

**Ж. Ш. Жантаев** (АО «Национальный центр космических исследований и технологий» Казахстана)

В 1970 г. окончил Казахский политехнический институт по специальности «геофизика». В настоящее время — президент АО НЦ КИТ. Доктор физико-математических наук.

**Б. К. Курманов** (ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ», Казахстан)

В 2009 г. окончил Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева (кафедра геофизики), в 2011 г. — магистратуру Высшей национальной школы геологии Университета Лотарингии (Франция) по специальности «геология — моделирование — гидродинамика». В настоящее время — директор ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ».

**А. В. Иванчукова** (ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ», Казахстан)

В 2010 г. окончила Казахский национальный университет им. аль-Фараби по специальности «геодезия и картография». В настоящее время — младший научный сотрудник лаборатории исследования деформационных процессов земной коры ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ».

**А. Г. Фрейд** (ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ», Казахстан)

В 1970 г. окончил Томский политехнический институт по специальности «геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». В настоящее время — заведующий лабораторией исследования деформационных процессов земной коры ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ». Кандидат физико-математических наук.

**А. В. Кирсанов** (ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ», Казахстан)

В 2008 г. окончил Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева по специальности «геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». В настоящее время — ведущий инженер ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ».

**А. Ж. Бибосинов** (ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ», Казахстан)

В 2010 г. окончил механико-математический факультет Казахского национального университета им. аль-Фараби. В настоящее время — начальник отдела наземно-космического, геодинамического и геофизического мониторинга ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ». Магистр естественных наук по специальности «механика», PhD-докторант по специальности «механика».

**Ю. И. Кантемиров** (компания «Совзонд», Россия)

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. — ведущий специалист отдела программного обеспечения компании «Совзонд».

## Результаты космического радарного мониторинга смещений и деформаций зданий и сооружений в Астане

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящей статье приводятся результаты космического радарного интерферометрического мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений в столице Казахстана Астане в период с 2011 по 2013 г.

Приводятся параметры 30 космических радарных съемок со спутников COSMO-SkyMed-1-4 (e-GEOS, Италия), выполненных в период с 18.06.2011 г. по 20.04.2013 г.

Дается краткое описание теоретических основ технологии радарного интерферометрического выявления смещений земной

поверхности, а также ее практической полуавтоматизированной реализации в виде методики интерферометрии парных постоянных рассеивателей PSP-IfSAR (e-GEOS, Италия).

Приводятся основные результаты мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений в Астане за период с 18.06.2011 г. по 20.04.2013 г.

Проект был выполнен совместно ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦ КИТ» (Казахстан) и компанией «Совзонд» (Россия).

### **КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ЕЕ МНОГОПРОХОДНЫХ ВАРИАЦИЙ SBAS, PS И PSP**

Авторы считают необходимым привести историю появления и краткие теоретические основы радарной интерферометрии как метода мониторинга смещений земной поверхности.

Изобретателем метода радарной интерферометрии является D. Richman, который впервые в 1971 г., будучи сотрудником United Technologies Corporation (США), объединяющей в себе такие крупнейшие компании, как Boeing, Sikorsky, Pratt & Whitney и др., зарегистрировал патент США «Three Dimensional, azimuth-correcting mapping radar». Патент был сразу же засекречен, поскольку предложенная технология позволяла строить высокоточные (с метровыми точностями) цифровые модели местности и рельефа (ЦММ и ЦМР), а также отслеживать изменения рельефа и смещения земной поверхности с сантиметровыми и даже миллиметровыми точностями, причем сами радарные съемки, служащие основой для мониторинга, могли выполняться как с авиационных, так и с космических носителей независимо от облачности и освещенности. Когда в начале 1980-х гг. к открытию данной технологии вплотную

подшли многие другие исследователи из США и Европы, патент был рассекречен и опубликован в 1982 г.

В течение 1980-х гг. исследователи R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner и F. Li проводили активную научно-исследовательскую работу по созданию практических методик интерферометрической обработки радарных снимков. Выполнялись как теоретические исследования, так и практические эксперименты по обработке данных авиационных радарных съемок, а также моделирование обработки будущих космических радаров с синтезированной апертурой (PCA или SAR).

Широкое применение спутниковых радарных данных началось в 1991 г. с запуском спутника ERS-1 (Европейское космическое агентство) с PCA на борту. С тех пор было запущено большое количество коммерческих и научных радарных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Большое количество средств наблюдений, радарных спутников, обусловило скачкообразный рост числа проектов, выполняемых с использованием радарных данных ДЗЗ, большую часть которых составляют проекты, основанные на технологии радарной интерферометрии.

Приведем далее краткие физические основы радарной съемки и краткие основы метода радарной интерферометрии.

Входными данными для обработки в специализированных программных комплексах являются интерферометрическая пара (либо многопроходная серия) радарных снимков. В общем случае интерферометрическая обработка пары снимков состоит из нескольких базовых шагов:

1. Совмещение основного и вспомогательного радарных изображений интерферометрической пары (в автоматическом режиме либо с ручным вводом контрольных точек).
2. Генерация интерферограммы, являющейся результатом комплексного поэлемент-

ного перемножения основного изображения и вспомогательного изображения, геометрически совмещенного с основным.

3. Вычитание из интерферограммы синтезированной фазы рельефа, рассчитанной из имеющейся ЦМР или ЦММ, либо модели эллипсоида, либо путем задания средней по площади снимка высотной отметки (для равнинных областей) с получением на выходе дифференциальной интерферограммы, на которой один полный спектр цветов (интерференционный цикл) соответствует смещениям земной поверхности, равным половине длины волны радиолокатора.

4. Фильтрация интерферограммы, позволяющая в определенной степени уменьшить фазовый шум (помехи) за счет закругления выходной модели смещений земной поверхности.

5. Получение файла когерентности (корреляции фаз) для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей.

6. Развертка фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным) и устранение разрывов фазы с отсечением по порогу когерентности.

7. Коррекция значения орбитальных параметров спутника по наземным контрольным точкам.

8. Преобразование абсолютных значений фазы в смещения земной поверхности в миллиметрах.

Полная цепочка интерферометрической обработки, а также многие другие дополнительные функции реализованы в программном комплексе SARscape (Exelis VIS, США), являющемся набором дополнительных модулей программы ENVI (Exelis VIS, США). Эксклюзивным дистрибьютором этих программных продуктов на территории России и СНГ является компания «Совзонд».

Для анализа не пар, а многопроходных цепочек интерферометрических радарных

снимков в SARscape реализованы различные модификации радарной интерферометрии. Для мониторинга смещений и деформаций в Астане нами были применены технологии интерферометрии серий малых базовых линий (Small Baselines Series interferometry, или сокращенно SBAs), интерферометрии постоянных рассеивателей (Persistent Scatterers Interferometry) и парных постоянных рассеивателей (PSP-IfSAR), реализованных в программных комплексах ENVI-SARscape (Exelis VIS, США) и PSP-IfSAR (e-GEOS, Италия). Основные результаты получены с использованием технологии PSP-IfSAR. Результаты обработки по методикам PS и SBAs дополнили основной результат.

