

GPS ИЗМЕРЕНИЯ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Постановка проблемы

Человеческие жертвы и разрушения, вызываемые катастрофическими и сильными землетрясениями, дестабилизируют состояние общества и существенно влияют на бюджет страны. Совершенствование технологий контроля развития сейсмотектонических процессов и прогноз землетрясений – одна из наиболее значимых проблем народного хозяйства и науки.

Важными задачами организации геодезического мониторинга, в том числе с помощью GPS измерений, являются поиски предвестников землетрясений и изучение необратимых и знакопеременных смещений земной коры, вызванных сильнейшими землетрясениями. С развитием GPS систем и усовершенствованием технологий спутниковых измерений и обработки стала возможной детальная регистрация процессов, происходящих в периоды активизации сейсмичности и проявления интенсивных сейсмических колебаний. GPS измерения с большой частотой регистрации спутниковых сигналов оказываются мощным инструментом изучения длиннопериодных волн при сильнейших землетрясениях. В данной работе рассмотрены опубликованные результаты GPS измерений, приуроченных к сейсмотектоническому циклу сильнейших землетрясений последнего десятилетия и показана перспективность использования GPS технологий при решении сейсмологических задач.

Отражение сейсмотектонических процессов в деформациях земной коры по данным GPS измерений

Измитское землетрясение (Турция)

По данным наблюдений на пунктах сети EUREF были проанализированы движения земной поверхности в регионах юго-восточной Европы до и после землетрясения Измит (Izmit), происшедшего 17.08.1999 ($M=7,8$ по Рихтеру). Землетрясение произошло на западном конце Северо-Анатолийского разлома, который принято считать границей Евразийской и Анатолийской тектонических плит. В пределах разломной зоны за период 1939–1999 гг. зафиксировано несколько разрушительных землетрясений с магнитудой от 6,8 до 7,8. Эпицентр землетрясения 1999 г. расположен в 40 км к юго-западу от пос. Измит и в 270 км к северо-востоку от Анкары. Анализ измерений

GPS на Европейской сети пунктов, в том числе вблизи эпицентральной зоны, выполнены В. Эрспергером и представлялись на симпозиуме EUREF в 2000 г. [1]. Анализ данных показывает, что пункты по бортам Северо-Анатолийского разлома в результате главного толчка сместились по направлению их долговременного развития: TUBI к юго-востоку на 590 мм, ANKR на северо-северо-восток на 17 мм. Пункт TUBI расположен в 40 км западнее инструментального эпицентра землетрясения. Плановое перемещение пункта в течение года перед землетрясением происходило по сложной траектории в виде петли («восьмерка») с мая 1998 г. по август 1998 г. (рис. 1).

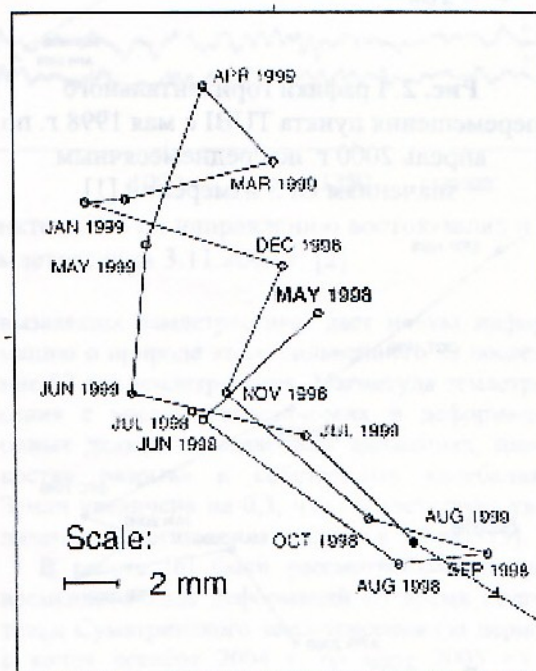


Рис. 1. Графики горизонтального перемещения пункта TUBI с мая 1998 г. по начало сентября 1999 г. по среднемесячным значениям GPS измерений [1]

Смещение, достигшее 10 мм, шло в юго-западном, затем юго-восточном направлении, которое сменилось на северо-западное, продолжавшееся до апреля 1999 г. и достигшее 21 мм, после чего пошло в юго-восточном направлении, т.е. в сторону эпицентра, причем с более

чем на порядок большей скоростью (рис. 2). После землетрясения смещение продолжалось в юго-восточном направлении, но с малой скоростью, а с декабря 1999 г. по апрель 2000 г. смещение шло на запад и юго-запад (рис. 3), затем вновь сменилось на юго-восточное. Сложный, но достаточно подобный характер перемещения у различных пунктов с разными значениями отмечается в течение длительного временного интервала перед землетрясением и в период афтершоковой деятельности. Аномальные изменения в движениях начались за полгода до основного толчка и проявляются для пунктов на расстояниях до 1000 км от эпицентра.

