

# **НАУЧНЫЙ ПРИОРИТЕТ ОТКРЫТИЯ ПРИРОДНОГО ЯВЛЕНИЯ АСЕЙСМИЧЕСКИХ ГЕОДЕФОРМАЦИЙ И РИСКИ ОТ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ**

**И.Л. Учитель, В.Н. Ярошенко,  
Б.Б. Капочкин**

Одесская национальная академия связи  
им. А.С. Попова  
г. Одесса, ул. Кузнецкая, 1  
E-mail: tsb1@mail.ru

*Приведены основные характеристики разрушительных «медленных» землетрясений. Рассмотрен конкретный пример условий формирования «медленного» землетрясения на Украине.*

**Введение.** Современный технический уровень геодинамического мониторинга, включающий региональные перманентные геодезические GPS сети, глобальную сейсмометрическую сеть, спутниковые гравиметрические, альтиметрические и интерферометрические системы, позволили накопить достаточный объем, пока разрозненных и эпизодических, данных о новом типе тектонических движений - асейсмичных реверсивных высокоамплитудных (сантиметры) геодеформациях временного масштаба минуты – недели [1]. Впервые это явление было открыто на Украине, хотя нельзя не отметить определенные успехи в этой области российских, азербайджанских и японских ученых. Научный приоритет открытия неизвестного ранее природного явления «медленные» землетрясения датируется примерно 1998 – 2000 годами, когда высокоамплитудные реверсивные геодеформации впервые были инструментально обнаружены в Одессе, а их свойства, были изучены и описаны. Важно отметить, что первые результаты научных исследований так называемых «медленных» землетрясений были получены в рамках геодинамики, а не сейсмологии. Первые публикации о регистрации «медленных» землетрясений в России и Японии появились примерно через год после публикации в 2000 году обобщающей монографии

«Основы неогеодинамики. Газовые сети, как инструмент деформационного мониторинга» и получения в 2000 году результатов исследования о научном приоритете на 4 технологии, направленные на минимизацию ущерба от «медленных» землетрясений.

Глобальный характер высокоамплитудных асейсмических геодеформаций, их свойство пространственной локализации в условиях короткой продолжительности геодеформационного процесса, существенно ограничивают применение существующих методов геодинамического мониторинга. Разрушительные свойства таких геодеформаций, являющихся в последнее время причиной огромных трещин и провалов, колебательных движений грунта (амплитуда до 30 см), в том числе на территориях, считающихся асейсмичными, коренным образом изменили мировоззрение в области оценки геодинамического риска территорий и в области сейсморайонирования территорий, регламентирующего процесс сейсмостойкого строительства.

Неизвестное ранее природное явление «медленных» землетрясений относится к классу геодеформаций, открытых более 30 лет назад и получивших название «Явление глобально распространенных быстропротекающих пульсационных изменений в гидрогеосфере, обусловленное способностью последней реагировать на изменения напряженно-деформированного состояния литосфера» (авторы: Вартанян Г.С., Куликов Г.В.). Было установлено, что Земля постоянно испытывает геодеформации, сопровождающиеся микросейсмическими проявлениями. Пульсационный характер таких геодеформаций показали результаты исследований Э.В.Бородича за вариациями гравитационного поля Земли. В конечном итоге, этот тип геодеформаций получил научное определение - "Явление - пульсации в поле гравитационных уровней подземной гидросферы с характерными размерами  $10^5$  м (100 км) и временами  $10^5$  с (сутки), обусловленные эндогенными короткоживущими подкоровыми локальными возмущениями" и был зарегистрирован в качестве открытия в СССР (диплом

№273; авторы: Бороздич Э.В., Вартанян Г.С., Куликов Г.В.). Важно отметить, что пространственно-временные масштабы геодеформаций, на самом деле, оказались несколько иными.

Спустя 20 лет, в 90-х годах XX столетия рассматриваемый класс геодеформаций был дополнен исследованиями Кузьмина Ю.О. (ИФЗ РАН) [2]. По его данным аномальные геодинамические движения высокоградиентны и могут достигать смещений, превышающих 50 мм/год. Такие геодеформации, по его мнению, короткопериодичны и характеризуются временными масштабами примерно от месяца до нескольких лет. Они, пространственно локализуются в интервале от 100 метров до первых десятков километров и обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. По его мнению, скорости деформаций имеют линейную мощность 20 Дж/м·с, что соответствует сейсмической энергии  $10^{13}$  Дж. Важно отметить, что уточнение пространственных масштабов проявления «медленных» землетрясений оказалось правомерным, а временных масштабов явления – нет.

