

ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА СПЛОЧЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, КАК ПРИЧИНЫ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ

И. Л. Учитель

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: sch@odgaz.odessa.ua

С. П. Войтенко

Доктор технических наук, профессор

Киевский национальный университет

строительства и архитектуры

пр. Воздухофлотский, 31, г. Киев, Украина, 03680

e-mail: knuba@knuba.edu.ua

Б. Б. Капочкин

Кандидат геолого-минералогических наук*

e-mail: tsb1@ukr.net

*Кафедра теплогазоснабжения

Одесская государственная академия

строительства и архитектуры

ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, Украина, 65029

Розглядається проблема створення технології моніторингу руйнівних асейсмічних швидкоплинних геодформацій реверсивного характеру. Деформації океанського дна не входять в область розгляду. Показані амплітудно-частотні характеристики деформацій, особливості їх просторового прояву і відповідні складності створення технології моніторингу. На початковому етапі запропоновано використовувати існуючі перманентні геодезичні мережі шляхом аналізу динаміки зміни цифрових моделей фактичного рельєфу

Ключові слова: сейсмічна небезпека, деформації поверхні Землі, руйнування інженерних споруд, моніторинг геодформацій

Рассматривается проблема создания технологии мониторинга разрушительных асейсмических быстропротекающих геодформаций реверсивного характера. Деформации океанского дна не входят в область рассмотрения. Показаны амплитудно-частотные характеристики деформаций, особенности их пространственного проявления и соответствующие сложности создания технологии мониторинга. На начальном этапе предложено использовать существующие перманентные геодезические сети путем анализа динамики изменения цифровых моделей фактического рельефа

Ключевые слова: сейсмическая опасность, деформации поверхности Земли, разрушение инженерных сооружений, мониторинг геодформаций

1. Введение

В результате появления новых результатов изменения геодформаций с использованием современных методов спутниковой геодезии, лазерной дальнометрии, спутниковой альтиметрии и интерферометрии, установлено, что геодформационные процессы с внутрисуточным масштабом изменчивости имеют скорость смещений, измеряемую сантиметрами в час.

В данной работе рассмотрен вопрос технологии мониторинга пространственной изотропии этих деформационных проявлений. Если указанные геодформации изотропные, то их влиянием на инженерные сооружения можно пренебречь. Если же они анизотропные, то геологическая среда должна характеризоваться зонами дивергенции и конвергенции. В зонах конвергенции можно ожидать сейсмические разрывные геодформации – землетрясения, а в зоне дивергенции (зонах нарушения сплоченности геологической среды и трещинообразования) будут происходить деформации и разрушения инженерных сооружений.

Асейсмические геодформации имеют амплитуду, измеряемую десятками сантиметров, однако в связи

с тем, что период деформаций, превышает период собственных колебаний инженерных сооружений, разрушительные резонансные эффекты не возникают. Вместе с тем, в связи с дивергентным характером пространственного распространения деформаций, вследствие нарушения сплоченности геологической среды, этот тип деформаций является разрушительным для трубопроводов и отдельных типов инженерных сооружений [1]. Важно отметить, что существующая система сейсмологического мониторинга, базирующаяся на сети сейсмометрических пунктов непригодна для мониторинга этого типа геодинамических движений. Даже широкополосные сейсмометрические станции принципиально непригодны для решения этой задачи. Проблема состоит в том, что в отличие от сейсмических волн, которые распространяются в виде непрерывных деформаций, рассматриваемый тип геодформаций проявляется в пространстве фрагментарно. Наиболее подвержены разрушениям газопроводы расположенные в геодинамически активных регионах. В Украине аварии газопроводных и водопроводных сетей изучены для Одесской городской агломерации. В РФ аварии на магистральных трубопроводах и на

канализационных коллекторах были изучены в регионе Сургута.

