

## ПЕРСПЕКТИВЫ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕОДЕФОРМАЦИЙ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

**И. Учитель**

ОАО “Одессгаз”

**В. Корбан**

Одесский национальный политехнический университет

**В. Ярошенко**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

**Б. Капочкин**

Одесская государственная академия связи

**Н. Кучеренко**

Одесский государственный экологический университет

**Ключевые слова:** асейсмические геодеформации, интерферометрия, альтиметрия.

### Постановка проблемы

Современный технический уровень геодинимического мониторинга, включающий региональные перманентные геодезические GPS-сети, глобальную и региональные сейсмометрические сети, спутниковые гравиметрические, альтиметрические и интерферометрические системы, позволили накопить достаточный объем пока разрозненных и эпизодических данных об асейсмичных реверсивных высокоамплитудных гедеформациях временного масштаба минуты – недели [1]. Разрушительные свойства этих гедеформаций как нового типа тектонических движений [2] требуют разработки новых технологий мониторинга, новых методических решений и приборных комплексов для их регистрации.

### Связь с важными научными и практическими заданиями

Глобальный характер высокоамплитудных асейсмических гедеформаций, их свойство пространственной локализации в условиях короткой продолжительности гедеформационного процесса существенно ограничивают применение методов геодинимического мониторинга. Разрушительные свойства таких гедеформаций, сопровождающихся в последнее время огромными трещинами, провалами, колебательными движениями грунта (амплитуда до 30 см), в том числе на территориях, считающихся асейсмичными, коренным образом изменили взгляды на оценку геодинимического риска территорий и в области сейсмозонирования территорий, регламентирующего сейсмостойкое строительство.

### Анализ последних достижений и публикаций

Известны циклические асейсмические гедеформации глобального масштаба с периодами, кратными и дольными 14 суткам [2]. Это периоды 28 суток, 14 суток, 7 суток, 3,5 суток. Установлено проявление с такими периодами условий растяжения и сжатия континентального масштаба. Показано, что сильнейшие землетрясения в разных частях земного шара фикси-

руются между пиковыми датами гедеформаций в Одессе, вне зависимости от эпицентрального расстояния.

Используя данные EUREF Permanent GNSS Network мониторинга (суточное осреднение данных), мы выделили гедеформации с разной длительностью. В качестве примера на рис. 1 показаны гедеформации в Италии и Словакии (1620-1622 GPS-недели, или 23.01.2011–05.02.2011гг). На рис. 1, б показано продолжительное (7–8 суток) реверсивное смещение пункта GPS-мониторинга (Banska Bystrica, Slovak Republic) на юго-восток примерно на 10 мм, предварявшееся вертикальными колебательными движениями с недельным периодом (амплитуда 40 мм). Такие гедеформации потенциально обладают разрушительными свойствами и их площадное распределение на грани возможностей спутниковой интерферометрии все-таки можно зафиксировать современными спутниковыми системами. В случае потенциально не менее разрушительных гедеформаций в п. Bologna, Italy (рис. 1, а) современные спутниковые системы, осуществляющие съемку не чаще чем через 2,5 суток, “не заметят” площадных особенностей подобных гедеформаций, хотя горизонтальные смещения в таком случае 30–31.01.2011 г. вдвое больше, по сравнению с гедеформациями в Словакии. Можно предполагать, что на рис. 1 приведены данные фиксации гедеформационного процесса, охватившего Словакию и Италию, но в Словакии этот процесс длился около двух недель, а в Италии – менее двух суток. Используя данные сейсмического мониторинга, мы выделили и классифицировали гедеформации асейсмического характера внутрисуточного масштаба. В качестве постулата применено положение о том, что аперриодические геодинимические процессы волнового характера с частотой менее 0,1 Гц нельзя классифицировать как объемные сейсмические волны землетрясений. Постулируется положение о том, что поверхностные волны Лява и Реллея с периодами более минуты отвечают собственным колебаниям (гедеформациям), генетически не связанным с разрывными гедеформациями (землетрясениями).