Интерферометрия серий малых базовых линий представляет собой метод автоматизированной обработки большого количества интерферометрических пар многопроходной серии. Метод позволяет значительно увеличить вклад статистики в финальный результат за счет обработки всех возможных пар снимков, в том числе перекрещивающихся во времени, с ограничением по величине пространственных и временных баз. При этом в итоге также восстанавливается последовательная хронология смещений от первого снимка цепочки до последнего.

Данный метод наилучшим образом подходит для анализа смещений площадных объектов (распределенных целей). В условиях города данный метод работает хуже, поскольку пространственно фаза в городских условиях «загрязнена» чередующимися эффектами переналожения и радарной тени от сооружений, что вызывает частое чередование высоко- и низкокогерентных участков и препятствует развертке фазы.

В случае анализа точечных, а не площадных распределенных целей, процедура пространственной развертки фазы не проводится, поэтому для условий города

(т. е. большого количества точечных высококогерентных целей, которыми являются здания и сооружения и отдельные их части) лучше подходят точечные методы PS и PSP-IfSAR.

Технология PS характеризуется точностью оценки смещений 2–4 мм по высоте. Входными данными для гарантированно успешной обработки должны являться не менее 30 снимков одной и той же территории за разные даты, сделанных в одной и той же геометрии съемки спутникового радара. В процессе обработки программой автоматическим выбирается основное изображение, на которое автоматически, с точностью до 1/100 пикселя, корегистрируются остальные снимки интерферометрической цепочки. Далее программа строит интерферограммы по каждой паре снимков. Затем для каждой пары оцениваются величины когерентности. Также для каждой пары строятся карты величин стандартных отклонений амплитуд снимков.

Затем программой определяются точки — постоянные (или устойчивые) рассеиватели радарного сигнала. Для выбора точек используется несколько порогов (порог корреляции амплитуд, порог когерентности, пространственное стандартное отклонение смещений первой итерации и т. д.). После того как постоянные рассеиватели определены, для них выполняется процедура оценки фазовых разностей и мультитременной развертки фазы. Именно в разности фаз каждого снимка «защита» величина смещений за период между съемками этих снимков.

Таким образом, для каждой из выбранных точек восстанавливается хронология изменения фазы во времени, которая затем математически пересчитывается в смещения в миллиметрах. Дополнительно в процессе обработки применяется специальный фильтр, удаляющий возможное влияние атмосферы на интерферометрическую фазу.

Результатом обработки является векторный файл точек, в атрибутах которых записаны:

- \* смещения на каждую дату съемки;
- \* среднегодовая скорость смещений за весь период наблюдений;
- \* суммарная величина смещений;
- \* когерентность;
- \* высота над эллипсоидом WGS-84.

Технология PSP-IfSAR является усовершенствованной модификацией вышеописанной технологии PS. Усовершенствование, разработанное в 2009 г. М. Costantini и др., заключается в следующем:

- \* Результаты интерферометрической обработки нередко осложнены различными факторами, дающими системную ошибку определения смещений, возрастающую от одного конца снимка к другому. К таким помехам можно отнести влияние неточности знания орбит спутника, влияние непараллельности орбит спутника, атмосферные артефакты и др.

\* Различные вариации технологий интерферометрической обработки, в том числе вышеописанные PS, SBAs и др. предлагают различные решения по удалению вышеуказанных систематических ошибок.

\* В рамках наиболее поздней из модификаций интерферометрических технологий, методики PSP IfSAR, предлагается инновационный подход, позволяющий удалить эти систематические ошибки за счет дополнительной совместной обработки пар соседних постоянных отражателей (вышеуказанные систематические ошибки характеризуются низкочастотной пространственной изменчивостью, поэтому совместная обработка именно соседних друг с другом отражателей позволяет избавиться от этих ошибок).

\* Дополнительным преимуществом данной технологии является большая максимально достижимая плотность точек — до 30 000 точек/кв. км (для плотно застроенных

территорий и при использовании съемок сверхвысокого разрешения).

### **ДАТЫ СЪЕМОК COSMO-SKYMED И КАРТА ПОКРЫТИЯ ИМИ АСТАНЫ**

Из находящихся сегодня на орбите радарных спутников наиболее оптимальной для решения задач мониторинга смещений и деформаций земной поверхности и сооружений авторам представляется уникальная спутниковая группировка из четырех радарных спутников-близнецов COSMO-SkyMed-1-4 (e-GEOS, Италия). Дистрибутором данных с этой группировки спутников в России и СНГ является компания «Совзонд». Именно с использованием данных этой спутниковой группировки в период с 2011 по 2013 г. выполнен проект по мониторингу смещений и деформаций зданий и сооружений в Астане.

Исходными данными для обработки служили снимки COSMO-SkyMed-1-4. Снимки были выполнены в режиме съемки HiImage (пространственное разрешение 3 м, размеры сцены 40x40 км, поляризация HH). Даты съемок приведены в табл. 1. Карта покрытия территории Астаны и участка 10x10 км, определенного заказчиком для более детального анализа, данными съемок COSMO-SkyMed-1-4 показана на рис. 1.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СО СПУТНИКОВ COSMO-SKYMED-1-4**

Для обработки по методу PSP-IfSAR был выбран участок территории Астаны размерами 10x10 км (рис. 1), в границах которого находятся все основные объекты, построенные в последнее десятилетие. На обрабатываемом участке размерами выявлено 442 000 точек — постоянных рассеивателей радарного сигнала, т. е. в среднем 4420 точек/кв. км. На некоторых локальных участках плотной застройки

№ п/п	Дата съемки
1	2011.06.18
2	2011.07.04
3	2011.07.20
4	2011.08.05
5	2011.08.21
6	2011.09.06
7	2011.09.22
8	2011.10.08
9	2011.10.24
10	2012.01.12
11	2012.02.05
12	2012.02.29
13	2012.04.01
14	2012.04.25
15	2012.05.19
16	2012.06.04
17	2012.06.20
18	2012.07.06
19	2012.07.22
20	2012.08.07
21	2012.08.23
22	2012.09.08
23	2012.09.24
24	2012.10.26
25	2012.11.27
26	2012.12.29
27	2013.02.19
28	2013.03.19
29	2013.04.04
30	2013.04.20

Табл. 1. Даты съемок COSMO-SkyMed

количество точек достигало величин более 10 000 точек/кв. км. Для каждой точки вычислены величины смещений в миллиметрах по состоянию на каждую дату съемки. Дополнительно рассчитаны среднегодовая скорость смещений в миллиметрах в год, а также высота в метрах над эллипсоидом WGS-84.

Далее приведем несколько выявленных случаев смещений и деформаций.

На рис. 2 показана динамика деформаций центральной северо-западной части моста

по ул. Шалкыма. На рис. 3 приведены деформации высотного здания национального медиацентра. На рис. 4 — деформации западного здания комплекса зданий Казахстанских железных дорог. На рис. 5 — деформации северного здания АЖК «Изумрудный квартал». На рис. 6 — динамика оседаний восточного крыла малоэтажного дома № 13 по ул. Ай-Тансык (угол с ул. Ермаков). На рис. 7 — динамика оседаний и/или деформаций южного и центрального высотных зданий ЖК «Лазурный квартал» по ул. Сарайшык (линейный тренд до 2 см за 2 года), а также пешеходного участка дороги вдоль ул. Сарайшык (до 1 см за 2 года).

