

УДК 528.2

## ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

**И. Учитель**

ОАО “Одессгаз”

**В. Ярошенко**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

**Б. Капочкин**

Одесский государственный экологический университет

**Ключевые слова:** геодеформации, gps, альтиметрия, спутниковые методы.

### Постановка проблемы

Глобальные геодинамические процессы представляют интерес для широкого спектра научных направлений. В последнее время особую актуальность приобрела проблема оценки влияния глобальных геодинамических процессов, их динамики на климат нашей планеты. Учитывая актуальность и значимость этой проблемы, нужно определить необходимость и достаточность объема и качества информации о глобальных геодинамических процессах для решения проблем глобальных изменений. Особую роль в мониторинге глобальных геодинамических процессов в последние годы начинают играть спутниковые методы. ОАО “Одессгаз” на протяжении длительного времени занимается прикладными вопросами возникновения и распространения геодеформаций, обладающих разрушительными способностями, в том числе с применением спутниковой информации.

### Связь с важными научными и практическими заданиями

Сегодня дистанционные методы геодезических измерений широко применяются при оперативном мониторинге топографии поверхности Мирового океана [<http://sealevel.jpl.nasa.gov/>]. Эти наблюдения являются составной частью мониторинга изменения формы геоида [<http://geoid.colorado.edu/grace/grace.php>]. Геодинамические процессы изучаются по данным контактных измерений уровня океана [<http://www.psmsl.org/>] и [<http://www.ndbc.noaa.gov/>]. Разрывные геодеформации изучаются по данным измерения сейсмических волн – Global Seismographic Network (GSN) [<http://earthquake.usgs.gov/>]. Неразрывные геодеформации измеряются комплексом методов [<http://earthquake.usgs.gov/monitoring/deformation/>], в который входят дальномерные, наклонномерные измерения, измерения пластовых давлений грунтовых вод. Это далеко не полный перечень систем измерений геодеформаций. Большинство используемых систем фиксации геодеформаций – дискретные. Только система сейсмического мониторинга дает возможность фиксации всех разрывных геодеформаций, непрерывно во времени и пространстве. Именно дискретизация геодинамического мониторинга в пространстве является важным препятствием в изучении геодинамического процесса во всех его проявлениях.

### Анализ последних достижений и публикаций, которые относятся к решению этой проблемы

Обзор литературы по проблеме геодинамических движений глобального масштаба, их кинематики при-

веден в работе [1]. В последние годы глобальные геодинамические процессы характеризовались важными событиями. Одним из таких событий была аномалия параметра сплюснутости Земли ( $J_2$ ). На рис. 1 приведены данные об изменении  $J_2$ . Произошедшие изменения, согласованы с увеличением угловой скорости вращения Земли и температурным режимом планеты. Увеличение среднегодовой температуры на  $0,424^\circ\text{C}$  в этот период представляет собой максимум за всю историю инструментальных измерений. Это отражает определяющую роль геодинамики в климатических изменениях. На рис. 2 показано, что изменения уровня Мирового океана произошли в разных его зонах с разными тенденциями. Размах колебаний достигал значения 7 см. Такие эффекты могут быть связаны со смещением масс внутри Земли.

### Постановка задачи

Цель этого исследования – оценить перспективы использования спутниковых технологий для решения проблем глобальной геодинамики. Существующие в настоящее время системы спутниковой альтиметрии и гравиметрии имеют ограничения в изучении короткоживущих геодеформаций в связи с низким пространственно-временным разрешением. Системы мониторинга геодеформаций с использованием GPS-технологий, в связи с недостаточной густотой покрытия территории, также не позволяют фиксировать геодеформации, связанные с реверсивными вертикальными движениями блоковой структуры земной поверхности. Применение интерференционной спутниковой технологии также имеет определенные ограничения.