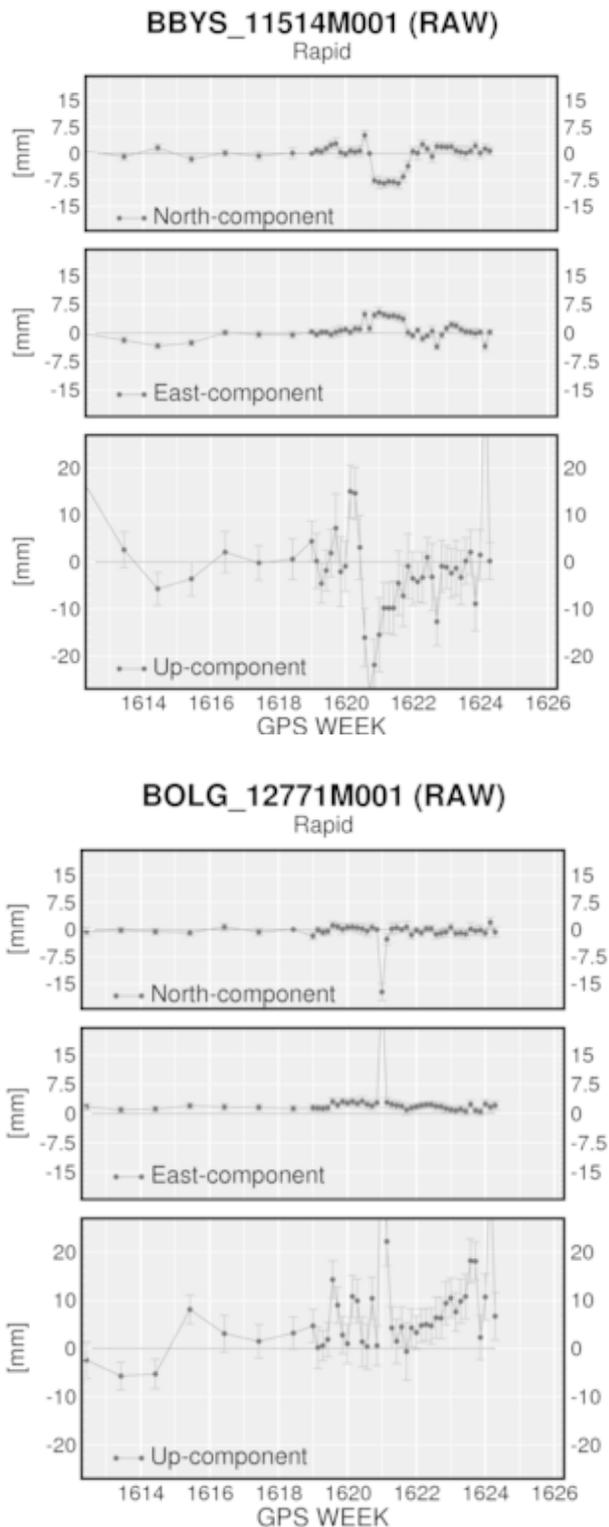


Рис. 1. Геодеформации по данным GPS-мониторинга (период осреднения – сутки)  
[http://www.epncb.oma.be/\\_dataproduts/products/timeseriesanalysis/residual.php](http://www.epncb.oma.be/_dataproduts/products/timeseriesanalysis/residual.php)

Используя данные глобальной сети сейсмического мониторинга ([www.epncb.oma.be](http://www.epncb.oma.be)), мы выделили геодеформации волнового характера, свободные и вынужденные, одиночные и цуги волн, длящиеся несколько минут и продолжающиеся часами. Выделены

геодеформации неволнового характера. Например, волновые геодеформации показаны на рис. 2.

Это вынужденные колебания с периодом примерно 10 минут и длительностью первого цуга (30 волн) – 5 часов и повторившегося после трехчасового перерыва вновь, с предшествующей частотой и амплитудой. Для качественной фиксации геодеформаций такого типа нужно сканирование земной поверхности с дискретностью не более двух минут. Вынужденные геодеформационные процессы (с незатухающей амплитудой) могут быть более сложными, например, результатом наложения двух и более гармоник.

Выделены и свободные геодеформации с фиксированной частотой, но меняющейся амплитудой (рис. 3). Период этих геодеформаций вдвое меньше и для их регистрации дискретность сканирования должна быть вдвое чаще.

По данным ([www.epncb.oma.be](http://www.epncb.oma.be)) сложно разделить подобные геодеформации на прогрессивные или стоячие, сфероидальные или торсионные (крутильные). Наряду с периодическими, фиксируются геодеформации неволнового характера, связанные с кратковременным выведением системы из стабильного состояния. Это могут быть скачки геодеформаций и более сложные геодеформационные процессы, частота которых не является константой. На рис. 4 показан скачек геодеформаций, начинающийся резким опусканием и продолжающийся более длительным компенсационным подъемом колебательного характера, с затухающей амплитудой. Весь процесс занимает примерно 3–4 минуты, и для фиксации его пространственного распространения необходима дискретность сканирования менее одной минуты.