2. Анализ литературных данных

В 2014 году в Германии издана монография «Смена парадигмы современной геодинамики и сейсмо-тектоники» [1]. В этой работе впервые рассмотрены некоторые, ранее не изученные, проблемы геодинамических и сейсмических рисков в строительстве. Ранее считалось, что максимальную амплитуду движений Земной поверхности, измеряемую первыми сантиметрами в год, имеют долгопериодные геодинамические деформации и ошибочно было принято асейсмические геодинамические деформации считать не опасными для инженерных сооружений. В результате анализа данных о максимальных оценках вертикальных скоростей геодинамических движений [1], впервые было показано, что рост скорости вертикальных геодинамических движений при уменьшении временного масштаба геодинамического процесса подчиняются закономерности гиперболического характера. Максимальные амплитуды вертикальных смещений – у короткопериодных геодинамических деформаций, а минимальные – у долгопериодных. Для мониторинга геодинамических деформаций традиционно используют перманентные геодезические сети, например Европейскую перманентную геодезическую сеть EPN, в которую Украина входит более чем 10 геодезических пунктов. Эта система контролирует как вертикальные, так и горизонтальные смещения. Существуют спутниковые радарные системы мониторинга смещений поверхности, использующие альтиметрические инструменты, лазерные сканеры и интерферометрические системы. Все эти системы мониторинга с разной точностью и разрешающей способностью по пространству измеряют только вертикальные смещения отражающей поверхности. Кроме этого рассматриваемый тип геодинамических деформаций в высокочастотной части спектра позволяют измерять широкополосные сейсмометрические станции. Этим оборудованием осуществляется мониторинг горизонтальных и вертикальных смещений, но в очень узком диапазоне периодов.

В работах [2, 3] рассмотрены гидрогеодинамические процессы и приведены результаты измерения изменения объема горных пород перед землетрясением в Спитаке в 1988 г. Увеличение объема горных пород может достигать 2 %. Это значит, что при нарушении сплоченности горных пород соответственно будут изменяться расстояния между несущими конструкциями инженерных сооружений. Особенно разрушительно влияние изменения сплоченности горных пород сказывается на трубопроводах [4–6]. В развитие данного научного направления можно рассматривать работу [7], в которой предложена ротационно-фильтрационная модель водного баланса бессточного водоема. В этой модели изменения уровня водоема связываются с изменениями сплоченности геологической среды. Важно отметить, что геодинамическое поле Земли формируется в соответствии с четкими структурными закономерностями, рассматриваемыми в работе [8].

3. Цель и задачи работы

Учитывая то, что нарушения сплоченности геологической среды в дивергентных зонах являются причинами техногенных аварий, а в конвергентных зонах причинами разрывных геодинамических деформаций (землетрясений), целесообразно разработать принцип создания технологии мониторинга этих опасных процессов. Существующая глобальная система сейсмологического мониторинга не позволяет фиксировать геодинамические деформации с периодами, превышающими часовой временной диапазон изменчивости, а существующие региональные системы GPS мониторинга длиннопериодных геодинамических деформаций пока не адаптированы для мониторинга разрушительных деформаций земной поверхности с внутримесячной изменчивостью. Именно поэтому была поставлена цель создания предпосылок для разработки технологии мониторинга рассматриваемого типа деформаций земной поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать возможность адаптации существующих систем мониторинга геодинамических деформаций для измерения быстропротекающих реверсивных процессов;
- создать предпосылки для разработки технологии комплексного мониторинга всех типов геодинамических деформаций.

4. Результаты выполненных исследований характеристик разрушительных асейсмических геодинамических деформаций и методов их мониторинга

Твердая земная поверхность на 70 % покрыта водой и по этой причине недоступна изучению методами, основанными на измерениях геодинамических деформаций с использованием перманентных геодезических сетей. Деформации ложа Мирового океана безусловно важны, однако актуальность их измерения существенно ниже актуальности измерения разрушительных геодинамических деформаций в пределах урбанизированных территорий суши. Изучение геодинамических деформаций морского дна возможно и использованием существующей системы измерения цунами DART. Эта система, по сути, имеет двойное назначение. Она одновременно изучает волны на поверхности океана и деформации морского дна относительно фиксированной морской поверхности. Для изучения геодинамических деформаций дна Мирового океана могут быть использованы технологии измерения быстропротекающих изменений гравитационного поля Земли, включающие и геодинамическую составляющую. В данном исследовании основные усилия направлены на разработку технологий мониторинга геодинамических деформаций поверхности суши.

