

# ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ С КА SENTINEL-1 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Р.Р. Назаров** («Эридан», Казань)

В 1986 г. окончил Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета (КФУ) по специальности «астрономогеодезия». После окончания института работает на кафедре астрономии и космической геодезии КФУ. С 1999 г. по настоящее время — директор ООО «Эридан».

**Л.И. Булатова** («Эридан», Казань)

В 2019 г. окончила Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета по специальности «геодезия и дистанционное зондирование». После окончания института работает в ООО «Эридан», в настоящее время — инженер-геодезист.

## ▼ Космическая программа Copernicus

Космические программы по дистанционному зондированию Земли играют существенную роль в развитии науки и совершенствовании понимания процессов, происходящих на планете.

Одним из таких значимых проектов является программа Европейского космического агентства (European Space Agency) Copernicus. Она предусматривает проведение глобального мониторинга окружающей среды за счет получения непрерывных, автономных и высококачественных снимков с группировки космических аппаратов (КА) семейства Sentinel. В настоящее время группировка Sentinel представлена пятью различными миссиями по два космических аппарата в каждой. Шестая миссия планируется к реализации в 2020 г. Одним из преимуществ программы является доступное (открытое) и бесплатное предоставление космических снимков, получае-

мых в ее рамках, всем желающим.

Первый КА по программе Copernicus Sentinel-1A был выведен на орбиту 3 апреля 2014 г., а второй — Sentinel-1B — 26 апреля 2015 г. На обоих космических аппаратах размещен радар с синтезированной апертурой C-SAR, который обеспечивает всепогодное, круглосуточное получение радиолокационных снимков (радиолокационных изображений). Радиолокационная съемка выполняется в C-диапазоне (длина волны 6 см). Скорость передачи данных на наземный сегмент — 300 Мбит/с. Периодичность получения изображений на территорию РФ со спутников Sentinel составляет 5–15 дней (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>).

Основным режимом радиолокационной съемки земной поверхности является Interferometric Wide Swath, который обеспечивает ширину захвата 250 км, с пространственным разрешением изображений

(без обработки) в азимутальном направлении 5 м/пиксель, а в продольном — 20 м/пиксель.

## ▼ Метод устойчивых отражателей

Определение смещений земной поверхности может проводиться с использованием технологии дифференциальной радарной интерферометрии (SAR), а именно — метода устойчивых отражателей (Persistent Scatterer Interferometry, PSI). Метод устойчивых отражателей (рассеивателей) заключается в совместной обработке фазовой информации от отдельных объектов земной поверхности с геометрическими размерами, меньше величины разрешения радара с синтезированной апертурой, с яркостью, значительно превышающей фоновую, постоянно наблюдаемых на радиолокационных изображениях вне зависимости от погодных условий или времени года (<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>). Как правило, к таким объектам (устой-

чивым отражателям) относятся элементы искусственных сооружений, по характеру обратного рассеяния соответствующие уголковым отражателям. Метод используется для долговременного мониторинга смещений земной поверхности, при этом количество обрабатываемых пар составляет десятки или даже сотни.

#### ▼ Исследуемые территории и результаты

Авторами статьи были проведены исследования возможности применения метода PSI для определения вертикальных деформаций зданий, сооружений и земной поверхности на различных территориях.

**Городская застройка.** В качестве первого объекта была выбрана территория города Казани (Республики Татарстан). Целью являлась оценка плотности распределения устойчивых отражателей в городских условиях, так как этот фактор во многом определяет тип решаемых задач при мониторинге деформаций на застроенных территориях. В качестве исходных данных использовались 23 радиолокационных изображения с КА Sentinel-1A за период с апреля 2018 г. по май 2019 г., при этом интервал между снимками составлял 12 дней.