На рис. 8 представлены оседания и/или деформации центрального пролета дома № 85 по ул. Темирказык. Стабильное здание ТК «Хан Шатыр» и динамика оседающих зданий небоскребов к югу от него приведены на рис. 9. Динамика оседаний одного из малоэтажных зданий в районе перекрестка ул. Жагоркызы и Карашаш ана приведена на рис. 10. Наиболее интенсивно оседающий объект на всем рассматриваемом участке 10x10 км, одно из зданий Акмолинской ТЭЦ-2, приведен на рис. 11. Возможно, его оседания вызваны

добычей грунтовых вод, необходимых для охлаждения градирен (охладительных башен) ТЭЦ. Динамика оседаний и/или деформаций зданий ЖК «Фаворит» (угол проспекта Богенбай-Батыра и ул. Торайгырова) приведена на рис. 12.

Приведем далее некоторые примеры стабильных (не оседающих и не деформирующихся) за рассматриваемый период 2011–2013 гг. зданий и сооружений. На рис. 13 приведено трехмерное отображение стабильных рассеивателей на зданиях ЖК «Триумф Астаны» (справа на переднем плане) и доме № 14/1 по проспекту Турана (слева на переднем плане), а также на зданиях школы № 17, ЖК «Ак орда премиум» и ЖК «Радуга» (на заднем плане). Также другие здания между проспектом Турана (слева) и проспектом Кабанбай Батыра (справа).

На рис. 14 показаны стабильные здания ЖК «Нурсая 1» (на переднем плане), бизнес-центр «Астаналык» и ЖК «Новый мир» (по центру), ЖК «Арайлым», «Премиум» и «Версаль» (на заднем плане), а также стабильные рассеиватели на дорожной развязке ул. Орынбор и Сарайшык.



Рис. 1. Карта покрытия территории Астаны и участка 10x10 км, определенного заказчиком для более детального анализа (зеленый контур) данными съемок COSMO-SkyMed-1-4 (голубые контуры)

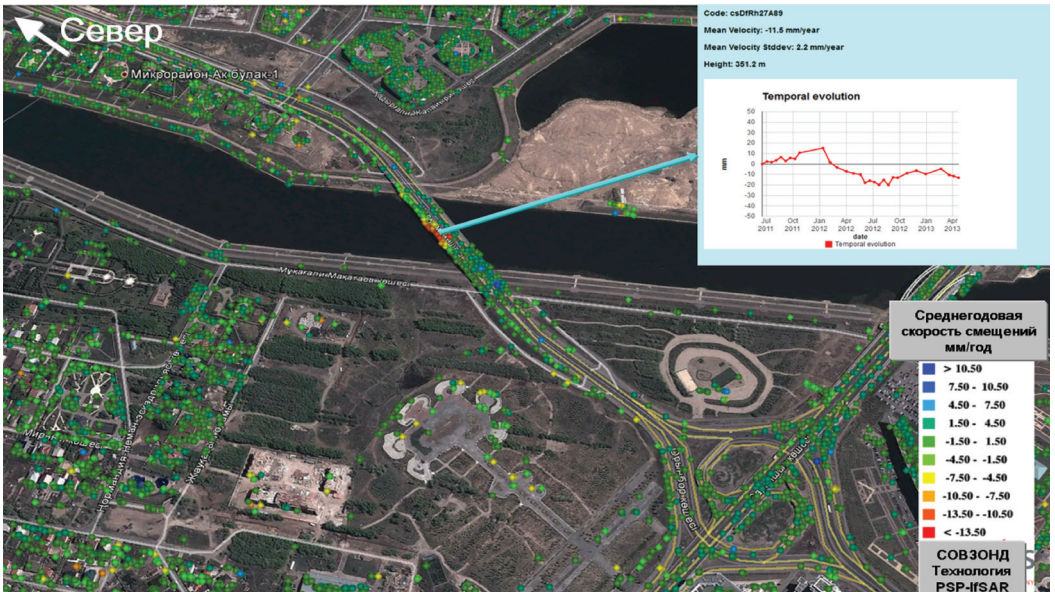


Рис. 2. Деформации центральной северо-западной части моста по ул. Шалкыма. Справа сверху — график динамики оседаний в миллиметрах по датам. Заметен монотонный тренд оседаний, осложненный сезонными термическими деформациями (локальные поднятия зимой и ускоренные оседания летом)

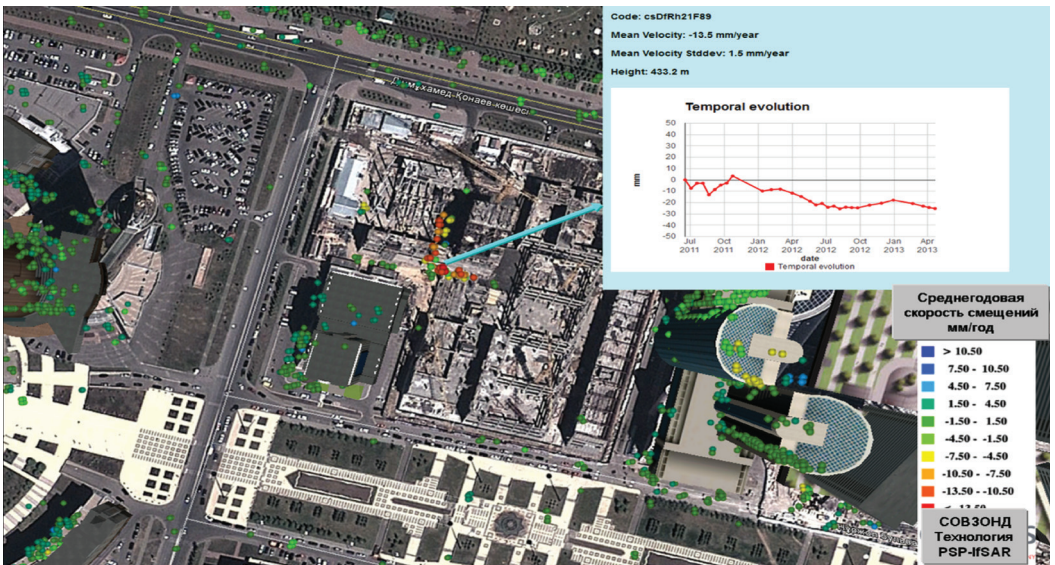


Рис. 3. Деформации в миллиметрах высотного здания (предположительно здания национального медиацентра) высотой около 90 м, находящегося примерно в 25 м к северо-востоку от угла здания Назкоммерцбанка (ул. Кунаева, 2). Подложка из Google Earth (снимок за октябрь 2011 г.) — здание еще строится. Рассеивателями отблится западная и южная части здания, обращенные навстречу лучу радара. Справа сверху — график динамики деформаций