Геодеформационные скачки могут быть разной длительности и амплитуды. На рис. 5 показан деформационный скачек, начинающийся квазипериодическими высокочастотными колебаниями, переходящими в деформационный скачек. Весь деформационный процесс длится примерно 10 минут. Детальное рассмотрение рис. 2 позволяет выделить аналогичные геодеформации, формирующиеся на фоне вынужденных волновых геодеформаций с периодом 10 минут.

Такие высокочастотные вступления геодеформаций могут быть представлены несколькими периодами (рис. 6), а весь деформационный процесс занимает примерно 50 минут. Зафиксированы случаи, когда высокочастотные колебания подобного типа могут длиться более суток, однако с разрывными геодеформациями (землетрясениями) они не связаны.

Наконец, фиксируются и более сложные геодеформации (рис. 7). С первого взгляда они квазипериодичны, однако за счет наложения разных процессов идентичность трех циклов нарушена. Важно отметить, что глобальная сеть сейсмологических измерений, фиксируя приведенные геодеформации, не подтверждает их фиксацию хотя бы кустом из трех-четырех сейсмостанций, что типично для сейсмических волн землетрясений. В то же время нужно отметить, что энергия этих колебаний соответствует энергии землетрясений с магнитудой 6 и более.

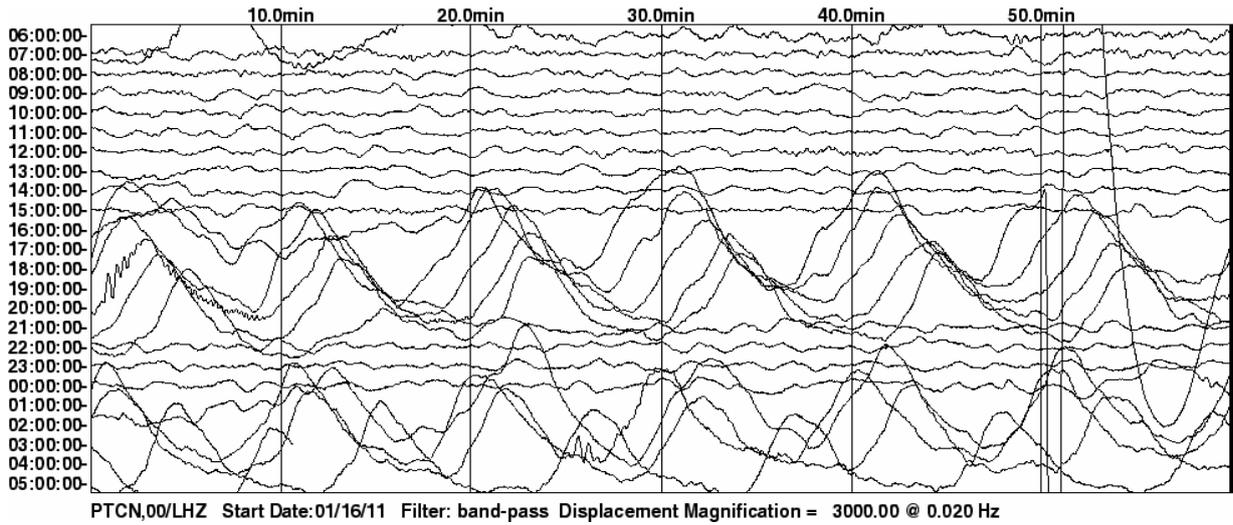


Рис. 2. Два цуга вынужденных геодеформаций с периодом около 10 минут

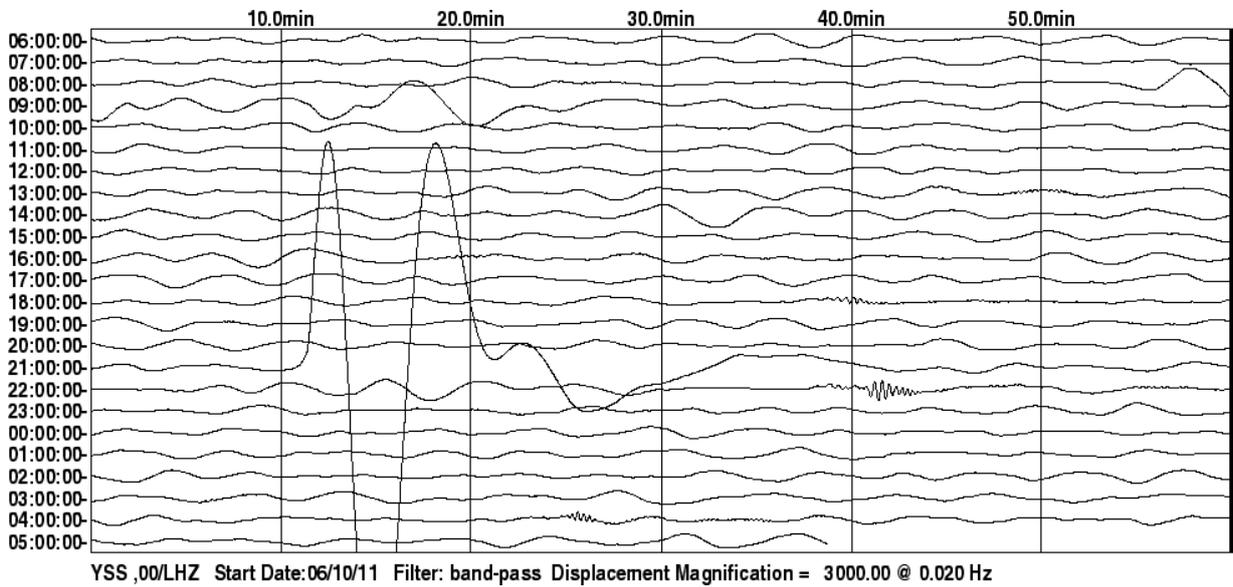


Рис. 3. Свободные геодеформации с периодом около 5 минут

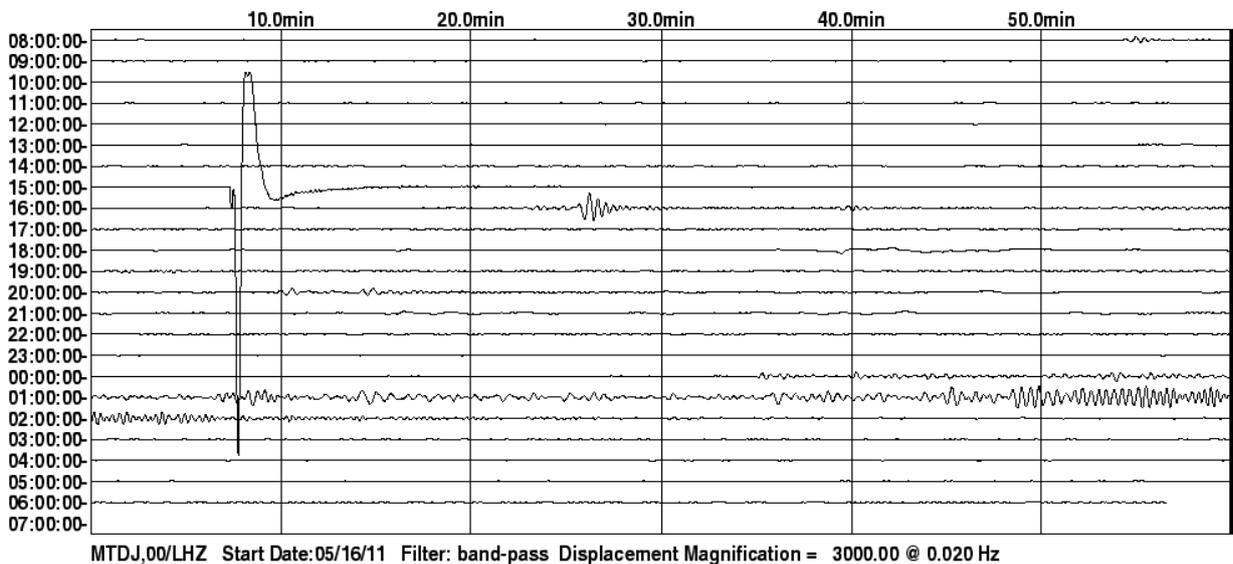


Рис. 4. Геодеформационный скачек

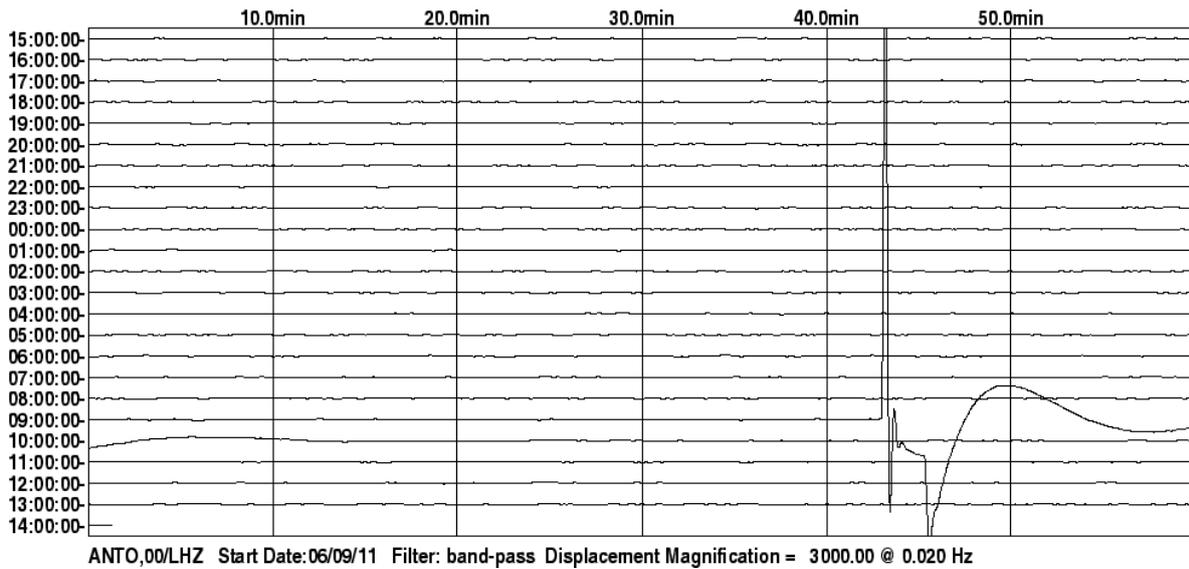


Рис. 5. Высокочастотные колебания, переходящие в деформационный скачек

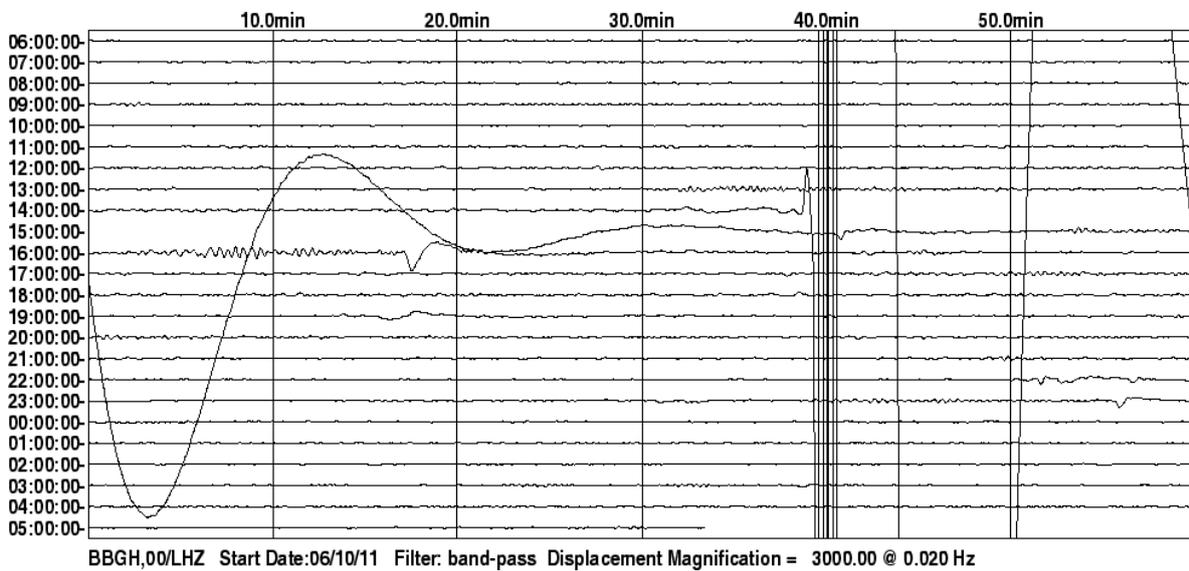


Рис. 6. Высокочастотные колебания, переходящие в деформационный скачек

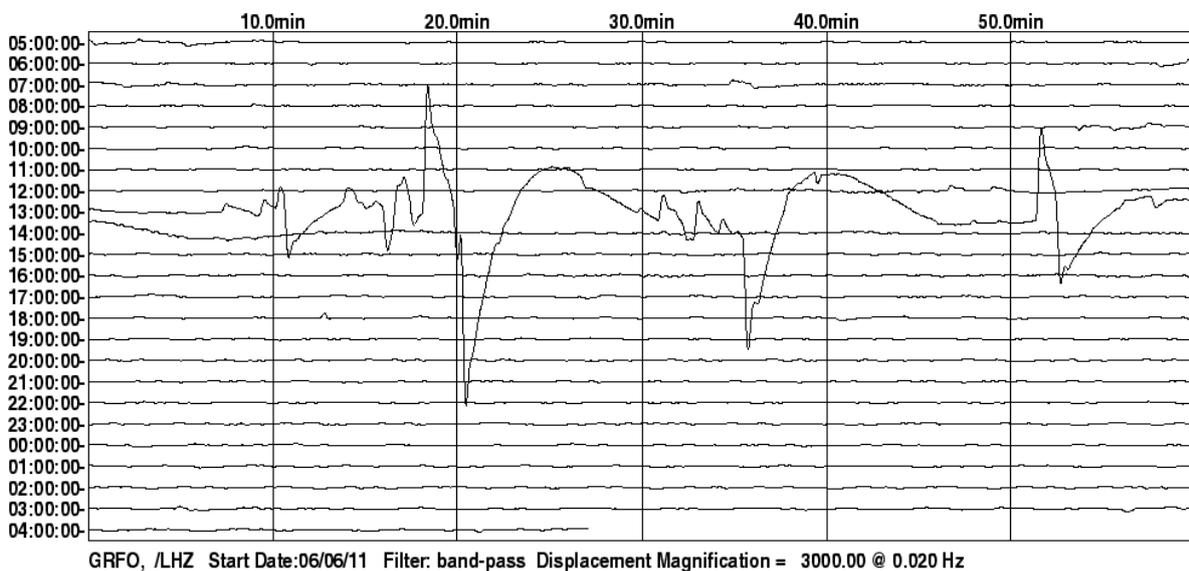