Для изучения степени анизотропности быстропротекающих реверсивных геодинамических деформаций была выбрана ситуация, когда под влиянием аномальных приливов в твердом теле Земли во время Солнечного затмения, совпавшего с условиями перигея Луны (14. 11. 2012 г.) Европейской перманентной геодезической системой мониторинга геодинамических деформаций (рис. 1) зафиксирован скачек геодинамических деформаций.

По сравнению с 13. 11. 2012 г. большинство геодезических пунктов сместилось в восточном направлении

с тенденцией к опусканию (реверсивного характера). На рис. 2 показаны результаты измерения данного скачка деформаций станциями Чернигова, Евпатории и Анкары (14.11.2012 соответствует третьим суткам 1714 GPS недели).



Рис. 1. Карта расположения станций Европейской перманентной геодезической системы мониторинга геодеформаций (EPN) [9]

Осредненное за сутки опускание реверсивного характера достигало 50 мм. Горизонтальное реверсивное смещение имело такую же амплитуду. На рис. 2, а видно, что геодезический пункт Чернигова смещался с северной составляющей, а Анкары (рис. 2, в) с южной составляющей. Направленность смещения указанных пунктов свидетельствует о том, что на указанной территории в результате скачка геодеформаций 13–14 ноября 2012 г. возникли условия растяжения земной поверхности, так, как характер смещений был дивергентным.

На рис. 3 показана построенная нами карта горизонтальной проекции вектора смещения пунктов EPN 13–14.11.2012 г.

На территории Юго-Восточной Европы в Греции Албании Македонии Черногории и Сербии выявлена зона отрицательной аномалии горизонтальных движений, что с запада этой зоны создались условия конвергенции, а с востока зоны, в районе восточной Турции условия дивергенции. Территория Украины оказалась на северо-восточной периферии рассматриваемого деформационного процесса. В случае реверсивных движений на следующие сутки ситуация изменилась на противоположную. По данным Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC) действительно 13. 11. 2012 г. сейсмические проявления зафиксированы на западе указанной зоны, а через 8 часов, 14. 11. 2012 на востоке выявленной зоны аномально низких горизонтальных смещений (рис. 4, а, б). Указанные сейсмические проявления подтверждают нашу гипотезу о возможности нарушения сплоченности геологической среды во время быстропротекающих асейсмических геодеформаций реверсивного характера.

В результате выполненных исследований показано, что для мониторинга геодеформаций с периодами более суток и регионального масштаба достаточно выполнять картирование среднесуточных смещений поверхности Земли, используя на европейской территории систему спутниковой геодезии EPN. Предложено строить карты модуля вектора и угловых характеристик посуточных горизонтальных и вертикальных смещений.