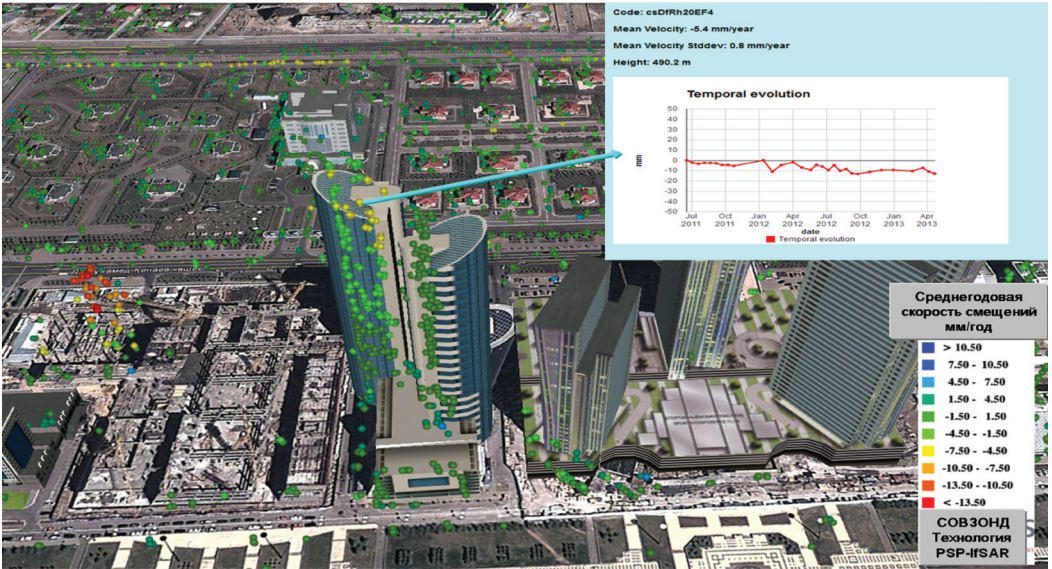


Рис. 4. Динамика незначительных деформаций (до 1 см за 2 года) верхней части западного здания Казахстанских железных дорог (ул. Кунаева, 6)

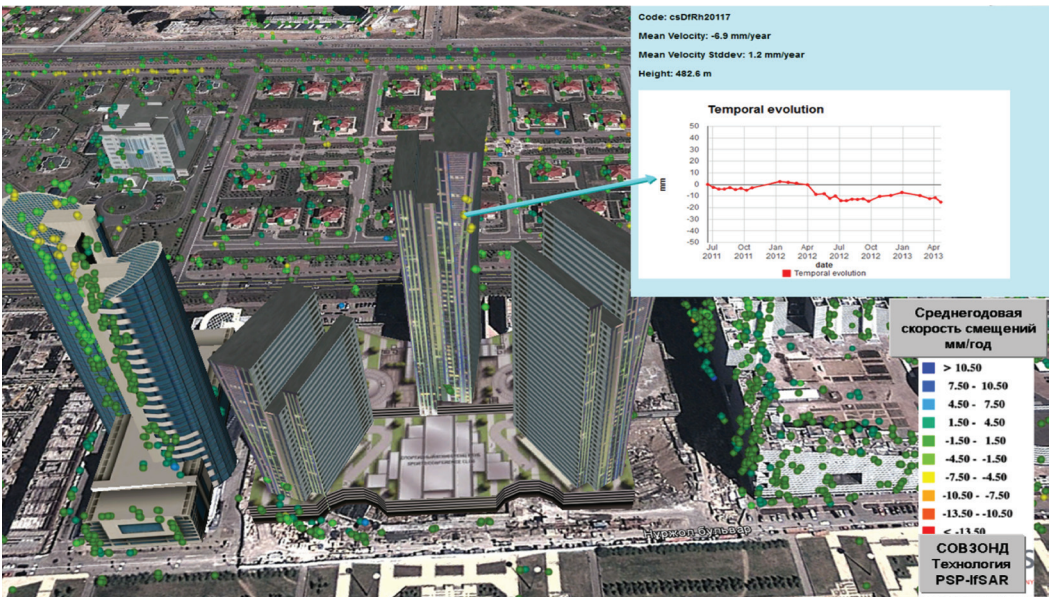


Рис. 5. Динамика незначительных деформаций (около 1 см за 2 года) средней части северного здания АНК «Изумрудный квартал». Рассеивателей на этих зданиях определено не так много, поскольку они находятся в области радарной тени от зданий Казахстанских железных дорог. В графике оседаний заметен как монотонный тренд (постоянные оседания либо деформации), так и сезонные термические деформации (оседания волнообразные, с временными поднятиями зимой и ускоренными оседаниями летом)



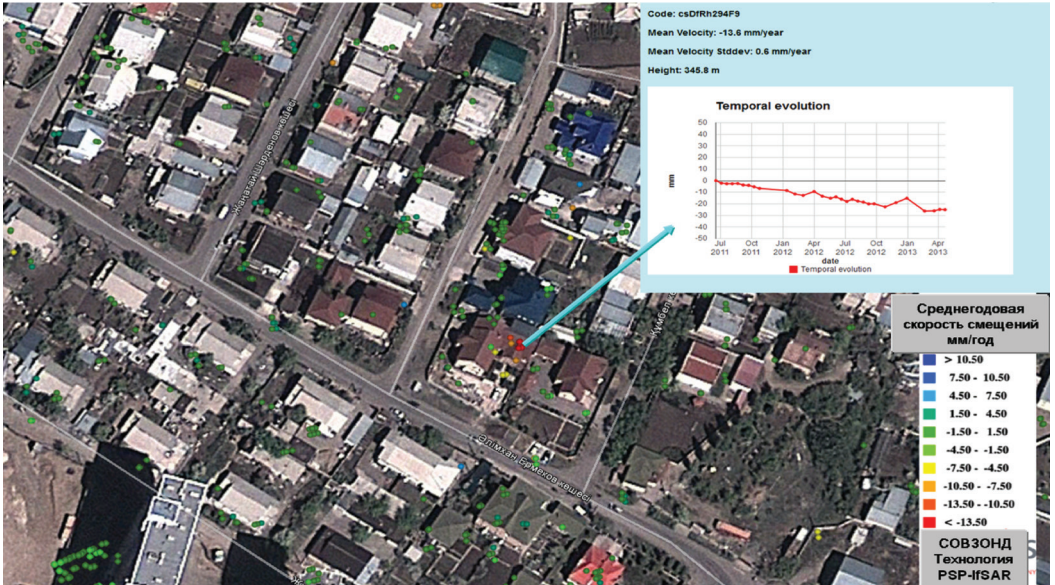


Рис. 6. Динамика оседаний восточного крыла малоэтажного дома № 13 по ул. Ай-Тансык (угол с ул. Ерменов). Ярковыраженный линейный тренд оседаний до 3 см за 2 года