В дополнение к существующим характеристикам явления, нами были приведены подтверждения того, что геодеформации могут иметь глобальный масштаб. Они могут иметь амплитуду, измеряемую десятками сантиметров. Временной масштаб колебательных процессов в высокочастотной области ограничивается нижней частотой сейсмических волн от землетрясений (1 Гц). Самое главное дополнение, отрицаемое до последних лет японскими специалистами, состоит в том, что «медленные» землетрясения обладают разрушительными свойствами.

В 2000 году выявленные нами характеристики «медленных» землетрясений были подтверждены результатами исследований Российского ученого А.А.Панжина, выполненными в месте постоянного формирования разрывов магистрального газопроводов РАО «Газпром». Измерения геодеформаций – «медленных» землетрясений было выполнено геодезическими методами с применением GPS технологий [3].

Значительно позже, в 2002 году, японским ученым Казусиге Обара [4], по сейсмологическим данным были подтверждены результаты исследований украинских специалистов. Была подтверждена и полученная Ю.О. Кузьминым оценка амплитуды «медленных землетрясений», как  $10^{13} - 10^{14}$  Дж.

В 2003 году азербайджанскими учеными был подтвержден глобальный характер рассматриваемых геодеформаций. Факт непрерывного изменения формы и объема Земли при прохождении гравитационных волн был подтвержден открытием (диплом РАН №239 от 15 октября 2003 г. авторы: Ш.Ф. Мехтиев, В.Е. Хайн, Э.Н. Халилов, Т.А. Исмаил-Заде), получившим название «Закономерность пространственно-временного распределения извержений вулканов».

В настоящее время установлены циклические асейсмические геодеформации глобального масштаба с периодами кратными и дольными 14 суткам [2]. Показано, что сильнейшие землетрясения в разных частях земного шара фиксируются между пиковыми датами геодеформаций в Одессе, вне зависимости от эпицентрального расстояния и без существенных направленных смещений земной поверхности. Это подтверждает глобальный характер геодеформационного процесса.

Используя данные EUREF Permanent GNSS Network мониторинга (суточное осреднение данных), нами выделены геодеформации продолжительностью сутки и более. В качестве примера на рис. 1 показаны геодеформации в Италии и Словакии (1620 – 1622 GPS недели, или 23.01.2011 – 05.02.2011гг). На рис. 16 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 геодеформации потенциально обладают разрушительными свойствами.

Используя данные сейсмического мониторинга нами выделены и классифицированы геодеформации асейсмического характера внутрисуточного мас-

штаба. В качестве постулата применено положение о том, что апериодические геодинамические процессы волнового характера с частотой менее 0,1 Гц не могут быть классифицированы как объемные сейсмические волны землетрясений. Постулируется положение о том, что поверхностные волны Лява и Реллея с периодами более минуты отвечают колебаниям (геодеформациям), генетически не связанным с разрывными геодеформациями (землетрясениями).

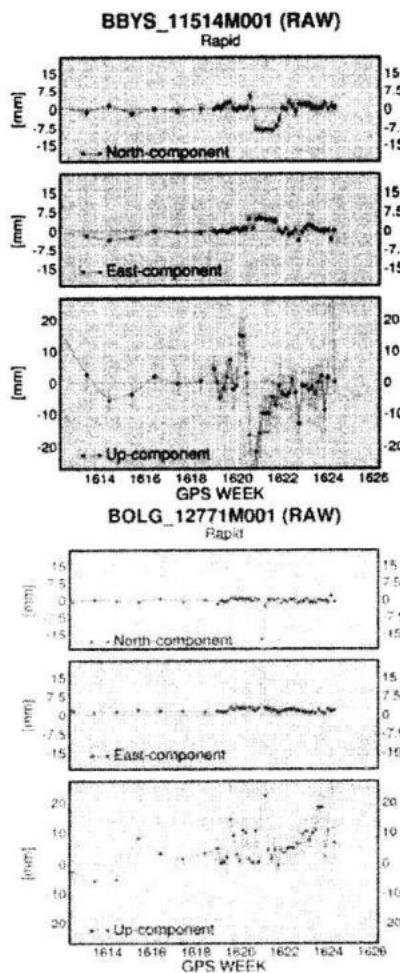


Рис. 1. Геодеформации по данным GPS мониторинга (период осреднения - сутки)