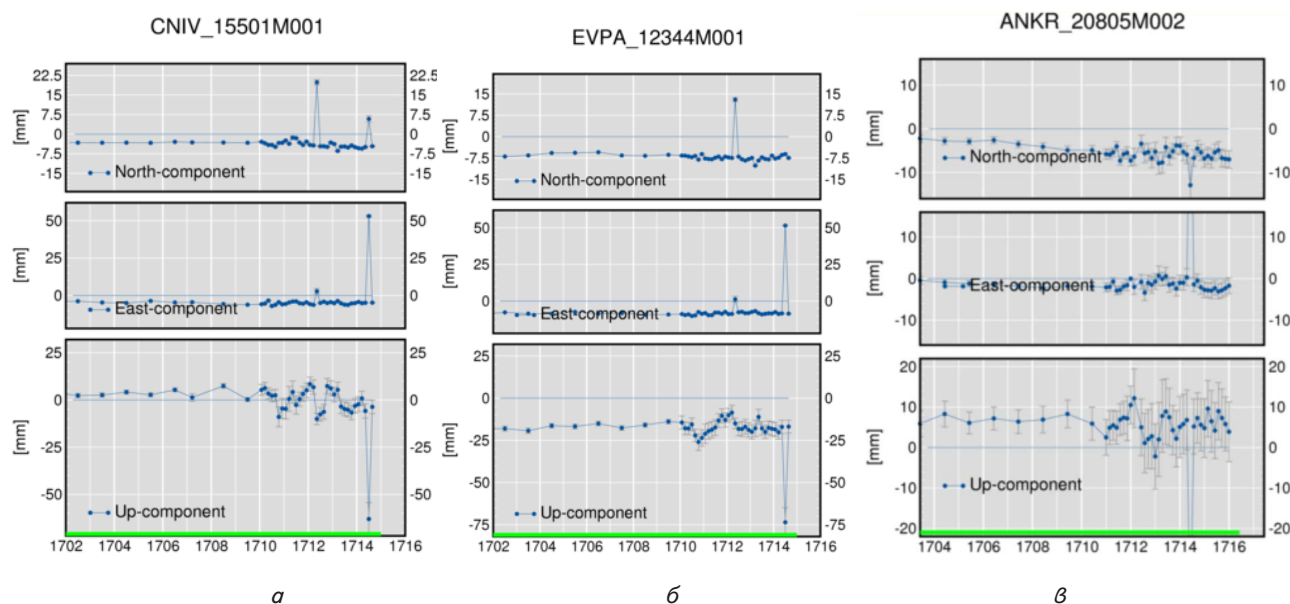


Рис. 2. Результаты измерения скачка деформаций станциями: а – Чернигова; б – Евпатории; в – Анкары по данным EPN (временная шкала в GPS неделях) [9]

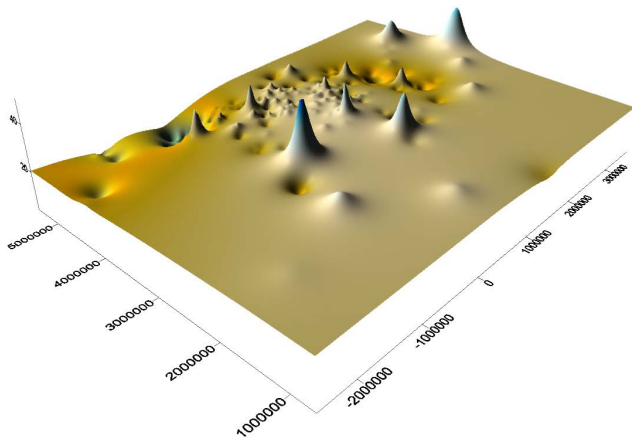


Рис. 3. Карта горизонтальной проекции вектора смещения пунктов EPN 13-14.11.2012 г. (по вертикальной оси горизонтальные смещения в мм, по X; Y географические координаты в градусах $1 \cdot 10^5$. Меридиан Гринвича отмечен как «0»)

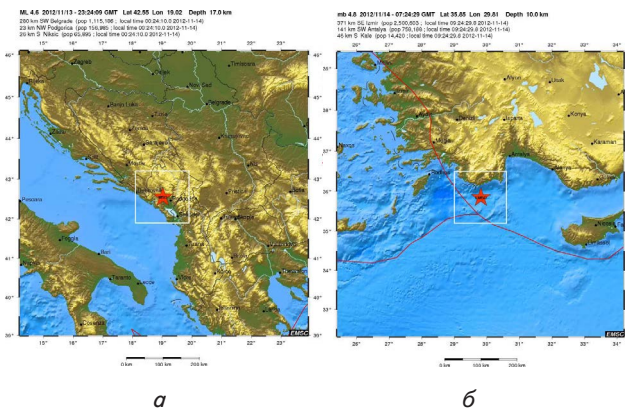


Рис. 4. Карты эпицентров мелкофокусных землетрясений в Европе с $M > 4,5$ а – 13.11.2012, б – 14.11.2012 [10]

Рассмотрим пространственную изотропность деформаций геологической среды во время обычных деформаций приливного характера. На рис. 5, а, б показаны данные измерения деформаций во время прохождения секторальной полусуточной деформационной волны через геодезические пункты США – Бостона и Вашингтона и графики различия смещений между указанными пунктами. Вертикальные смещения пунктов имеют амплитуду до 30 см, горизонтальные – до 10 см.

В работе Дианы Харитоновой «The impact of solid Earth tides on the DGNSS positioning results» [11] приведены данные об изменении амплитуды приливных деформаций в зависимости от широты по данным измерений геодезических пунктов EPN – VAAS (Финляндия) KURE (Эстония) BRDL (Польша) DEVA (Румыния) AUT1 (Греция).