Рассмотрим характеристики геодеформаций, которые до настоящего времени не могут изучаться с применением спутниковых технологий. Ю.О. Кузьмин [2–7] сформулировал важное эмпирическое обобщение о новом типе геодинамических движений. Протицируем его фрагменты: “Выявлено наличие интенсивных локальных аномалий вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности. Эти движения высокоамплитудны, короткопериодичны, пространственно локализованы, обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. Изучение характера деформирования приразломных зон совместно с геодинамической и петрофизической обстановками исследуемых регионов позволило установить, что:

1) аномалии типа  $\gamma$  обусловлены активизацией трещин отрыва вертикальной ориентации и локальными проседаниями весомой толщи пород в обстановке квазистатического субгоризонтального растяжения;

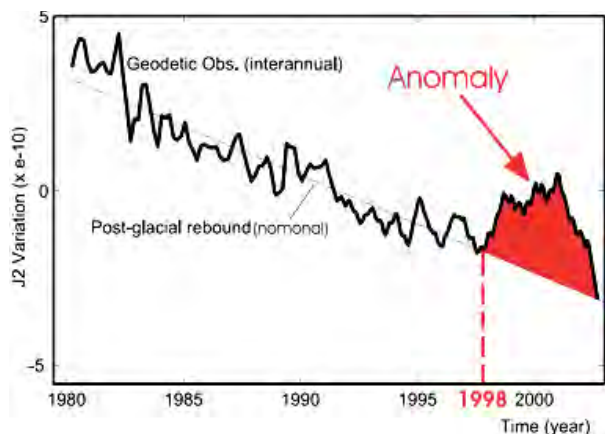


Рис. 1. Изменения значений коэффициента  $J_2$  [C. Cox, и B.F. Chao, 2002]

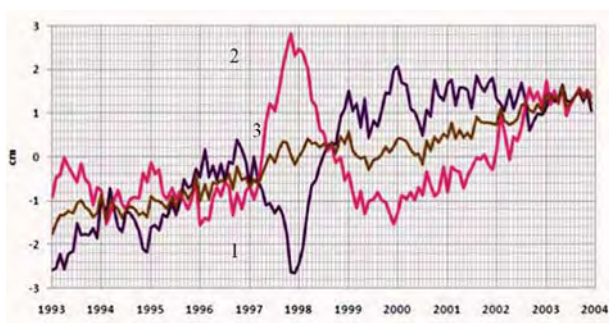


Рис. 2. Изменения уровня Индийского океана, западного и центрального Тихого океана (1), восточного Тихого и Атлантического океана (2), и среднглобального уровня Мирового океана (3) [http://i29.tinypic.com/71oa6q.png]

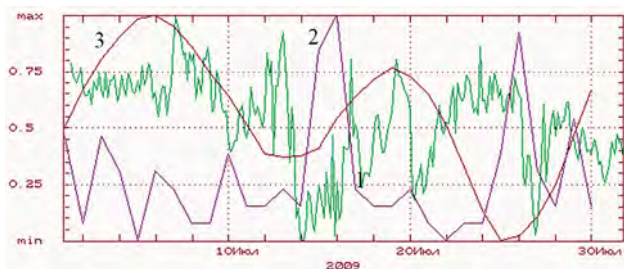


Рис. 3. Изменение уровня моря в Одесском заливе по данным береговых наблюдений (1), изменение во времени числа землетрясений  $M > 5$  (2) и угловой скорости вращения Земли (3)

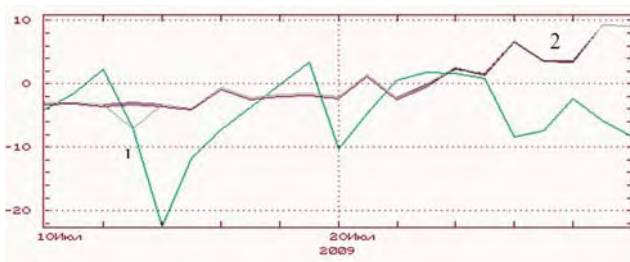


Рис. 4. Временная изменчивость среднесуточных значений уровня моря по данным наблюдений в пункте Одесса-порт (1) и спутниковых измерений (2) в квадратах с координатами: № 1 (46.5° с.ш. и 30.75° в.д.), № 2 (46.5° с.ш. и 30.88° в.д.) № 3 (46.38° с.ш. и 30.75° в.д.), № 4 (46.38° с.ш. и 30.88° в.д.)