[http://www.epncb.oma.be/\\_dataproducts/products/timeseriesanalysis/residual.php](http://www.epncb.oma.be/_dataproducts/products/timeseriesanalysis/residual.php)

Используя данные глобальной сети сейсмического мониторинга ([www.epncb.oma.be](http://www.epncb.oma.be)) выделены геодеформации волнового характера, свободные и вынужденные, одиночные и цуги волн, с периодами несколько минут и

продолжающиеся часами, выделены геодеформации неволнового характера. Например, волновые геодеформации показаны на рис. 2.

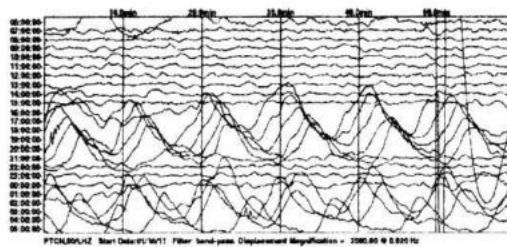


Рис. 2. Два цуга вынужденных геодеформаций с периодом около 10-ти минут

Это вынужденные колебания с периодом примерно 10 минут и длительностью первого цуга – 5 часов (30 волн) и повторившегося после трехчасового перерыва вновь, с предшествующей частотой и амплитудой. 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.

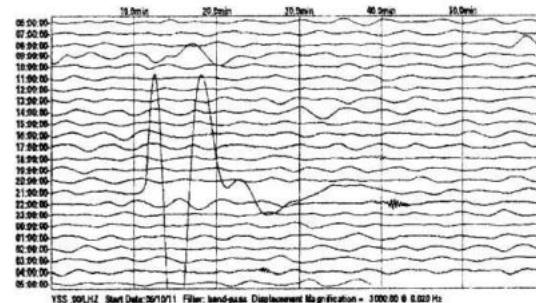


Рис. 3. Свободные геодеформации с периодом около 5 минут

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, начинаящийся резким опусканием и продолжающийся более длительным компенсационным подъемом колебательно-

го характера, с затухающей амплитудой. Весь процесс занимает примерно 3–4 минуты, и для фиксации его пространственного распространения спутниковыми методами необходима дискретность сканирования менее одной минуты.

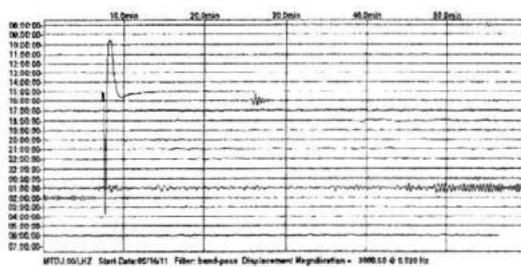


Рис. 4. Скачок геодеформаций

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

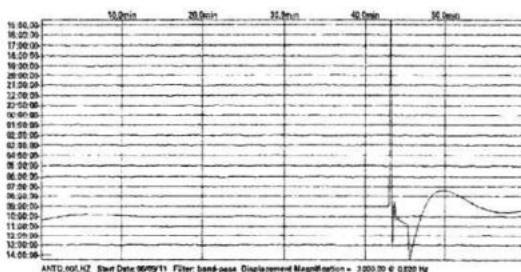


Рис. 5. Высокочастотные колебания переходящие в деформационного скачка

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.

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, эпизодически фиксируя приведенные геодеформации на одной из станций, не подтверждает их проявление кустом хотя бы из трех четырех сейсмостанций, что типично для сейсмических волн землетрясений.