Рис. 7. Квазициклические геодеформации сложного характера

Важная информация получена благодаря локальной сети сейсмомониторинга в районе заповедника Yellowstone (США), где на площади 400 км<sup>2</sup> функционирует несколько десятков сейсмостанций. Анализ этих наблюдений показал, что низкочастотные сейсмические колебания и скачки геодеформаций, не связанные с землетрясениями, могут происходить локально на площади несколько квадратных километров и не фиксироваться удаленными на несколько километров станциями.

#### Постановка задачи

Цель исследования – оценить перспективы использования спутниковых технологий для решения задач мониторинга геодеформаций внутрисуточного масштаба. Функционирующие сегодня спутниковые альтиметрические и интерферометрические системы не позволяют осуществлять измерения геодинамических изменений чаще одного раза в несколько суток. В то же время комплектация планируемых к запуску геостационарных спутников соответствующими системами активного зондирования поверхности с частотой измерений менее одной минуты позволила бы решить эту задачу.

#### Изложение основного материала

Сегодня на орбите находятся три итальянских и два немецких радарных космических аппаратов, работающих в X спектральном диапазоне (длина волны 3,1 см), способных осуществлять съемку разрешением до 1 м. Съемочная аппаратура этих спутников – радары с синтезированной апертурой (SAR). Радарные интерферометрические съемки позволяют с точностью до первых миллиметров выполнять мониторинг смещений зданий и сооружений, земной поверхности [3]. Одним из наиболее современных спутников является TerraSar-X. Радар выполняет съемку земной поверхности в X-диапазоне длин волн (3,1 см) с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV), в диапазоне съемочных углов от 20° до 55. Периодичность съемки 2,5 суток (в 95 % случаев).

