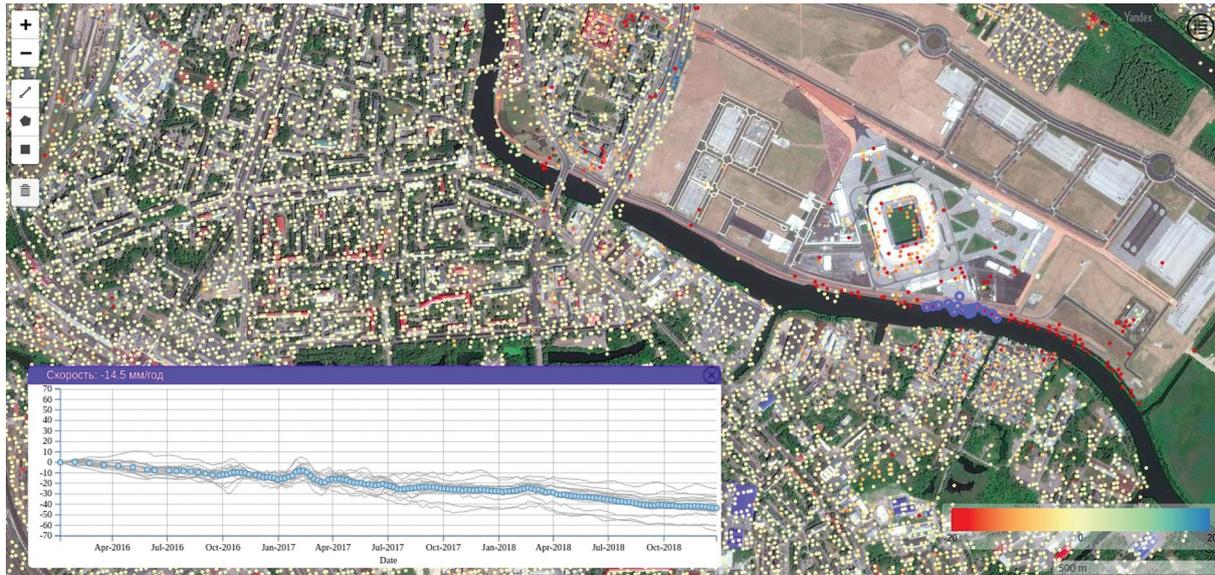


Рис. 5. История смещений объектов в месте расположения стадиона к ЧМ-2018

Fig. 5. The history of objects displacements in the location of World Cup 2018 stadium

Ключевые слова: радиолокаторы с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, Sentinel-1A/B, геинформационный сервис, деформации земной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Ю.В., Мисюрев Д.А., Филатов А.В. Техногенное влияние разработки Комсомольского месторождения на современные деформационные процессы // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 2. – С. 11-20. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-2-11-20.
2. Верхотуров А.Л. Оценка деформации земной поверхности по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии и GPS на примере Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: материалы V Междунар. науч.-практич. конф. / отв. за выпуск А.Л. Верхотуров. – Хабаровск, 2019. – С. 3-11.
3. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Обнаружение динамики мостов методом радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 42-51. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-42-51.
4. Захарова Л.Н., Захаров А.И., Митник Л.М. Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке бурейя по данным SENTINEL-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 69-74. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-69-74.

5. Кожяев Ж.Т., Мухамедгалиева М.А., Имансакипова Б.Б., Мустафин М.Г. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии // Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 39-44. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.07.
6. Соломенников М.Ю., Мусихин В.В., Харина Н.М. Оценка точности определения оседаний, полученных методами радарной интерферометрии по спутниковым снимкам ENVISAT и TerraSAR-X на территории промышленного объекта г. Березники // Маркшейдерский вестник. – 2017. – № 2 (117). – С. 44-49.
7. Трофимов Д.М., Захаров А.И., Шуваева М.К. Современные микроамплитудные тектонические движения, дистанционные методы их изучения и значение для нефтегазовой геологии // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 4. – С. 6-11.
8. Филатов А.В. Оценка вертикальных и горизонтальных смещений хвостохранилища Кольской ГМК по данным спутниковой радиолокационной съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 7. – С. 77-85. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-77-85.
9. Филатов А.В. Программа интерферометрической обработки спутниковых радиолокационных данных (FInSAR). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018614285 21.11.2017.
10. Цирель С.В., Таратинский Г.М., Пономаренко М.Р., Кантемиров Ю.И. Опыт организации

мониторинга деформаций земной поверхности в зоне ведения горных работ на предприятиях АО «Апатит» (Мурманская область) с применением метода космической радарной интерферометрии // Маркшейдерский вестник. – 2017. – № 5 (120). – С. 57-63.

11. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. – Noordwijk : ESA Publications, 2007. – 234 p.

12. Hanssen R.F. Radar Interferometry – Data Interpretation and Error Analysis. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. – 308 p.

13. Hooper A., Bekaert D., Spaans K., Arikani M. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation // Tectonophysics. – 2012. – P. 1-13.

14. Junisbekova V., Filatov A., Kuznetsova I., Yeliseyeva A. SAR interferometry technique for ground deformation assessment on Karazhanbas oilfield // Procedia Computer Science. – 2016. – P. 1163-1167.

15. Moghaddam N., Samsonov S., Rüdiger C., Walker J., Hall W. Multi-temporal SAR observations of the Surat Basin in Australia for deformation scenario evaluation associated with man-made interactions // Environmental Earth Sciences. – 2016 – V. 75(4). – P. 1-16.

16. Zebker H. A., Goldstein R. M. Topographic Mapping Derived from Synthetic Aperture Radar Measurements // Journal of Geophysical Research. – 1986. – V. 91. – P. 4993-5002.

REFERENCES

1. Vasilev Yu.V., Misyurev D.A., Filatov A.V. Anthropogenic influence of the Komsomolsk oil and gas condensate field on modern deformation processes // Oil and gas studies. 2018. No. 2. P. 11-20. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-2-11-20.

2. Verkhoturov A.L. Estimation of the ground surface deformation using satellite radar interferometry data and GPS on the example of the Aleutian earthquake July 17, 2017 // Information Technologies and High-Performance Computing : materials of the V International Scientific and Practical Conference / Responsible for the release A.L. Verkhoturov. Khabarovsk, 2019. P. 3-11.

3. Zakharova L.N., Zakharov A.I. Detection of bridges instability by means of SAR interferometry // Modern problems of Remote sensing of the Earth from Space. 2018. V. 15. No. 2. P. 42-51. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-42-51.

4. Zakharova L.N., Zakharov A.I., Mitnik L.M. First results of radar monitoring of the landslide consequences on the Bureya riverbank using Sentinel-1 data // Modern problems of Remote sensing of the Earth from Space. 2019. V. 16. No 2. P. 69-74. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-69-74.

5. Kozhaev Zh.T., Mukhamedgalieva M.A., Mustafin M.G., Imansakipova B.B. Geoinformation system for geomechanical monitoring of ore deposits using space-born radar interferometry methods // Mining Journal. 2017. No. 2. P. 39-44. DOI: 10.17580/gzh.2017.02.07.

6. Solomennikov M.Y., Musikhin V.V., Kharina N.M. Estimation of the accuracy of the determination of subsidence obtained by radar interferometry from satellite images of ENVISAT and TerraSAR-X on the territory of the industrial site of Berezniki // Mine Surveying Bulletin. 2017. No 2 (117). P. 44-49.

7. Trofimov D.M., Zakharov A.I., Shuvaeva M.K. Advanced micro-amplitude tectonic shifts, remote methods of their study and their significance for oil and gas geology // Geology, geophysics and development of oil and gas deposits. 2016. No. 4. P. 6-11.

8. Filatov A.V. Estimation of vertical and horizontal displacements at Kolskaya GMK tailing dam using SAR data // Modern problems of Remote sensing of the Earth from. 2017. V. 14. No. 7. P. 77-85. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-77-85.

9. Filatov A.V. The computer program for satellite radar data interferometric processing (FInSAR). Computer program registration certificate RUS 2018614285 21.11.2017.

10. Tsirel S.V., Taratinskiy G.M., Ponomarenko M.R., Kantemirov Yu.I. Earth surface deformation monitoring in the mining areas of JSC «Apatit» enterprise (Murmansk region) using radar interferometry // Mine Surveying Bulletin. 2017. No. 5 (120). P. 57-63.

11. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. – Noordwijk : ESA Publications, 2007. 234 p.

12. Hanssen R.F. Radar Interferometry – Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p.

13. Hooper A., Bekaert D., Spaans K., Arikani M. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation // Tectonophysics. 2012. P. 1-13.

14. Junisbekova V., Filatov A., Kuznetsova I., Yeliseyeva A. SAR interferometry technique for ground deformation assessment on Karazhanbas oilfield // Procedia Computer Science. 2016. C. 1163-1167.

15. Moghaddam N., Samsonov S., Rüdiger C., Walker J., Hall W. Multi-temporal SAR observations of the Surat Basin in Australia for deformation scenario evaluation associated with man-made interactions // Environmental Earth Sciences. 2016. V. 75(4). P. 1-16.

16. Zebker H.A., Goldstein R.M. Topographic Mapping Derived from Synthetic Aperture Radar Measurements // Journal of Geophysical Research. 1986. V. 91. P. 4993-5002.