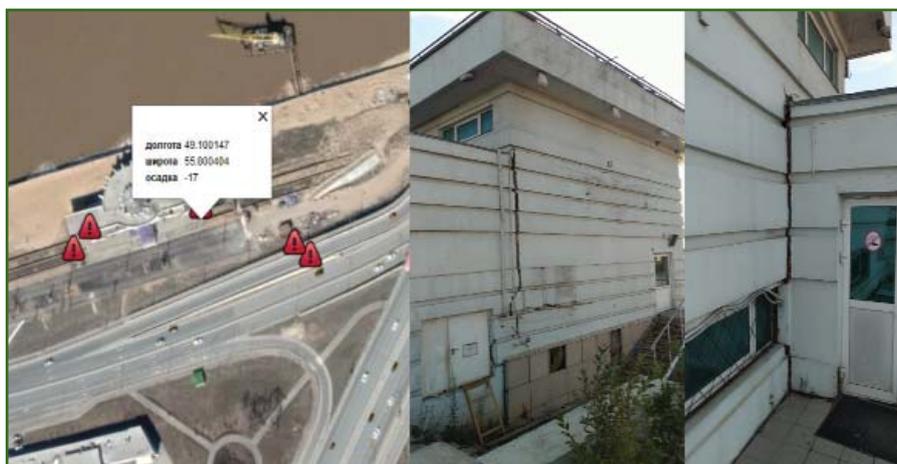


**Рис. 1**  
Устойчивые отражатели на территории города Казани

На данной территории были обнаружены в общей сложности 282 156 постоянных отражателей, высотные смещения которых находились в диапазоне от  $-21$  мм до  $+16$  мм. Столь высокая плотность устойчивых отражателей (рис. 1), в среднем 5300 на  $1 \text{ км}^2$ , позволяет решать задачи мониторинга деформаций отдельных зданий и сооружений.

В целях косвенного подтверждения полученных результатов для зданий, на которых и вблизи которых регистрировались значительные вертикальные смещения, был проведен визуальный осмотр на наличие внешних проявлений значимых вертикальных смещений. На рис. 2 и рис. 3 представлены сооружения со значениями вертикальных смещений, рассчитанных методом PSI, и их внешними проявлениями.

Подводя итоги выполненных работ, можно сделать следующие выводы. Учитывая высокую плотность устойчивых отражателей, метод PSI является эффективным для исследования деформаций на застроенных территориях. При этом, он позволяет осуществлять мониторинг отдельных сооружений и объектов. Кроме того, для застроенных территорий возможно косвенное подтверждение значительных вертикальных смещений по наличию проявления на фасадах



**Рис. 2**  
Зарегистрированная деформация (слева), фото здания с частичным разрушением (справа)

здания трещин и частичных разрушений.

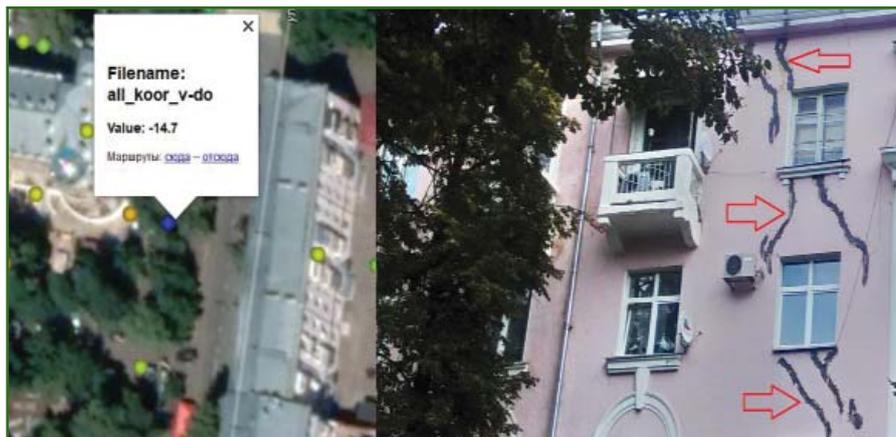
**Нефтяное месторождение с сетью базовых (референсных) станций ГНСС.** Второе исследование было проведено в Альметьевском районе Республики Татарстан на территории одного из нефтяных месторождений. В качестве исходных данных использовались 32 радиолокационных изображения с КА Sentinel-1B за период с апреля 2017 г. по октябрь 2018 г., при этом интервал между снимками составлял 12 дней.

Особенностью этой территории является наличие сети из 25-ти постоянно действующих базовых станций ГНСС, которые используются при выполнении геодезических и маркшейдерских работ, а также для мониторинга деформаций земной поверхности в районе месторождения. На рис. 4 представлена одна из базовых станций ГНСС на объекте.

Исходя из этого, целью работ стало сопоставление изменения высоты базовой



**Рис. 4**  
Базовая станция ГНСС на нефтяном месторождении



**Рис. 3**  
Зарегистрированная деформация (слева), фото фасада здания с трещинами (справа)

станции ГНСС и зарегистрированного значения вертикального смещения устойчивого отражателя, находящегося в непосредственной близости к этой станции. Таким образом, базовые станции ГНСС являлись своеобразными высотными реперами, которые использовались для подтверждения данных, полученных с помощью метода PSI.

Следует отметить, что станции ГНСС работают в режиме 24/7. Это позволяет непрерывно получать информацию об их положении в плане и по высоте с точностью в несколько миллиметров. Оператор сети базовых станций ГНСС предоставил для эксперимента данные пространственных координат станций за период 2017 и 2018 гг.

На первом этапе по измерениям на базовых станциях были отобраны станции без резких изменений высоты, так как изменения высоты могут быть обусловлены другими факторами, не связанными с деформациями земной поверхности.