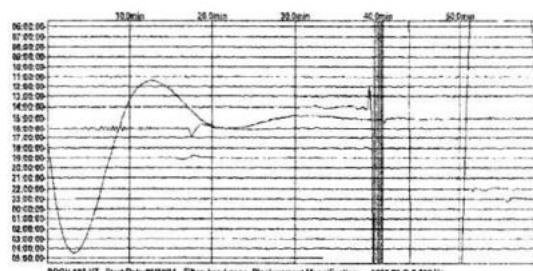


Рис. 6. Высокочастотные колебания переходящие в деформационный скачек

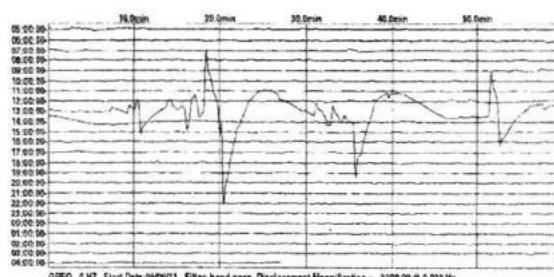


Рис. 7. Квазициклические геодеформации сложного характера

Важная информация получена благодаря густой 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 км<sup>2</sup> и не фиксироваться удаленными на несколько километров станциями.

Целью настоящего исследования было изучить особенности формирования конкретного случая «медленных» землетрясений – асейсмических геодеформаций в Киеве 21.09.2011 г. Для оценки проявления «медленных» землетрясений было выполнено комплексное изучение

сейсмических процессов, геодинамических проявлений, особенностей действующих сил глобального масштаба. Для достижения этой цели был выполнен анализ условий возникновения «медленных» землетрясений зарегистрированных широкополосной сейсмостанцией в Киеве 21.09.2011 г. рис. 8 а.

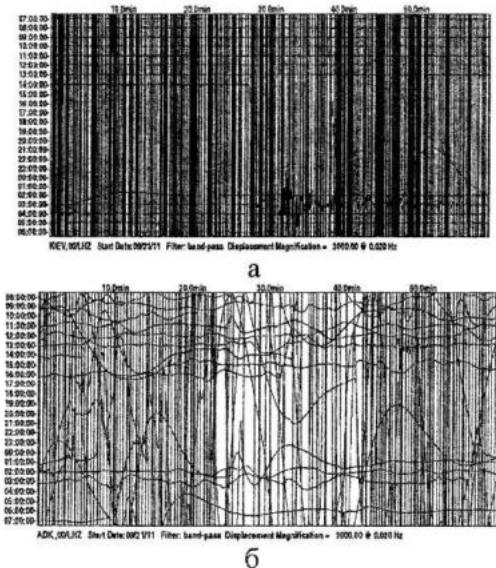


Рис. 8. Сейсмограммы широкополосных станций в Киеве (а) и на Алеутских островах (б)

Геодеформационный процесс длился с около 12 часов, с 14 час. 28 мин 21.09.11 г. до 02 час 10 мин 22.09.11 г. Процесс начался высокочастотными геодеформациями, а закончился низкочастотными, с периодом примерно 30 минут. Важно отметить, что «медленные» землетрясения, зарегистрированные Киевской широкополосной сейсмостанцией являются частью глобального геодеформационного процесса, так как квазисинхронные, аналогичные по характеру и длительности геодеформации, были зафиксированы широкополосной сейсмостанцией на Алеутских островах рис. 8 б. Аналогичные, но более продолжительные, «медленные» землетрясения в этот же период фиксировались широкополосной сейсмостанцией о. Тайвань. Они фиксировались 21–22 сентября. Как и в Киеве, геодеформационный процесс завершался высокочастотными колебаниями. 17–18 сентября 2011 г. аналогичные геодеформации фиксировала широкополосная сейсмостанция в Якутии, а

23–24 сентября такие же «медленные» землетрясения фиксировались широкополосной сейсмостанцией на Филиппинах. Важно отметить, что наряду с сейсмостанциями, в разных районах в этот период геодеформации фиксировались визуально. 21.09.2011 в США (округ Санта-Круз штат Калифорния) в одном из зданий «неожиданно начал вспучиваться пол и с грохотом отслаиваться напольная плитка. Персонал, находящийся в холле здания был эвакуирован» (по данным Геологической службы США, землетрясений в это время зафиксировано не было). Примерно в это же время в г. Ноксвилл, штат Теннесси фиксировались продолжительные сотрясения – «в течение 2-х дней дом трясет через каждые несколько часов. Звук при этом напоминает взрыв». По информации Геологической службы США землетрясений в данном районе не зарегистрировано. 22.09.2011 г в Екатеринбурге (Россия) в 08 час по местному времени из-за разгерметизации газопровода произошел мощный взрыв. Разрушены перекрытия между девятым и десятым этажами 11-ти этажного дома. Нами на основании данных наблюдений в Одессе, выполненных по запатентованной технологии ОАО «Одессагаз» были проанализированы геодеформации асейсмического характера. Установлено, что в сентябре 2011 г. геодеформации асейсмического характера фиксировались 6–8; 13–15; 20–23; 28–29 сентября, рис. 9. Блокирование этих процессов фиксировалось, соответственно 3 – 4; 10 – 11; 17 – 18; 25 сентября.