На рис. 6, а–д показано, что на широте Греции вертикальная составляющая полусуточных и суточных приливов в твердом теле Земли на 14 см больше, чем на широте Финляндии.

В другой работе Дианы Харитоновой «Solid Earth Tides in the Territory of Latvia» [13] показано, что во время экстремальных приливов при Солнечных затмениях сизигийные приливные геодеформации земной поверхности в два раза выше квадратурных.

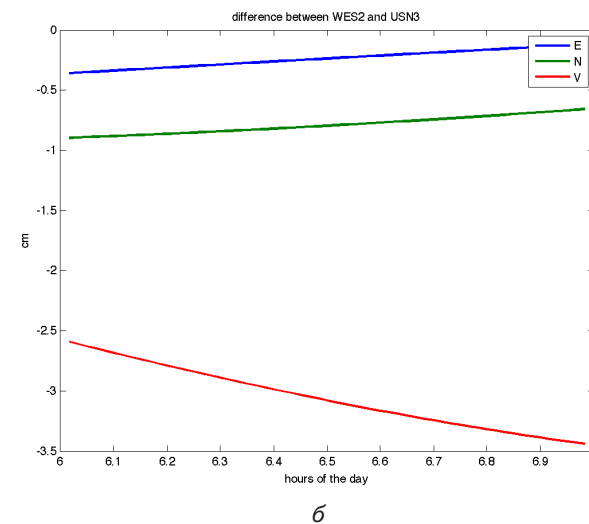
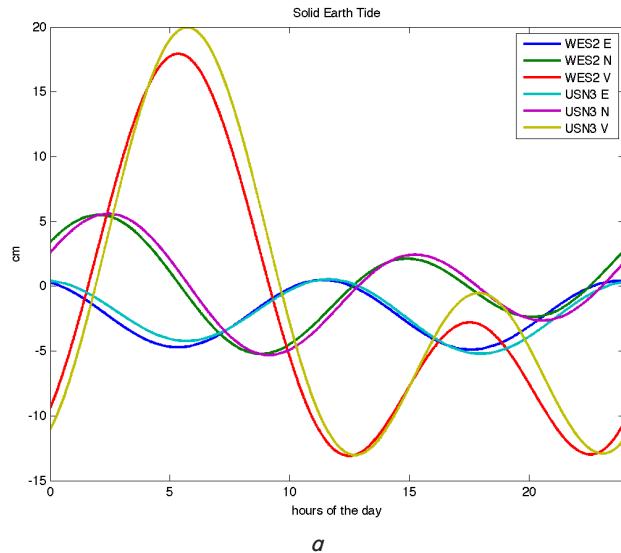


Рис. 5. Пример измерения геодеформаций приливного типа а – приливные деформации в пункте WES2 (Boston) и USNO (Washington); б – смещения фаз приливных деформаций [12]

Учитывая характер распространения по поверхности Земли полусуточных секториальных и суточных тессеральных приливных деформаций (рис. 7) можно предположить, что они могут нарушать сплоченность геологической среды.

Дивергентно-конвергентный характер приливов в твердом теле Земли на западе Северо-Американского континента подтвержден результатами исследований Калифорнийского технологического института (рис. 8), опубликованные в работе под названием «GPS data used to model effects of tidal loads on Earth's surface» опубликованной на сайте Scince Dialy [15].

На рис. 8 показано, что приливные эллипсы в разных районах могут иметь разное соотношение длин большой и малой осей. Кроме этого показано, что один и тот же приливной процесс на севере США вызывает реверсивные смещения в направлении запад-восток с длиной вектора до 25 см, южнее такие же деформации происходят в направлении СЗ-ЮВ. То есть, внутрису-

точные приливные деформации действительно приводят к нарушениям сплоченности геологической среды. На базе длинной 600 км главные оси приливных эллипсов геодеформаций отличаются примерно на 45°. То есть, в случае секториального прилива в твердом теле Земли каждые 6 часов дивергентные условия в этом регионе сменяются дивергентными.