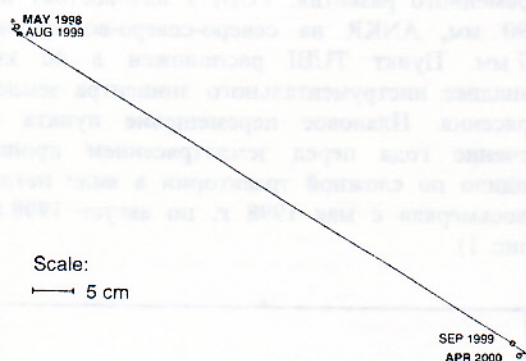


Рис. 2. Графики горизонтального перемещения пункта TUBI с мая 1998 г. по апрель 2000 г. по среднемесячным значениям GPS измерений [1]

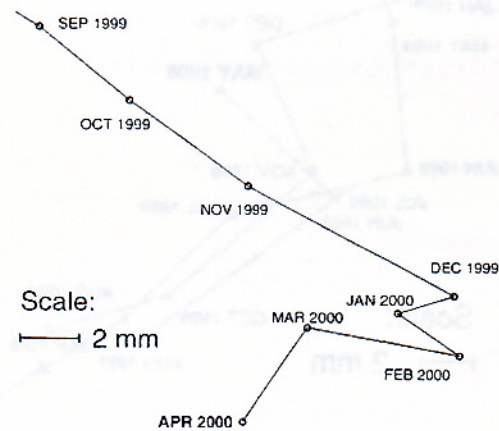


Рис. 3. Графики горизонтального перемещения пункта TUBI в период афтершоковой деятельности (сентябрь 1999 г – апрель 2000 г.) по среднемесячным значениям GPS измерений [1]

Аляскинское землетрясение

Регистрация спутниковых сигналов при GPS измерениях с интервалом 1 с позволяет фиксировать знакопеременные перемещения приповерхностных слоев земной коры при продвижении сейсмической волны, вызванной земле-

трясением. С помощью такой регистрации и специальной обработки получена прекрасная запись землетрясения 3.11.2002 магнитудой 7,9 на Аляске (рис. 4), представленная на рис. 5 [2]. Пятью станциями GPS на расстояниях от 100 до 3800 км четко прописаны горизонтальные смещения по северной (N) и южной (E) компонентам, отражающие поверхностные волны. В смещениях пунктов на расстоянии 4000 км от эпицентра сейсмические волны проявились отчетливо, а на удалении до 5200 км сейсмические смещения неотделимы от шума (в пределах 1 см).

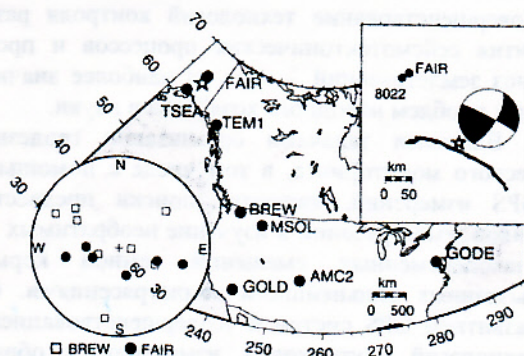


Рис. 4. Схема расположения эпицентра землетрясения 3.11.2002 и пунктов GPS [2]

Анализ показывает, что значение амплитуды колебания в изменениях координат, вызванные сейсмическим событием, могут не зависеть от расстояния до эпицентра. Некоторые пункты на близком расстоянии от эпицентра испытали колебания с меньшей амплитудой, чем пункты более удаленные от эпицентра. Во всех случаях вертикальные смещения были несколько меньше горизонтальных.

Размах сейсмических колебаний на станции, обозначенной на рис. 5 символом AMC2 (в 3800 км от эпицентра), больше двух сантиметров и в 1,5–2 раза больше, чем фиксируется сейсмометрами мировой сети цифровых станций. Видимо, дело в том, что современная цифровая сейсмическая аппаратура на сверхдлинных периодах не обеспечивает адекватной записи процесса и, кроме того, вносит искажения за счет влияния локальных структур.

Подобные данные были также получены при японском землетрясении 26.05.2003 г. ($M=7,0$), где на пунктах, удаленных от эпицентра на 165 км и 544 км, были зафиксированы колебательные движения с амплитудой до 20 см. Таким образом, выполненный анализ данных GPS измерений показал, что применение спутниковых технологий позволяет отслеживать развитие деформаций с разной амплитудой и периодом, сопутствующих сейсмотектоническому процессу.

Вывод – использование GPS технологий

оказывается перспективным при решении ряда сейсмологических задач.