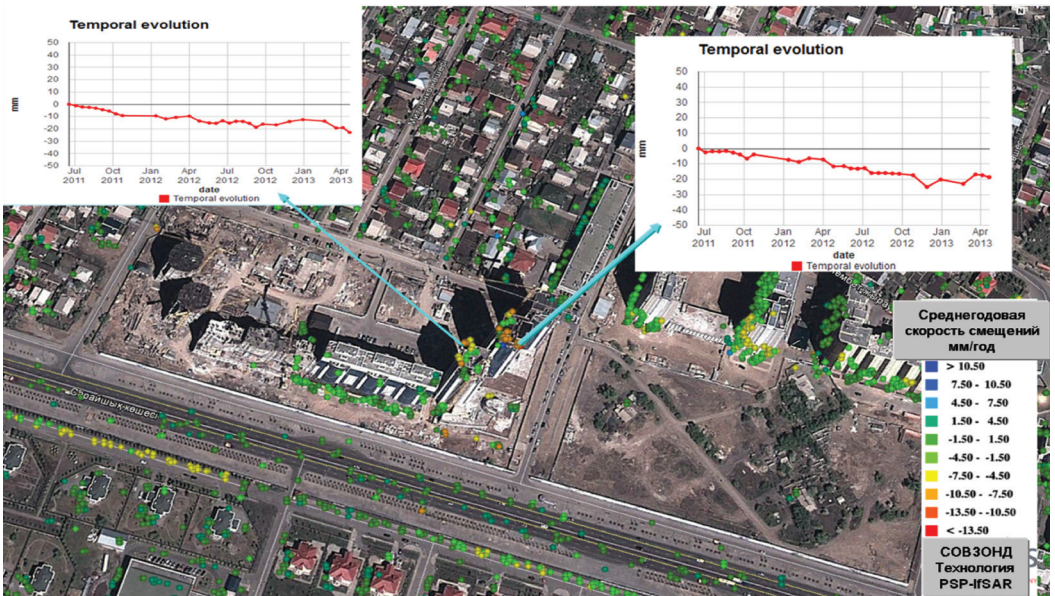


Рис. 7. Динамика оседаний и/или деформаций южного и центрального высотных зданий ЖК «Лазурный квартал» по ул. Сарайшык (линейный тренд до 2 см за 2 года). В левом нижнем углу — оседания пешеходного участка дороги вдоль ул. Сарайшык (до 1 см за 2 года)

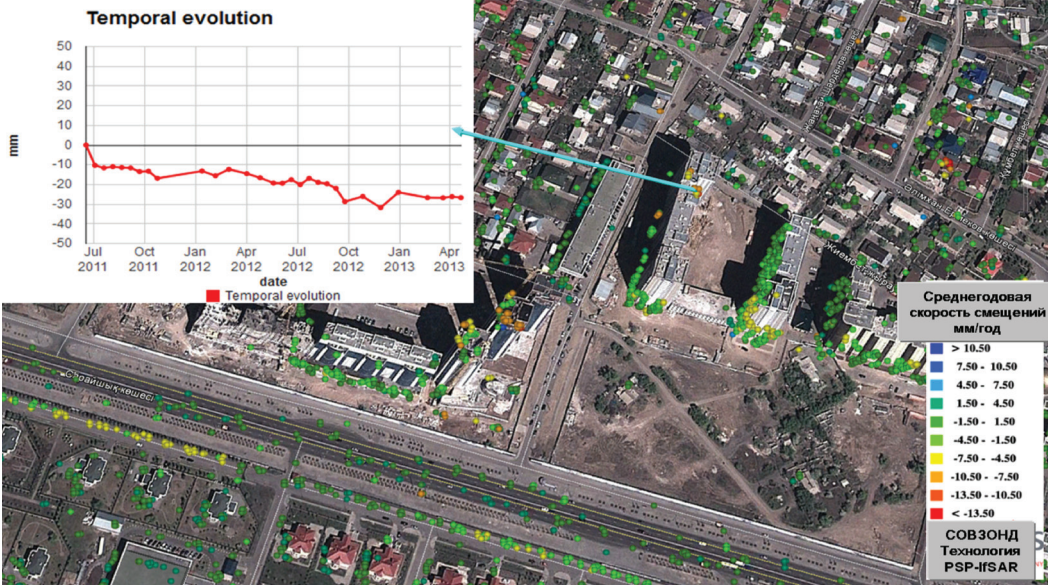


Рис. 8. Оседания и/или деформации центрального пролета дома № 85 по ул. Темирказык

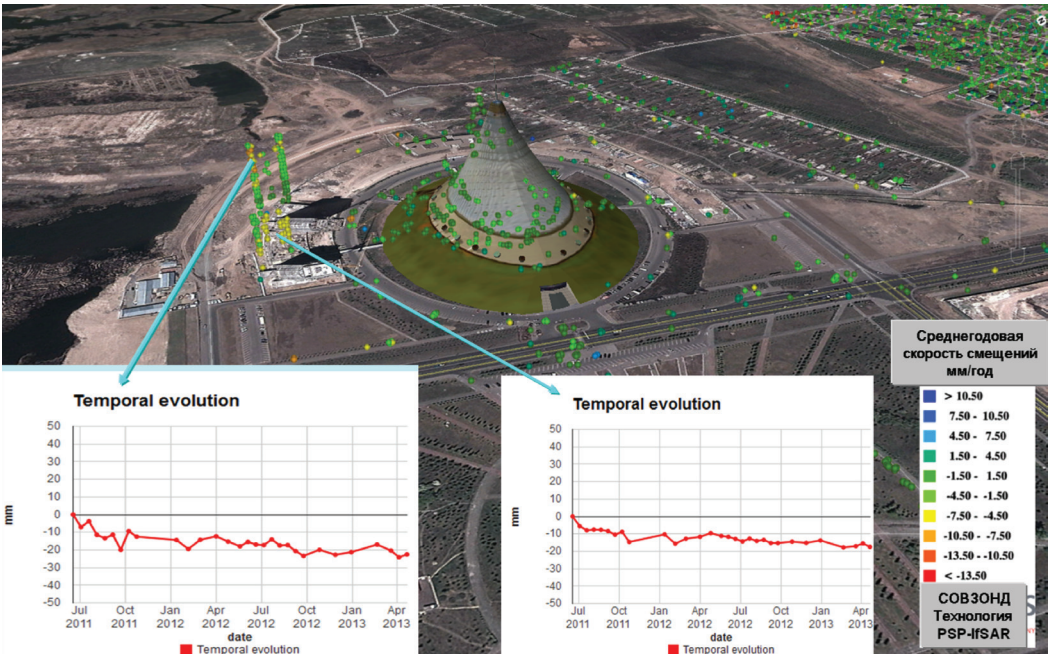


Рис. 9. Стабильное здание ТК «Хан Шатыр» и динамика оседающих зданий небоскребов к югу от него