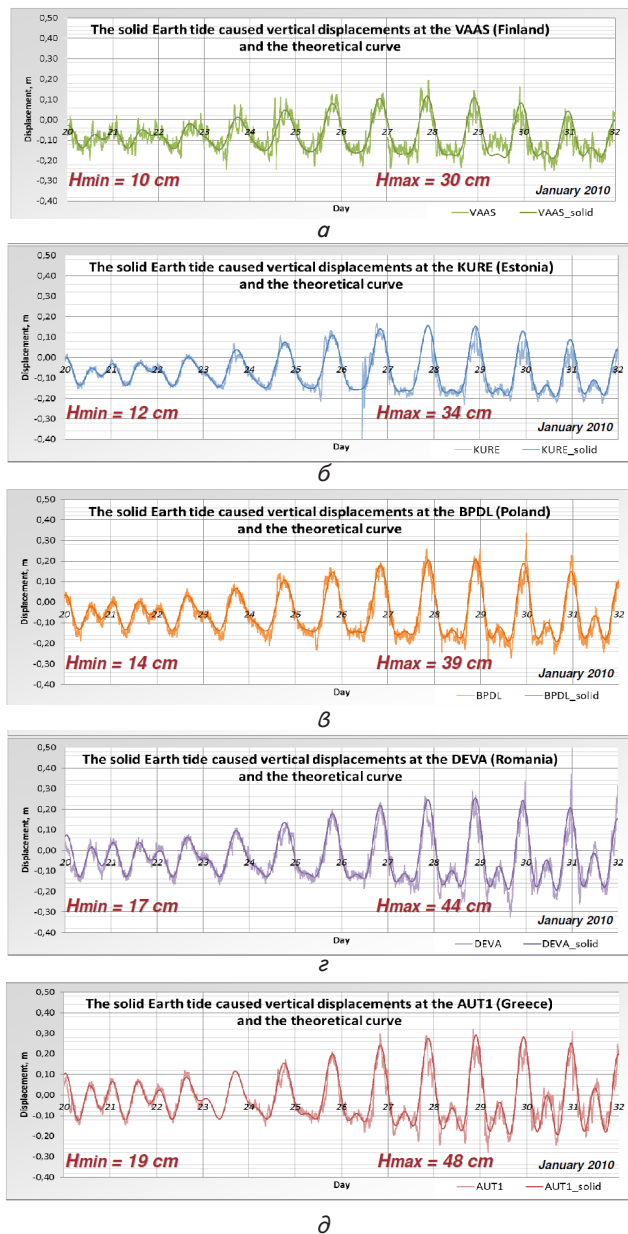


Рис. 6. Результаты измерения внутрисуточных приливов в твердом теле Земли в пунктах а – EPN – VAAS (Финляндия), б – KURE (Эстония), в – BRDL (Польша), г – DEVA (Румыния), д – AUT1 (Греция) [13]

Для изучения внутрисуточных приливных деформаций земной поверхности методами спутниковой геодезии с использованием перманентных геодезических сетей необходимо выполнять построение карт соотношения длин большой и малой осей приливного эллипса, угловых характеристик большой оси приливного эллипса, отклонений (от теоретических характеристик) фазы прихода приливных геодеформаций.

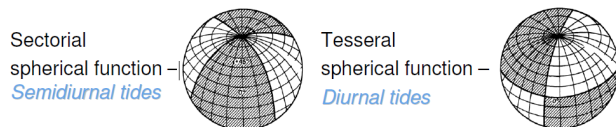


Рис. 7. Характер распространения по поверхности Земли полусуточных секториальных и суточных тессеральных приливных деформаций [14]

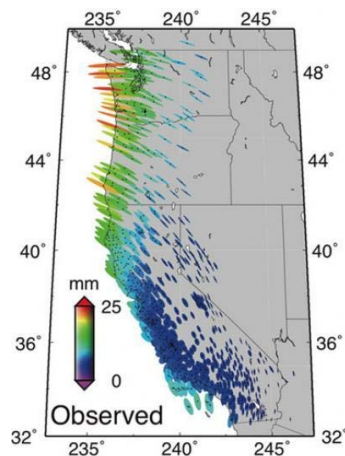


Рис. 8. Приливные эллипсы приливных геодеформаций в твердом теле Земли по данным Калифорнийского технологического института [15]

5. Выводы

Мониторинг геодеформаций локального пространственного масштаба в настоящее время возможен по данным о времени и месте техногенных аварий и разрушений инженерных сооружений или путем видеорегистрации деформаций существующих и возникающих трещин на поверхности земли. Этот метод ограничен урбанизированными территориями городских агломераций.