Суматра-Андаманские землетрясения

Катастрофическое Суматринское землетря-

сение 26.12.2004 г. ($M_W=9,0-9,3$) и последующие афтершоки произошли в период достаточного развития непрерывных GPS измерений в регионе. Поэтому анализ данных этих измере-

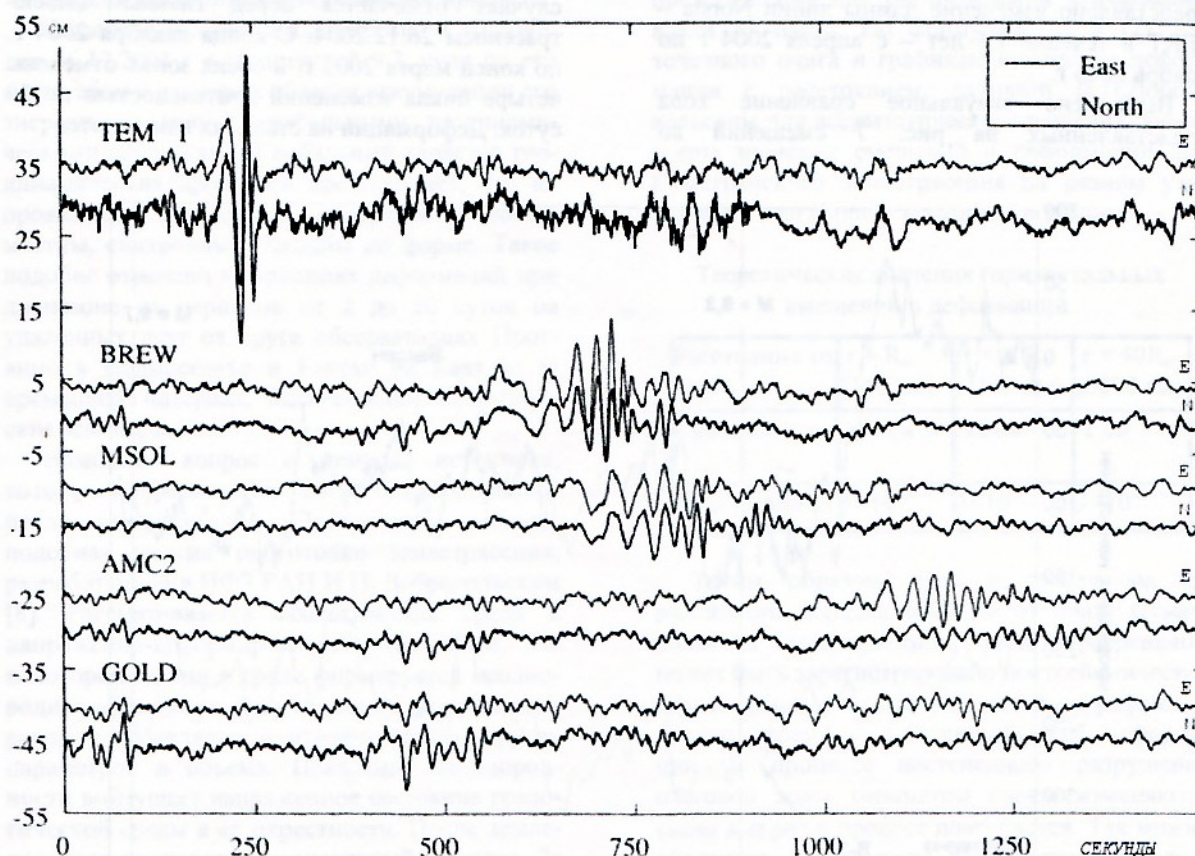


Рис. 5. Графики горизонтальных перемещений пунктов GPS по направлению восток-запад и север-юг во время Аляскинского землетрясения 3.11.2002 г. [2]

ний представляет большой интерес при изучении геодинамики региона. Эпицентр основного толчка располагается в индонезийском сегменте Альпийско-Индонезийского подвижного пояса между северо-западным окончанием острова Суматра и островом Симелуэ, между Индо-Австралийской и Евразийской литосферными плитами. На август 2005 года локальная GPS сеть SuGAr состояла из 24 перманентных станций по границе Суматранской плиты. Перед сильнейшим землетрясением в декабре 2004 года сеть SuGAr показывала устойчивое смещение островов внешней дуги к побережью материка со скоростью 25–50 мм/год. Во время Суматра-Андаманского землетрясения на этой сети получены записи смещений в пределах сантиметра к югу и востоку [3]. Косейсмические смещения, зафиксированные после Нияского землетрясения 28.03.2005 г. ($M_W=8,7$), достигали 5 м с ориентацией на юго-запад. Отличие ориентации остаточных смещений (юго-запад) от ориентации относительного движения двух литосферных мегаплит (север, северо-восток),

вызвавших землетрясение, дает новую информацию о природе этого сильнейшего за последние 50 лет землетрясения. Магнитуда землетрясения с учетом геодезических и деформационных данных о медленных движениях, плоскостях разрыва и собственных колебаниях Земли увеличена на 0,3, что соответствует увеличению энергии землетрясения в 3,4 раза [5].