2) аномалии типа  $\alpha$  вызваны уменьшением жесткостных характеристик зон наклонных разломов, при субгоризонтальных квазистатических сжимающих (или растягивающих);

3) аномалии типа  $\beta$  связаны с накоплением трещин отрыва горизонтальной ориентации, что при субгоризонтальных сжимающих напряжениях приводит к цилиндрическому изгибу верхних слоев земной коры.

Горизонтальные размеры для  $\gamma$ -аномалий составляют порядка 1–2 км, для  $\alpha$  – аномалий 5–10 км, а для аномалий типа  $\beta$  равны 10–50 км.

Основные пространственно-временные характеристики аномальных движений идентичны как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных разломных зон. Интенсивность деформационного процесса в зонах разломов асейсмичных регионов выше, чем в сейсмоактивных”.

Вполне понятно, что глобальный мониторинг такого типа геодинамических движений – довольно сложная задача. Постановка задачи такого уровня представлена в отдельной публикации [8]. Решению этой задачи дистанционными методами и посвящено настоящее исследование.

**Изложение основного материала**

Основным постулатом нашего исследования является теоретическое положение о том, что быстро протекающие геодеформации – это проявление длинных гравитационных волн, на земной поверхности отражается указанными типами геодеформаций. К такому типу волн относятся различные моды приливов в твердом теле Земли, в том числе зональные приливы с периодом 14 суток, отражающиеся в вариациях угловой скорости вращения Земли. Исходя из экспериментальных данных по измерению приливных волн в теле Земли, есть основания постулировать тезис о том, что вязкость внутренних сфер Земли делает возможным формирование гравитационных волн. Фактически действие приливообразующих сил формирует гравитационные волны. Указание на это есть в статье В.И. Левиной с соавторами “Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с  $MW = 7.8$ ,  $I_0 = 8$  (Камчатка)” в которой рассматривается воздействие на микросейсмичность приливной волны  $O_1$  (период 25.82 часа).

Ранее мы указывали, что направление распространения геодеформационных волн формирует разрушения по фронту волны [1]. В этом случае необходимо уточнить, что направление распространения

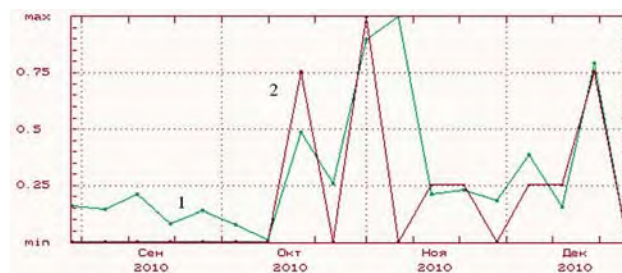


Рис. 5. Изменение во времени данных понедельного осреднения аномалий гравитационного поля в районе Карпат и случаев возникших провалов в мире

гравитационных волн ничем не ограничено, а проявление гедеформаций от этих волн на поверхности Земли контролируется блоковой делимостью коры, которое дискретно. Существует всего шесть азимутов блоковой делимости земной коры [9], в связи с чем направление распространения фронта гравитационных деформационных волн может не совпадать абсолютно точно с ориентацией поля гедеформаций на поверхности Земли.

Направленные вертикальные смещения блоков происходят, по-видимому, в виде последовательных деформационных скачков длительностью несколько десятков минут. Амплитуда отдельного деформационного скачка может измеряться несколькими сантиметрами [1]. Однонаправленные смещения блока такими скачками имеют длительность фазы растяжения гедеформационного процесса – 3,5 или 7,0 суток (как правило). В результате амплитуда суммарного вертикального смещения смежных блоков может достигнуть 30–50 см. Амплитуда гедеформаций такого порядка подтверждена GPS-измерениями, обзор результатов которых представлен в работах [1, 8].