Сегодня радарную спутниковую интерферометрию в основном используют при “мониторинге разрабатываемых месторождений нефти и газа для кинематической классификации разрывных нарушений и связанных с ними локальных структур, оценки герметичности тектонически-экранированных ловушек углеводородов и подземных газовых хранилищ, типизации разломов, осложняющих месторождения нефти и газа: на каналы (активные в настоящее время системы трещиноватости в зоне растяжения) и экраны (закрытые и залеченные системы разрывов, находящиеся в состоянии сжатия), прогнозирования системы трещиноватости в карбонатных коллекторах, характеризующихся повышенными фильтрационно-емкостными свойствами, оценки горизонтальных и вертикальных смещений вдоль разломов, выявляемых в пределах месторождений с целью определения возможных утечек углеводородов и межпластовых перетоков, которые влияют на локальное падение давления и уменьшение дебита скважин” [3].

Интерферометрическая обработка данных РСА заключается в выделении из радиолокационного сигнала информации о фазовых смещениях сигнала в

результате смещения объекта на расстояние, не превышающее одной длины волны. Таким образом, измерения в X-диапазоне позволяют регистрировать смещения между измерениями на 3 мм. По результатам сравнения двух снимков одного и того же участка местности получают интерферограмму, представляющую собой сеть цветных полос, ширина которых соответствует разности фаз по обоим экспозициям. Сегодня для решения геодинамических задач применяется метод дифференциальной интерферометрии (DInSAR (Differential InSAR)) – совместной обработки фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка местности на двух витках (two-pass interferometer). Применение горизонтальной поляризации радиолокационного сигнала позволяет, в какой-то мере, отфильтровывать отражающие характеристики растительного покрова.

В общем случае дифференциальная интерферометрическая обработка состоит из комплексного поэлементного перемножения основного изображения и изображения, комплексно-сопряженного к вспомогательному, получение файла когерентности для области перекрытия двух снимков, составляющих интерферометрическую пару, в значениях от 0 до 1 для каждой пары соответствующих друг другу пикселей, фильтрации интерферограммы, позволяющей уменьшить помехи за счет закругления выходной цифровой модели рельефа или файла сдвигения, развертки фазы (процедура перехода от ее относительных значений к абсолютным), Специфика мониторинга высокочастотных геодеформаций состоит в том, что процедура фильтрации интерферограммы должна выполняться в минимальных объемах. Целесообразно выполнять шесть вариантов карт, применяя фильтрацию с использованием полосно-пропускающих фильтров с задаваемыми азимутами анизотропии, соответствующими известным направлениям блоковой делимости земной коры.

Для мониторинга высокочастотных геодеформаций городов может успешно применяться метод, основанный на технике устойчивых отражателей (Persistent Scatterer Interferometry). Применение метода устойчивых отражателей для мониторинга городских территорий, отдельных зданий и устойчиво отражающих площадок имеет существенные преимущества по сравнению с условиями мониторинга природных ландшафтов, за исключением пустынь и горных массивов.

Радиолокационная съемка поверхности Земли выполняется обычно в X, C, L-диапазонах, с длиной волны, соответственно, около 3 см, 6 см и 23 см. Учитывая фактические амплитуды геодеформаций, необходимо создать спутниковые системы высокого разрешения с длиной волны диапазона L (15,0–30,0 см), в отличие от современных систем с длиной волны диапазона C (3,8–7,5 см) и тем более диапазона X (3,1 см).

При длине волны 3 см (X-диапазон) фазовый набег 2 $\pi$  на интерферограмме вызван изменением дальности по направлению к спутнику на 1,5 см; при длине волны 5,6 см (C-диапазон) на 2,8 см; при длине волны 23,6 см (L-диапазон) на 11,8 см. Один цветной (“радужный”) цикл на интерферограмме соответствует длине волны, разной для приборов с разным диапазоном.

Основная проблема – обеспечение дискретности выполнения зондирования, соответствующей частоте геодеформаций, определяемой как пороговое значение (частота Найквиста). Учитывая, что высокочастотные или “быстропротекающие геодеформации реверсивного характера” имеют временную изменчивость, соответствующую минутам, то единственным решением является создание системы геостационарных спутников, густота распределения которых обеспечивала бы (учитывая критические углы съемки и высоту орбиты) обеспечение мониторингом стратегически важных территорий, представляющих высокий природный и техногенный геодинамический риск.