На следующем этапе станции ГНСС отбирались по критерию наличия достаточного числа устойчивых отражателей в заданном радиусе от станции, в данном случае величина радиуса была принята равной 300 м (рис. 5). После такого отбора

дальнейшие исследования проводились с данными высотного положения 12-ти станций ГНСС и вычисленными методом PSI смещениями устойчивых отражателей, выбранных в заданном радиусе от этих станций.

Для каждой базовой станции ГНСС были рассчитаны ожидаемые вертикальные смещения методом обратных расстояний по смещениям ближайших устойчивых отражателей в заданном радиусе. Таким образом получили расчетное значение вертикального смещения для каждой из 12-ти станций методом PSI. Фактические вертикальные смещения, полученные по ГНСС-измерениям — **H(ГНСС)**, и вычисленные с помощью метода PSI — **H(PSI)**, а также абсолютная разность между этими смещениями — **ΔH** для каждой станции приведены в таблице.

Как видно из представленных результатов, максимальная абсолютная разность между фактическим вертикальным смещением базовых станций ГНСС и ожидаемым, вычисленным методом PSI, составила 8 мм (рис. 6).

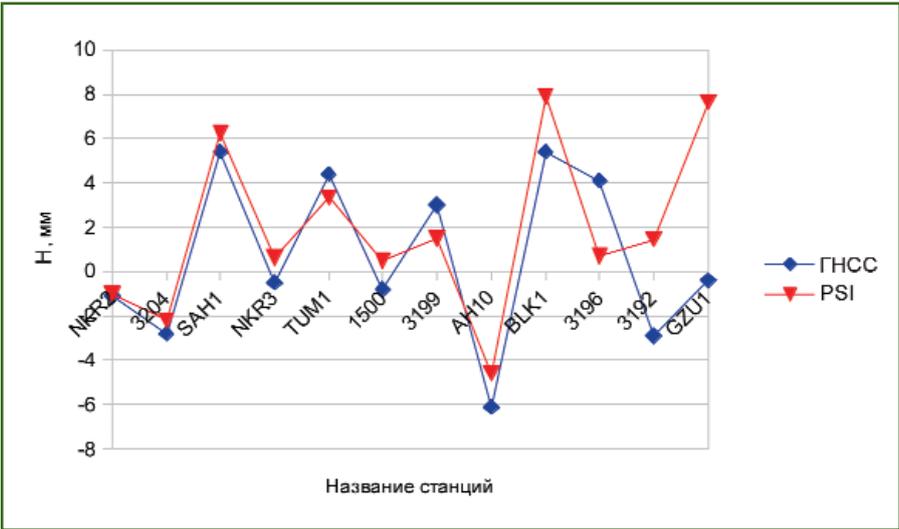
Исходя из полученных результатов, можно с уверенностью говорить о том, что технология дифференциальной интерферометрии SAR, а точ-



**Рис. 5**  
 В радиусе 500 м от станции ГНСС 12 устойчивых отражателей (слева); в радиусе 100 м от станции ГНСС 10 устойчивых отражателей

**Фактические и вычисленные методом PSI вертикальные смещения базовых станций ГНСС**

	Наименование базовой станции ГНСС											
	NKR2	3204	SAH1	NKR3	TUM1	1500	3199	AN10	BLK1	3196	3192	GZU1
	Величина вертикального смещения, мм											
<b>Н (ГНСС)</b>	-1,1	-2,8	5,4	-0,5	4,4	-0,8	3	-6,1	5,4	4,1	-2,9	-0,4
<b>Н (PSI)</b>	-1,0	-2,2	6,2	0,6	3,3	0,5	1,5	-4,6	7,9	0,7	1,4	7,6
<b>ИДНІ</b>	0,1	0,6	0,8	1,1	1,1	1,3	1,5	1,5	2,5	3,4	4,3	8,0



**Рис. 6**  
 График фактических и вычисленных методом PSI вертикальных смещений базовых станций ГНСС

Это позволяет рекомендовать метод PSI для количественной оценки при мониторинге деформационных процессов на различных территориях. Следует отметить, что при наличии в районе работ постоянно действующих базовых станций ГНСС целесообразно использовать данные спутниковых измерений для подтверждения величин деформаций, определенных методом PSI.

Значительный объем накопленных архивных радиолокационных данных с КА Sentinel-1 обеспечивает наличие необходимого количества снимков (более 20) для определения смещений земной поверхности методом PSI, что позволяет выполнять мониторинг вертикальных смещений в режиме, близком к режиму реального времени.

нее ее разновидность — метод устойчивых отражателей, может обеспечить довольно высокую точность определе-

ния вертикальных смещений земной поверхности и объектов на незастроенных территориях.