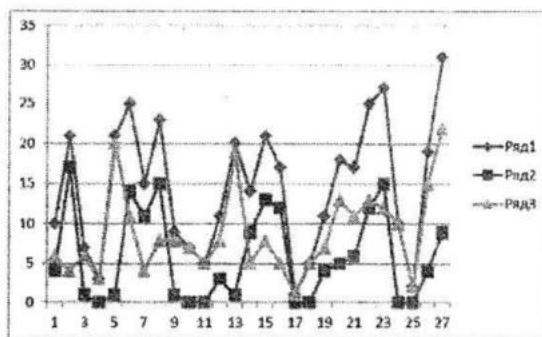


Рис. 9. Изменение во времени интенсивности асейсмических геодеформаций (суммарных – ряд 1, горизонтальных – ряд 2 и вертикальных – ряд 3)

Из этого следует, что зафиксированный геодеформационный процесс характеризовался периодичностью 7 суток. Можно предположить, что в рассматриваемый период фазы сжатия земной поверхности чередовались с фазами растяжения с периодом 3 – 4 дня. Для подтверждения выдвинутого предположения были изучены проявления сейсмических процессов в Европе рис. 10. В рассматриваемый период в Европе сильных землетрясений зафиксировано не было. Микросейсмические проявления до 15 сентября характеризовались положительными экстремумами в периоды отсутствия асейсмических геодеформаций и минимумами в периоды их возникновения.

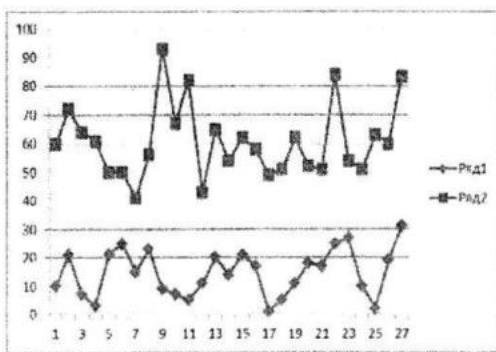


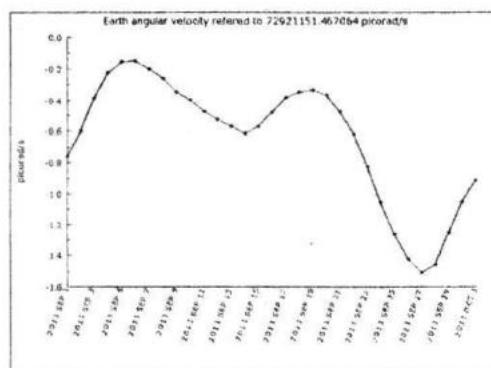
Рис. 10. Изменение во времени суточного количества землетрясений в Европе (ряд 1) и интенсивности асейсмических геодеформаций, регистрируемых в Одессе (ряд 2)

После 15 сентября пиковые значения микросейсмичности начали фиксироваться в даты интенсивного проявления асейсмических геодеформаций, например 22 и 27 сентября.

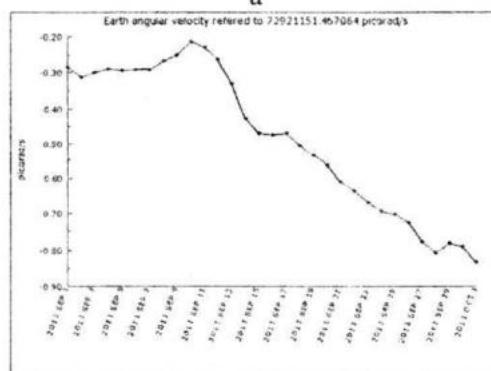
По технологии, запатентованной ОАО «Одессагаз», базирующейся на использовании спутниковой информации, на территории Северной Атлантики и Европы, были изучены проявления быстропротекающих вариаций гравитационного поля Земли. Фиксировались геодеформационные процессы, связанные с формированием локализованных аномалий силы тяжести отрицательного знака. Формирование быстропротекающих локализованных в пространстве аномалий гравитационного поля нами зафиксированы во время проявления асейсмических геодеформаций (рис. 10),

а именно 7 – 9; 13 – 17; 26; 29 сентября. Полученные результаты подтверждают тезис о том, что асейсмические геодеформации, фиксируемые на Одесском геодинамическом полигоне, отражают геодеформационный процесс глобального характера.