Для изучения динамики морского дна проблема мониторинга геодеформаций не так остра, за исключением морских участков кабелей и трубопроводов. Динамика морского дна, скрытого толщей океанских вод, изучается по специальным методикам [4] с использованием ИСЗ Geosat, ERS 1, ERS 2 и Торех/Poseidon; Jason 1,2. При построениях применяется метод инверсии, основанный на использовании быстрых преобразований Фурье. Предполагается, что если поле высот геоида разложить в спектр, то самые низкие гармоники волнового спектра высот геоида будут отображать топографию границы ядро – мантия и аномалии плотностей в нижних частях мантии. Более высокие гармоники соответствуют аномалиям плотности средней мантии на глубинах 600–2000 км. Спектр геоида в области длин волн в интервале 1500–600 км связан с плотностными изменениями в верхней мантии и на нижней границе литосферных плит, расположенной на глубинах до 300 км. Коротковолновые аномалии геоида представляют интерес для изучения верхнего слоя коры и топографии дна океана. Связь аномалий геоида с характерными чертами дна наиболее четко проявляется в длинах волн 200–400 км. В работе [5] рассмотрены короткоживущие (36 часов) отклонения на 50 см от среднего положения, топографии морской поверхности, пространственно согласующиеся с тектоническим мегаблоком Северного моря. В этом случае показано, что альтиметрические измерения фиксируют аномалии гравитационного поля. В то же время есть основания полагать, что аномалии гравитационного поля формируют геодеформации поверхности Земли.

### Выводы

Приведены сведения о высокоамплитудных асейсмических геодеформациях внутрисуточного масштаба, мониторинг которых современными спутниковыми системами невозможен. Предлагается программа мониторинга таких геодеформаций с использованием стационарных спутников, укомплектованных радарными с синтезированной апертурой (SAR) и спутниковыми альтиметрами с частотой сканирования поверхности менее минуты. Максимальная достоверность фиксации такого типа геодеформаций ожидается в районах урбанизированных территорий путем применения тех-

ники устойчивых отражателей (Persistent Scatterer Interferometry) – кровель строительных объектов.

### Литература

1. Учитель И.Л. Классификация асейсмических геодеформаций и их опасность для инженерных сооружений / И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, Б.Б. Капочкин // *Экологія міст та рекреаційних зон.* – Одеса, 2011. – С. 295–297.
2. Кузьмин Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов / Ю.О. Кузьмин // *Геологическое изучение и использование недр: Науч.-техн. информ. сб., АОЗТ “Геоинформмарк”.* – М., 1996. – Вып. 4. – С. 43–53.
3. Радарные космические аппараты // *Геоматика* № 3, 2010 [http://geomatika.ru/pdf/2010\\_03.html](http://geomatika.ru/pdf/2010_03.html)
4. Uchytel I. (1), Jaroshenko V. (1), Mituchenko V. (1), Kapochkin B. (2), Kucherenko N. (2), *Geodynamics of the Earth according to the altimeter measurements, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-6275-1, 2010.*
5. Геодинамика. Основы кинематической геодезии / С.П. Войтенко, И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, Б.Б. Капочкин. – Одесса, Астропринт, 2007. – 254 с.

### Перспективи моніторингу високочастотних геодеформацій супутниковими методами

І. Учитель, В. Корбан, В. Ярошенко,  
Б. Капочкін, Н. Кучеренко

Наведено відомості про високоамплітудні асейсмічні геодеформації внутрішньодобового масштабу. Пропонується використання стаціонарних супутників, укомплектованих радарними із синтезованою апертурою (SAR) і супутниковими альтиметрами з частотою сканування поверхні, меншою за хвилину.

### Перспективы мониторинга высокочастотных геодеформаций спутниковыми методами

И. Учитель, В. Корбан, В. Ярошенко,  
Б. Капочкин, Н. Кучеренко

Приведены сведения о высокоамплитудных асейсмических геодеформациях внутрисуточного масштаба. Предлагается использовать стационарные спутники, укомплектованные радарными с синтезированной апертурой (SAR) и спутниковыми альтиметрами с частотой сканирования поверхности менее минуты.

### Prospects for monitoring high-frequency geodeformations by the satellite methods

I. Uchytel, V. Korban, V. Jaroshenko,  
B. Kapochkin, N. Kucherenko

The information about high-amplitude aseismic geodeformations internal diurnal scale. It is proposed the use of stationary satellites, manned by synthetic aperture radar (SAR) and satellite altimetry with a frequency scanning the surface of less than a minute.