Для мониторинга геодеформаций с периодами более суток и регионального масштаба целесообразно выполнять картирование среднесуточных смещений поверхности Земли, используя на европейской территории систему спутниковой геодезии EPN. Предложено строить карты модуля вектора и угловых характеристик посуточных горизонтальных и вертикальных смещений. По сути, это использование в качестве инструмента мониторинга динамические характеристики 3D изображений деформаций.

Во время быстротекающих геодеформаций, в том числе в результате внутрисуточных приливов в твердом теле Земли, возможно возникновение конвергентно-дивергентных движений и нарушение сплоченности геологической среды. Нарушение сплоченности геологической среды может приводить к разрушению инженерных сооружений и коммуникаций. Для мониторинга этого типа геодеформаций методами спутниковой геодезии необходимо за каждый период полусуточных и суточных волн выполнять построение карт соотношения длин большой и малой осей приливного эллипса, угловых характеристик большой оси приливного эллипса, отклонений (от теоретических характеристик) фазы прихода приливных геодеформаций.

Литература

1. Учитель, И. Смена парадигмы современной геодинамики и сейсмотектоники [Текст] / И. Учитель, Б. Капочкин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, – 80 с.
2. Варталян, Г. С. ГГД-мониторинг как ключевая технология системы краткосрочного и оперативного прогноза сильных землетрясений [Текст] : матер. конф. / Г. С. Варталян // Опыт комплексного изучения геофизических полей для целей сейсмпрогноза. – М.: Геоинформмарк, 1998. – С. 10–12.
3. Варталян, Г. С. Гидрогеодеформационное поле Земли [Текст] / Г. С. Варталян, Г. В. Куликов // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 262. № 2. – С. 310–314.
4. Войтенко, С. П. Геодинамика. Основы кинематической геодезии [Текст] / С. П. Войтенко, Б. Б. Капочкин, И. Л. Учитель, В. Н. Ярошенко. – Астропринт, Одесса, 2007. – 264 с.
5. Учитель, И. Л. Геодинамика. Основы динамической геодезии [Текст] / И. Л. Учитель, В. С. Дорофеев, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин. – Одесса: Астропринт, 2008. – 311 с.
6. Учитель, И. Л. Геодеформації, їх вплив на інженерні споруди [Текст] / И. Л. Учитель, В. С. Дорофеев, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин. – Одесса: Астропринт, 2012. – 366 с.
7. Черкез, Е. А. Ротационно-фильтрационная модель водного баланса Куяльницкого лимана [Текст] : всеукр. наук.-прак. конф. / Е. А. Черкез, В. И. Шмуратко, О. А. Вахрушев // «Лимани північно-західного Причорномор'я: актуальні гідроекологічні проблеми та шляхи їх вирішення». – Одеса: ТЕС, 2012. – С. 50–51.
8. Тяпкин, К. Ф. Блоки земной коры с позиций новой гипотезы структурообразования [Текст] / К. Ф. Тяпкин // Геологический журнал. – 1993. – № 4. – С. 10–20.
9. EUREF Permanent Network [Electronic resource] / Available at: <http://www.epncb.oma.be>
10. Latest M3+ earthquakes [Electronic resource] / Available at: <http://www.emsc-csem.org>
11. The impact of solid Earth tides on the DGNSS positioning results [Electronic resource] / Latvia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems, 2012. – Available at: <http://www.oosa.unvienna.org/pdf/sap/2012/un-latvia/ppt/2-11.pdf>
12. University of Colorado Boulder [Electronic resource] / Available at: <http://www.colorado.edu/ASEN/asen6090/SolidTides>
13. Haritonova, D. Solid Earth Tides in the Territory of Latvia [Electronic resource] / D. Haritonova. – Geomatics, 2012. – Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/13674/fulltext>
14. Earth tide [Electronic resource] / Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Earth_tide
15. ScienceDaily [Electronic resource] / Available at: <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/04/110415104542.htm>