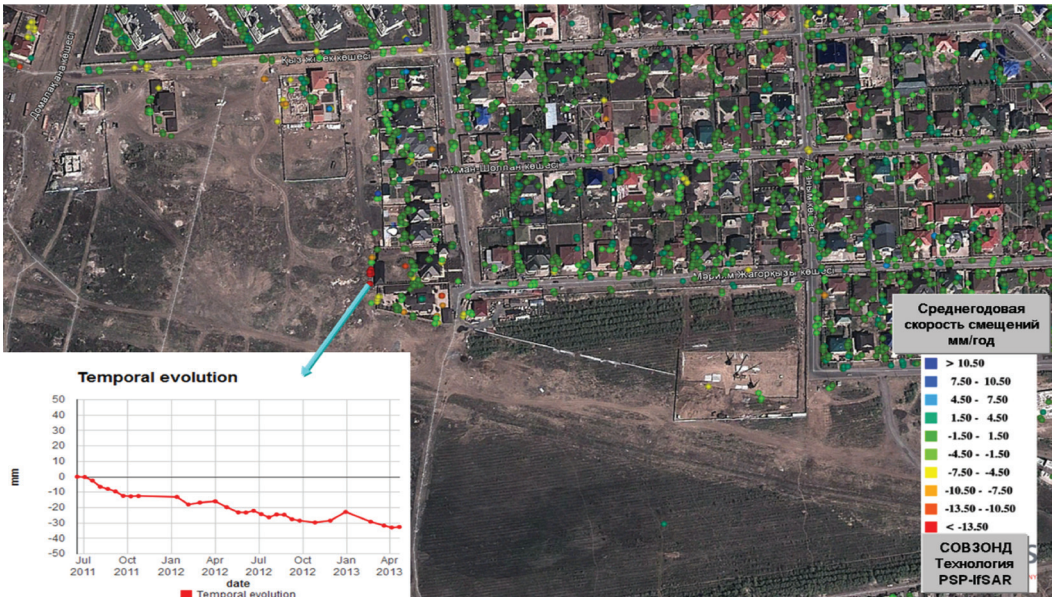


Рис. 10. Динамика оседаний одного из малоэтажных зданий в районе перекрестка ул. Жагоркызы и Карашаш ана

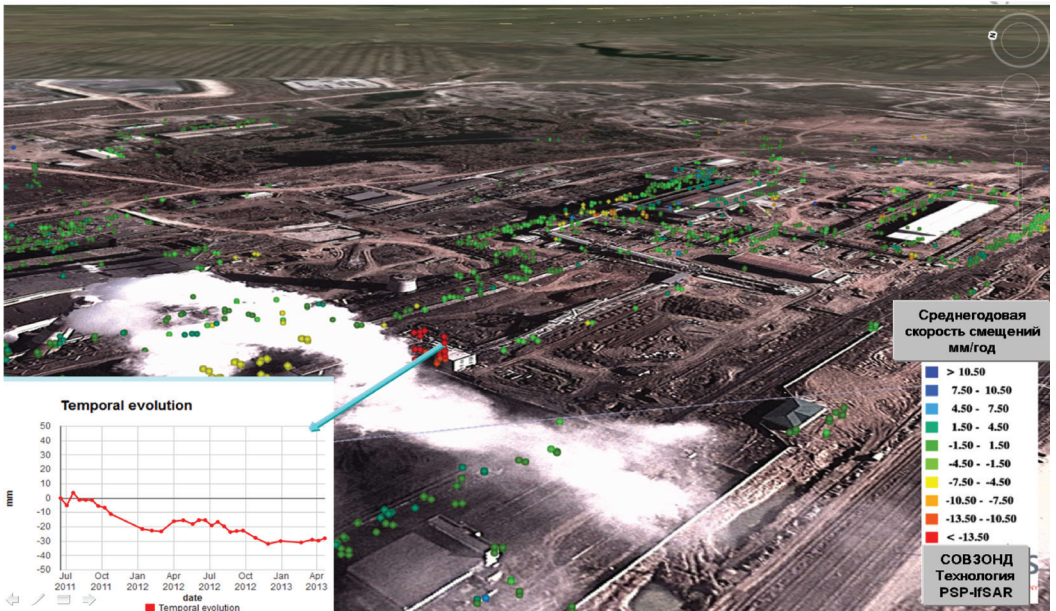


Рис. 11. Динамика оседаний одного из зданий Акмолинской ТЭЦ-2 — до 4 см за 2 года. Наиболее интенсивно оседающее здание на всем рассматриваемом участке 10х10 км г. Астаны

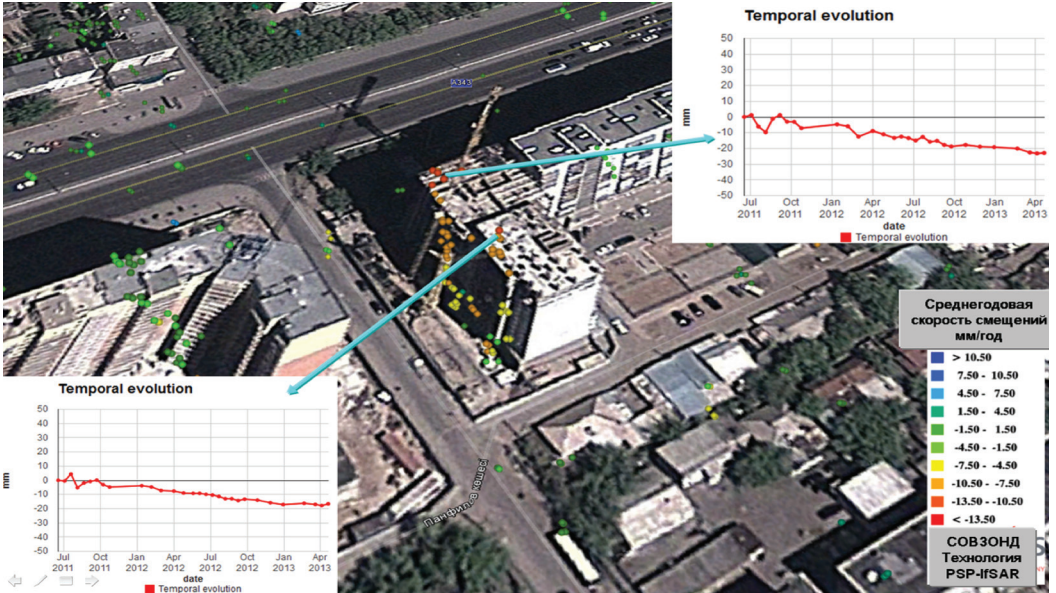


Рис. 12. Динамика оседаний и/или деформаций зданий ЖК «Фаворит» (угол проспекта Богенбай-Батыра и ул. Торайгырова)