Рассмотрим, каким образом глобальные геодеформации Земли, отражающиеся в периодических вариациях её угловой скорости вращения [5], были связаны с пульсационными изменениями геодеформационного процесса в Европе. На рис. 11а показан график изменения угловой скорости вращения Земли. Можно видеть, что асейсмические геодеформации в Одессе и аномалии гравитационного поля в Европе фиксировались в даты экстремумов угловой скорости вращения Земли 5 – 6; 15; 19 – 20; 27 сентября.



а



б

Рис. 11. Изменения во времени угловой скорости вращения Земли (а) и низкочастотной составляющей угловой скорости вращения Земли (б)

Это значит, что наблюдения в Одессе за асейсмическими геодеформациями формируются глобальным геодеформационным процессом.

На рис. 11 б показаны тенденции изменения угловой скорости вращения Земли без учета двухнедельных вариаций. Можно видеть, что начиная с 15 сентября вращение Земли стало резко замедляться, что стало причиной прекращения чередования микросейсмичности в Европе с асейсмическими геодеформациями в Одессе. Другими словами, после 15 сентября геодинамические условия планетарного характера резко изменились. Такие изменения отразились в проявлениях глобальной сейсмичности. На рис. 12 показаны изменения во времени проявлений глобальной сейсмичности. Можно видеть, что с периодичностью две недели суточное число землетрясений с магнитудой более 5 (ряд 1) снижается до одного (10 – 11 сентября) и до двух (24 – 25 сентября). Усиления сейсмической активности планетарного масштаба фиксировалось так же с двухнедельной цикличностью 5 – 7 и 13 – 17 сентября, во время положительных экстремумов угловой скорости вращения Земли.

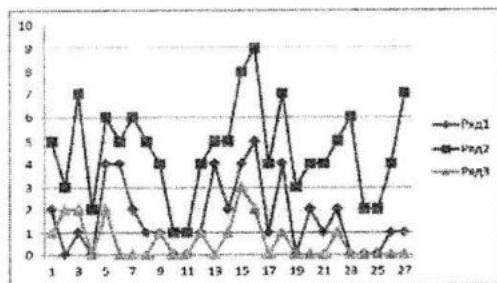


Рис. 12. Изменение во времени суточного числа землетрясений с  $M \geq 5$  (ряд 1); землетрясений с глубиной очага менее 10 км (ряд 2); землетрясений с  $M \geq 6$  (ряд 3)

В первых двух декадах сентября в периоды увеличения угловой скорости вращения Земли (в периоды сжатия) резко возрастало число землетрясений с  $M \geq 6$  (ряд 3), в том числе и катастрофического характера. Значительный процент этих землетрясений был связан с проскальзыванием земной коры по астеносфере, о чем можно судить по глубине очага и координатах эпицентра, относительно положения плоскости субдукции. Землетрясения с з глубиной очага менее 10 км показаны в виде ряда 2. В последующий период, после снижения угло-

вой скорости вращения Земли этот процесс прекратился.

Если проанализировать график запаздывания вращения внешней (твердой) оболочки Земли относительно внутренних сфер (рис. 13), то можно оценить произошедшие изменения.