В пределах г. Одессы подтверждение такого порядка амплитуды вертикальных движений выполнено путем комплексного анализа измерений уровня моря по футштоку и по данным спутниковых альтиметрических измерений [11]. Для анализа был выбран временной промежуток 7 и 22 июля 2009 г., во время которого силы сил лунно-солнечных приливов имели максимальную амплитуду. Оказалось, что в этот период действительно происходили существенные изменения в глобальной геодинамике, которые отразились в аномалии глобальной сейсмичности и в аномалии вертикальных движений суши Одесского региона. По данным наблюдений 15 июля, одесское побережье за сутки поднялось на 30 см (показано стрелкой) и в это же время резко увеличилось количество землетрясений с  $M > 5$ , среди которых землетрясение с  $M = 7,8$  (рис. 3). Важно отметить, что вертикальные движения суши в Одесском регионе приобрели такой масштаб, что фиксируются визуально по наблюдениям за положением волноломов относительно поверхности моря. Падение уровня моря на 30 см, что тождественно подъему суши, произошло в условиях безветренной погоды, что подтверждает достоверность сделанных выводов. Для подтверждения фиксированного положения морской поверхности использованы данные спутниковых альтиметрических измерений в четырех квадратах Одесского залива. Результаты сравнения данных измерений уровня моря в разных системах отсчета представлены на рис. 4. Оказалось, что уклоны морской поверхности практически отсутствовали и изменений топографии водной поверхности не фиксировалось. Анализ приведенных результатов дает основание констатировать наличие существенных отличий между прибрежными измерениями и спутниковыми изменениями. Эти данные подтверждают то, что кратковременные изменения отметок уровня 14–16 июля по данным береговых наблюдений формируются вертикальными движениями самого футштока.

Связь гедеформационных процессов с глобальными сейсмическими проявлениями позволяет предположить наличие причинно-следственных связей между вертикальными движениями и гравитационным

полем Земли. Можно предположить, что гедеформационный процесс сопровождается короткоживущими аномалиями гравитационного поля Земли. Существование аномалий такого рода рассмотрено в монографии [1], где приводятся результаты расчетов П.В. Руткевича, подтверждающие возможность их фиксирования по фазовым переходам воды в атмосферном воздухе. Этот метод давно используется в геологии и геоморфологии при дешифрировании спутниковой информации. Свойство атмосферы реагировать фазовыми переходами воды на изменения гравитационного поля применяют в технологии дистанционного гедеформационного мониторинга [10]. Важно отметить, что в отличие от прецизионной перманентной геодезической сети гедеформационного мониторинга, которая дискретна по пространству, информация геостационарных спутников дает необходимое пространственное разрешение для наблюдения за гедеформационным полем. Это позволяет успешно комплексовать прецизионные геодезические методы с менее точными методами, но отличающимися лучшим пространственным разрешением. Примеры применения запатентованной технологии приведены в монографии [1]. В дополнение к ранее изученному мы рассмотрели гедеформационные аспекты активизации провалов грунта, которые начали происходить одновременно в разных районах Земли [12]. Активизация подобных явлений приобрела глобальный характер в конце октября 2010 г. Используя методику [10], мы изучили даты формирования аномалий гравитационного поля в этот период в районе Карпат. Данные понедельного осреднения указанных аномалий по методике [10] и число возникших провалов в мире приведены на рис. 5.

Оказалось, что между рассматриваемыми процессами существует статистическая связь, характеризуемая коэффициентом корреляции  $R = + 0,65$ . Это подтверждает наличие связи между рассматриваемыми процессами

В последнее время мы изучаем вопрос применимости использования данных сейсмических станций для регистрации гедеформационных процессов неразрывного характера. По данным сейсмограмм часто фиксируют длиннопериодные колебания, не связанные с разрывными гедеформациями (землетрясениями). На рис. 6 приведен пример регистрации такого процесса сейсмостанцией г. Киев 7 января 2011 г.

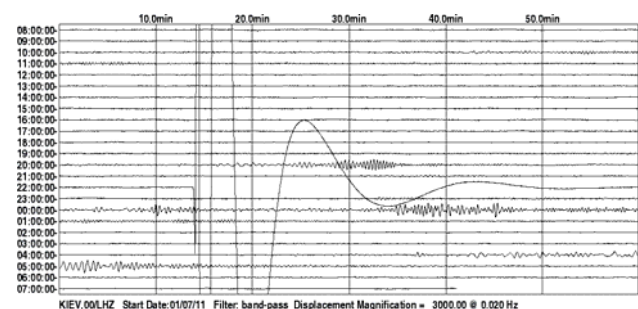


Рис. 6. Данные измерений сейсмостанции Киев в период 7 января 2011 г. (08.00) по 8 января 2011 г. (07.00)