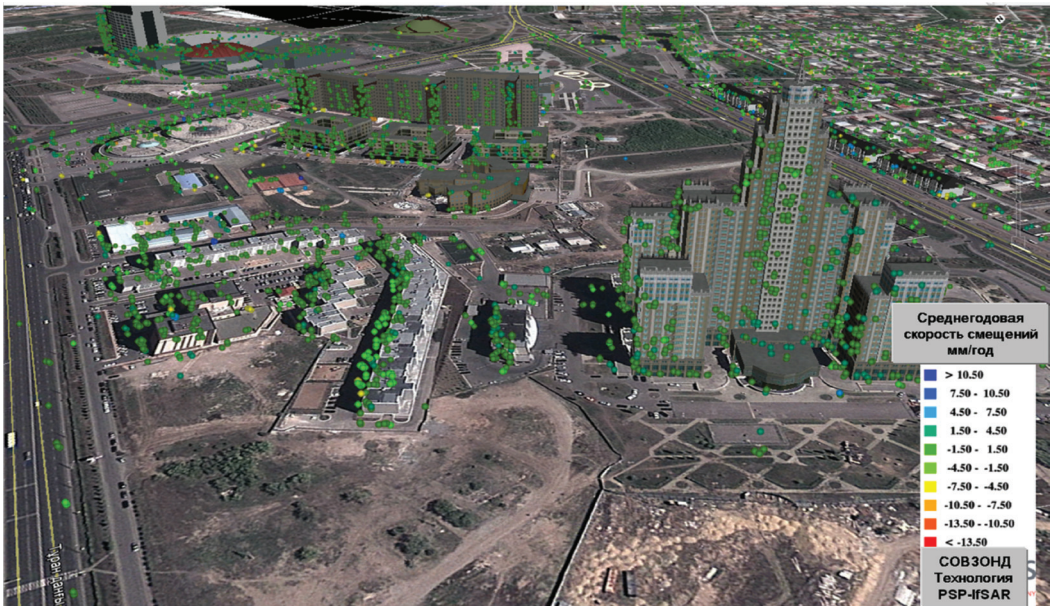


Рис. 13. Трехмерное отображение стабильных рассеивателей на зданиях ЖК «Триумф Астаны» (справа на переднем плане) и доме № 14/1 по проспекту Турана (слева на переднем плане), а также на зданиях школы № 17, ЖК «Ал орда премиум» и ЖК «Радуга» (на заднем плане). Также другие здания между проспектом Турана (слева) и проспектом Кабанбай Батыра (справа)



Рис. 14. Стабильные здания ЖК «Нурсая 1» (на переднем плане), бизнес-центр «Астаналы» и ЖК «Новый мир» (по центру), ЖК «Арайлым», «Премиум» и «Версаль» (на заднем плане). Также стабильные рассеиватели на дорожной развязке ул. Орынбор и Сарайшык

На рис. 15 приведено трехмерное отображение стабильных постоянных рассеивателей на зданиях Дома министерств (по центру), Верховного суда (слева сверху), парламентского комплекса и администрации президента (высотные здания на втором плане) и резиденции президента Казахстана (на заднем плане). Также показаны стабильные отражатели вдоль набережной.

На рис. 16 показаны стабильные рассеиватели на мосту по ул. Сарайшык (по центру) и на зданиях на заднем плане. На рис. 17 приведены стабильные рассеиватели на зданиях ледового дворца «Алау» (справа), футбольного стадиона «Астана арена» (слева) и велотрека «Сары-Арка» (задний план).

На рис. 18 показаны стабильные рассеиватели на зданиях охладительных башен Акмолинской ТЭЦ-2. На рис. 19 приведено

трехмерное отображение стабильных рассеивателей на зданиях центрального стадиона им. К. Мунайтпасова и на других зданиях в районе угла проспекта Женис и ул. Кенесары. На рис. 20 показано трехмерное отображение стабильных рассеивателей на зданиях ЖК «Гранд Алатау» и близлежащих зданиях в районе угла ул. Желтоксан и Рыскулова. На рис. 21 приведено трехмерное отображение стабильных рассеивателей на здании мечети Нур Астана и динамика смещений для одной из частей ее конструкции. Заметны незначительные сезонные смещения — деформации, но тренд стабилен.

Весь векторный файл точек — постоянных рассеивателей радарного сигнала, рассчитанных на участок 10x10 км территории Астаны, передан заказчику в цифровом виде в форматах \*.shp и \*.kmz.



Рис. 15. Стабильные рассеиватели здания Дома министерств (по центру), Верховного суда (слева сверху), парламентского комплекса и администрации президента (высотные здания на втором плане) и резиденции президента Республики Казахстан (на заднем плане). Стабильные отражатели вдоль набережной



Рис. 16. Стабильные рассеиватели на мосту по ул. Сарайшык (по центру) и на зданиях на заднем плане

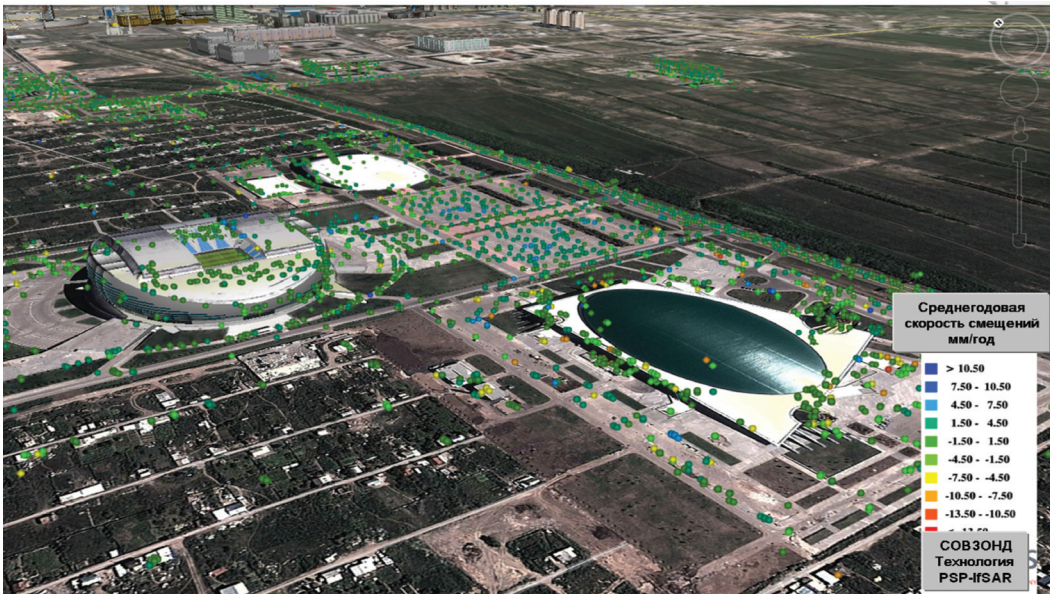


Рис. 17. Стабильные рассеиватели на зданиях ледового дворца «Алау» (справа), футбольного стадиона «Астана арена» (слева) и велотрека «Сары-Арка» (задний план)

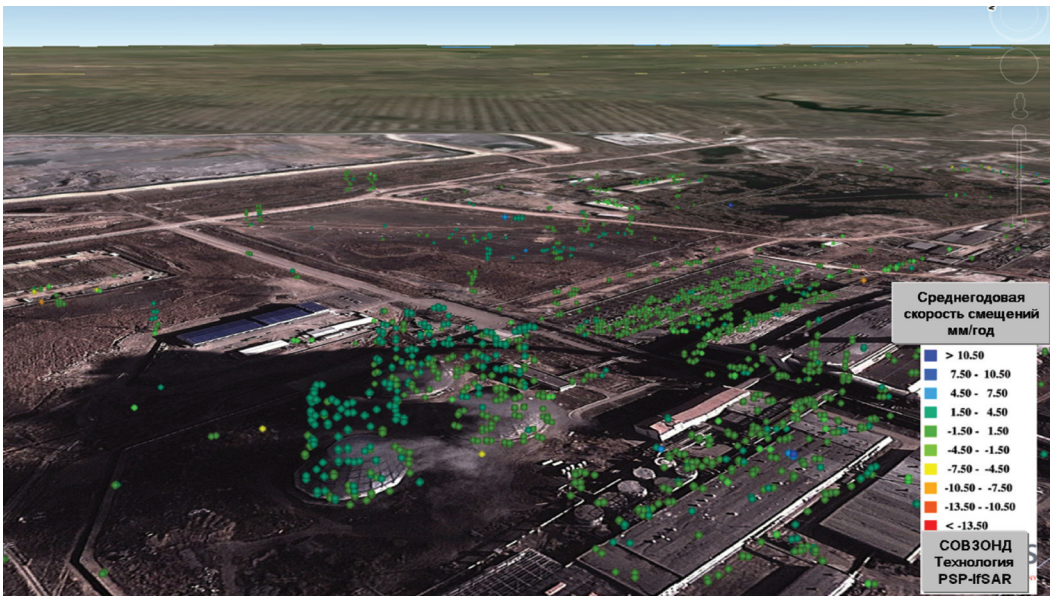


Рис. 18. Стабильные (зеленого цвета) и незначительно поднимающиеся (голубого цвета) рассеиватели на зданиях охладительных башен Анмолинской ТЭЦ-2