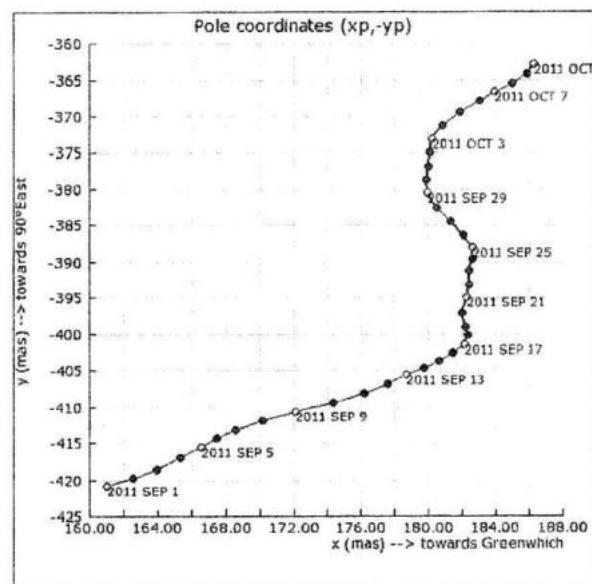


Рис. 13. Изменение во времени координат оси вращения Земли

На рис. 13 показана траектория смещения проекции оси вращения Земли на её поверхность. Можно видеть, что 17 сентября, во время уменьшения угловой скорости вращения Земли кора «прилипла» к астеносфере. Этот процесс продолжался циклически две недели (с некоторым ослаблением 23 – 25 сентября). В заключение рассмотрим особенности плитовой тектоники в период формирования «медленных» землетрясений, зафиксированных широкополосными сейсмостанциями в различных регионах 18 – 24 сентября 2011 г. (Украина, Филиппины, о.Тайвань, Якутия, Алеутские о-ва).

Установлено, что 20.09.2011 г. зафиксировано расширение коры в Атлантическом и Тихом океанах (глубина очагов – 10 км). Спустя 3,5 суток произошли землетрясения с той же последовательностью и примерно с теми же координатами, но с глубиной очага 33 км (для океанической коры это мантийные

землетрясения). Случайное совпадение такого характера маловероятно. Причины повторных активизаций спрединга требуют детального изучения. Можно предположить, что причины формирования расширения Земли 20-го и 23-го

сентября имели периодический характер с периодом дольным 14 суткам и по характеру воздействия были однотипными.

В таблице приведены данные о землетрясениях, произошедших в зонах спрединга (зонах расширения земной коры).

Таблица 1

дата	время	$\phi$	$\lambda$	H	M
20.09	06:05	38.4S	16.9 W	10	5.1
20.09	02:40	4.5S	105.4W	10	5.5
23.09	15:35	38.6S	16.9W	33	5.0
23.09	19:02	9.0S	109.61 W	33	5.6
23.09	22:44	9.20S	109.71 W	33	5.0

Были рассмотрены данные GPS мониторинга геодеформаций, фиксируемые в Киеве. Важно отметить, что в период 4-25 сентября были забракованы данные регистрации суточных смещений за 10; 13, 15; 20; 24 сентября. По оставшимся данным можно судить о том, что геодезический пункт в Киеве с 17-21 сентября имел устойчивый тренд к вздыманию, а общее смещение составило примерно 1 см.

Анализ изменений гравитационного поля Земли над Мировым океаном, по данным спутниковой альtimетрии, позволил выявить 20-23 сентября существенные изменения гравитационного поля над Арктикой. В этот период в топографии водной поверхности зафиксированы локализованные в пространстве изменения формы геоида с амплитудой до 30 см.

**Выводы.** В результате комплексного анализа геофизических и геодинамических условий формирования «медленных» землетрясений зарегистрированных широкополосной сейсмостанцией Киева было установлено, что геодеформации происходили на фоне регионального растяжения земной коры практически синхронно с аналогичными проявлениями на о. Тайвань и на Алеутских островах. В это же время в некоторых районах аналогичные процессы фиксировались по деформациям и разрушениям инженерных конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Классификация асейсмических геодеформаций и их опасность для инженерных сооружений // Екологія міст та рекреаційних зон. – Одеса, 2011. – С. 295 – 297.
2. Кузьмин Ю.О. Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов // Геологическое изучение и использование недр / Науч.-техн. информ. сб. – АОЗТ “Геоинформмарк”. – М., 1996, – Вып. № 4, – С. 43 – 53.
3. Панжин А.А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS // Геомеханика в горном деле – 2000 / Материалы международной конференции. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. 2000. – С. 320 – 324.
4. Kazushige Obara Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan Science 31 May 2002: Vol. 296 no. 5573 P. 1679-1681 DOI: 10.1126/science.1070378.
5. Войтенко С.П., Учитель И.Л., Ярошенко В.Н., Капочкин Б.Б. Геодинамика. Основы кинематической геодезии. – Одесса: Астропринт, 2007. – 254 с.