В отличие от волнового процесса, в этом случае частота колебания не является константой и уменьшается со временем. Длительность процесса в данном случае составляет около 40 минут (начало в 22 часа 14 минут – окончание в 22 часа 50), что согласуется с длительностью деформационных скачков, измеренных уральскими учеными с использованием GPS-технологий. Вначале колебания имеют период порядка одной минуты а по завершении процесса – 20 минут. Судя по каталогу землетрясений, в этот промежуток времени зафиксирован “рой” очень слабых землетрясений в Эгейском море, которые также могут быть проявлением скачка геодеформаций. Землетрясений с  $M > 6$  в этот день зафиксировано не было. Мы установили, что подобные геодеформационные скачки могут иметь региональный масштаб и глобальные проявления, когда подобные движения синхронно фиксируют все сейсмостанции мира.

По данным наблюдений в Одессе период с седьмого по 10 января характеризуется интенсивным сжатием. За трое суток не зафиксировано ни одной разгерметизации газопроводов, в то время как в предыдущие трое суток зафиксировано 22 разгерметизации. Процесс сжатия произошел повторно, после аналогичного периода сжатия с 1 по 4 января.

#### Выводы

Приведены сведения о быстропротекающих геодеформациях. Рассмотрены перспективы мониторинга блоковых движений земной коры наземными и спутниковыми методами. Рассмотрены перспективы использования данных сейсмостанций для регистрации пластических геодеформаций.

#### Литература

1. Геодинамика. Основы кинематической геодезии / С.П. Войтенко, И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, Б.Б. Капочкин. – Одеса: Астропринт, 2007. – 254 с.
2. Сидоров В.А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов / В.А. Сидоров, Ю.О. Кузьмин. – М., Наука, 1989. – 183 с.
3. Кузьмин Ю.О. Механизм формирования современной геодинамической активности разломных зон / Ю.О. Кузьмин // Тр. Межд.симп. КАПГ по изучению совр. движ. земной коры. – Воронеж, 1988. – С. 163–166.
4. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов / Ю.О. Кузьмин // Автореф. дисс. ... докт.физ.-мат. наук. – М.: ИФЗ, 1990. – 52 с.
5. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений / Ю.О.Кузьмин // Прогноз землетрясений, Геодезические методы исследований. – Душанбе–Москва, Таджикистан, 1989. – № 11. – С. 52–60.
6. 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.
7. Касьянова Н.А. Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса / Н.А. Касьянова, Ю.О. Кузьмин. – М.: Геоинформмарк, 1996. – 56 с.
8. Uchytel I.L., Jaroshenko V.N., Kapochkin B.B. Methodical fundamentals of creation of permanent GPS networks, Reports on Geodesy, Warszawa, 2006. – № 1 (76). – P. 293–300.
9. Тяпкін К.Ф. Фізика Землі / К.Ф. Тяпкін. – К.: Вища школа, 1998. – 292 с.
10. Учитель И.Л. Способ обнаружения мест максимальных амплитуд быстрых вертикальных движений земной поверхности / И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко, Б.Б. Капочкин // Патент України № 20040403034, 16.05.2005 бюл. № 5.
11. 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.
12. Учитель И.Л. Разрушительные свойства геодеформаций / И.Л. Учитель. – Одеса: Астропринт, 2010. – 222 с.

#### Геодинамічний моніторинг дистанційними методами

І. Учитель, В. Ярошенко, Б. Капочкін

Наведено відомості про швидкоплинні геодеформації. Розглянуто перспективи моніторингу блокових рухів земної кори наземними та спутниковими методами. Розглянуто перспективи використання даних сейсмостанцій для реєстрації пластичних геодеформацій.

#### Геодинамический мониторинг дистанционными методами

И. Учитель, В. Ярошенко, Б. Капочкин

Приведены сведения о быстропротекающих геодеформациях. Рассмотрены перспективы мониторинга блоковых движений земной коры наземными и спутниковыми методами. Рассмотрены перспективы использования данных сейсмостанций для регистрации пластических геодеформаций.

#### Geodynamic monitoring remote methods

I. Uchytel, V. Jaroshenko, B. Kapochkin

The information about fast geodeformations. The prospects for monitoring crustal block movements from satellites, ground-based methods. The prospects of using seismic data for the registration of Plastic geodeformations.