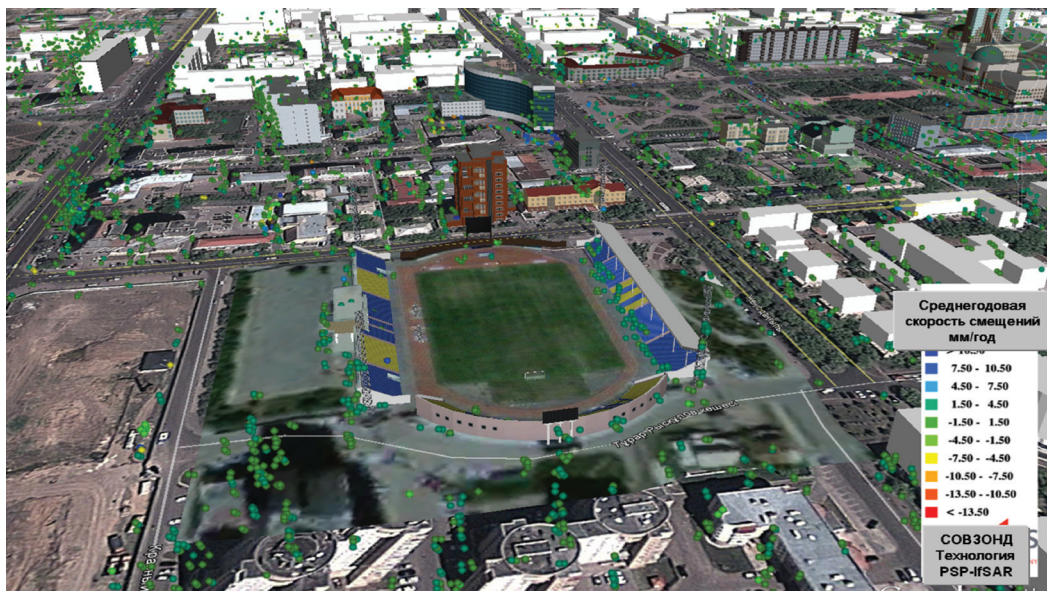


Рис. 19. Трехмерное отображение стабильных рассеивателей на зданиях центрального стадиона им. К. Мунайтпасова и на других зданиях в районе угла проспекта Женис и ул. Кенесары



Рис. 20. Трехмерное отображение стабильных рассеивателей на зданиях ЖК «Гранд Алатау» и близлежащих зданиях в районе угла ул. Желтоқсан и Рысқұлова



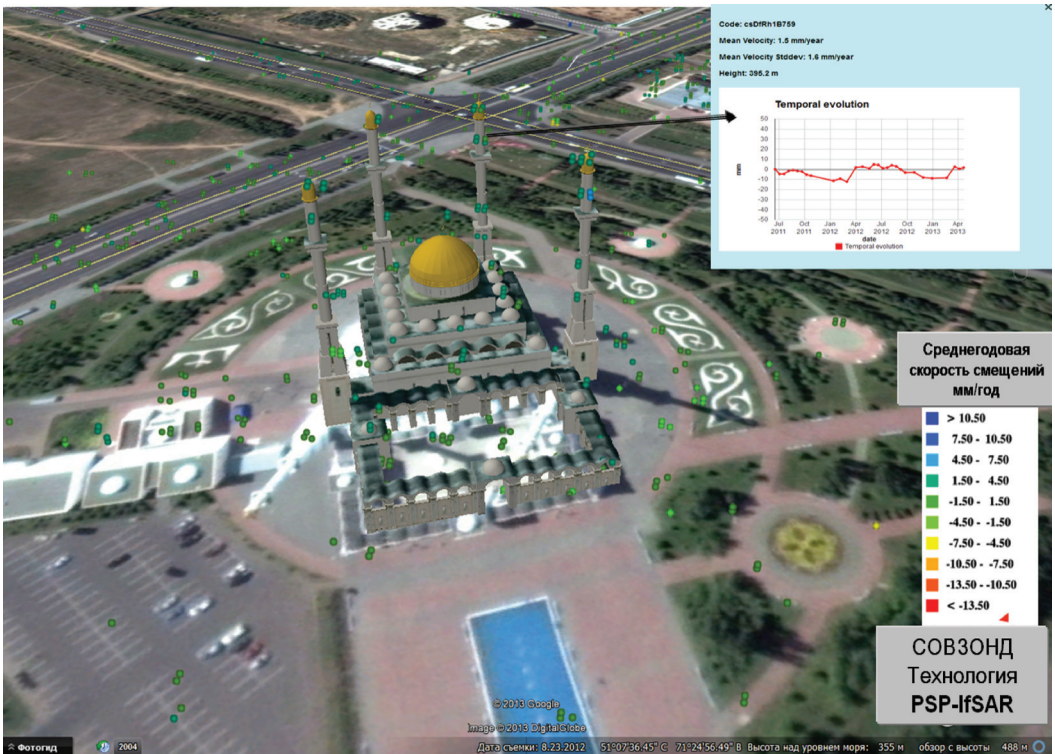


Рис. 21. Трехмерное отображение стабильных рассеивателей на здании мечети Нур Астана и динамика смещений для одной из частей ее конструкции. Заметны незначительные сезонные смещения — деформации, но тренд за 2011–2013 гг. стабилен

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам интерферометрической обработки радарных данных со спутников COSMO-SkyMed-1-4 на территорию Астаны получены независимые дистанционные данные о смещениях и деформациях земной поверхности и сооружений с миллиметровой точностью.

- \* Плотность точек — постоянных рассеивателей радарного сигнала составила в среднем 4420 точек/кв. км, на локальных участках достигающая величины более 10 000 точек/кв. км.
- \* Установлены отдельные оседающие и/или деформирующиеся здания и сооружения, в том числе выявлены деформации одного из мостов.

- \* Выявлены оседания отдельных сооружений Акмолинской ТЭЦ-2, вероятно, вызванные добычей грунтовых вод.

- \* Для каждого рассеивателя рассчитана среднегодовая скорость смещений за весь период наблюдений и скорость смещений по годам.

- \* Дополнительным атрибутом каждого постоянного рассеивателя является абсолютная высота, что позволило отобразить их на имеющихся в Google Earth трехмерных моделях зданий.

- \* Дальнейший мониторинг возможен на основе ежемесячных съемок (12 съемок в год) с ежемесячным, ежеквартальным или ежегодным обновлением карт смещений и деформаций.