В работе [6] были рассмотрены вариации временного хода деформаций во время подготовки Суматринского землетрясения (за период с конца декабря 2004 г. по март 2005 г.) в далеких друг от друга обсерваториях Протвино в Подмосковье и Баксан на Кавказе, на эпицентральных расстояниях 7000 км и 8000 км. В обоих пунктах на протяжении 1,5 месяцев вариации деформаций земной коры длительностью до 20 суток и величиной порядка 50 нанострейн ($1 \text{ нстр} = 10^{-9}$) оказались взаимно коррелируемыми между собой (рис. 6). Временной ход деформационных изменений за данный период можно также получить по данным GPS измерений. Приведем пример — изменение длины линии между австралийскими пунктами

Norsia и Pert международной службы IGS, расположенными на расстоянии 90 км друг от друга и на удалении 2–3 тыс. км от очага Суматринских землетрясений [7]. На рис. 7 представлено изменение длины линии Norsia – PERT в течение 1,5 лет – с апреля 2004 г по ноябрь 2005 г.

Выполнено визуальное сравнение хода представленных на рис. 7 смещений во

временном интервале между двумя вертикальными границами с деформационными данными на станциях Подмосковья и Кавказа (рис. 6).

Резкое изменение деформаций в обоих случаях отмечается перед главным землетрясением 26.12.2004. С конца декабря 2004 г. по конец марта 2005 г. в обеих зонах отмечены четыре цикла изменений длительностью до 20 суток. Деформации на станциях изменяются

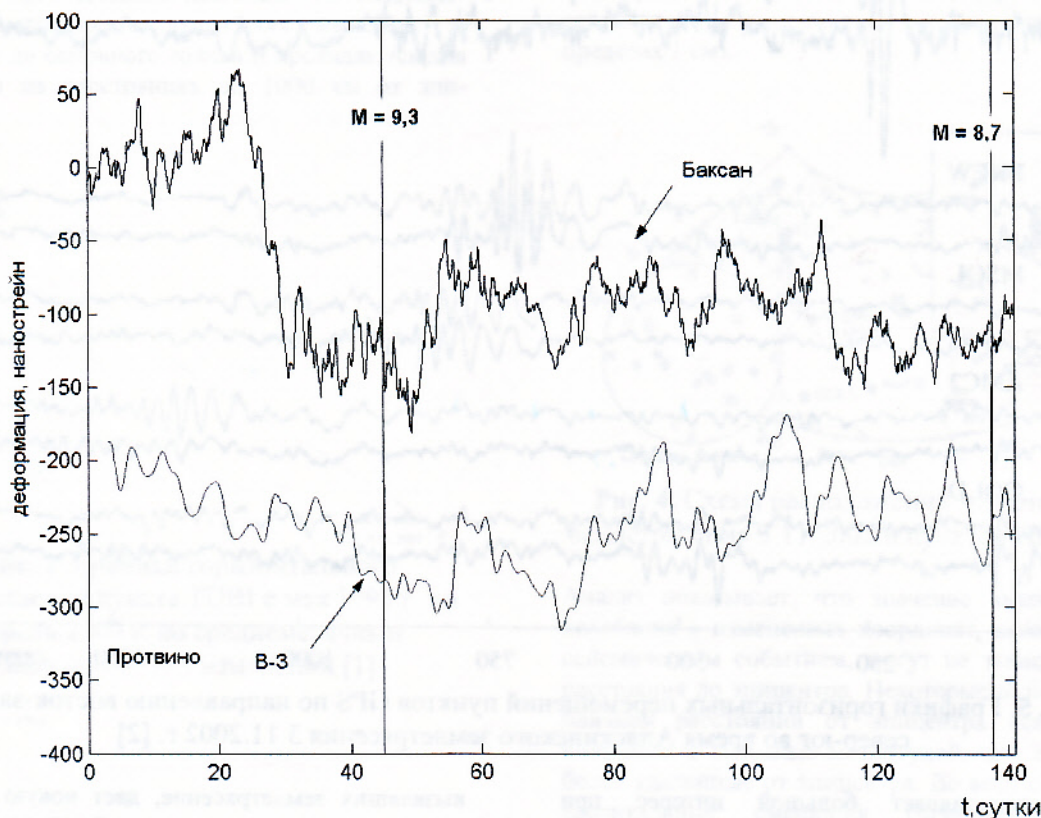


Рис. 6. Временной ход деформаций на деформационных станциях Баксан и Протвино

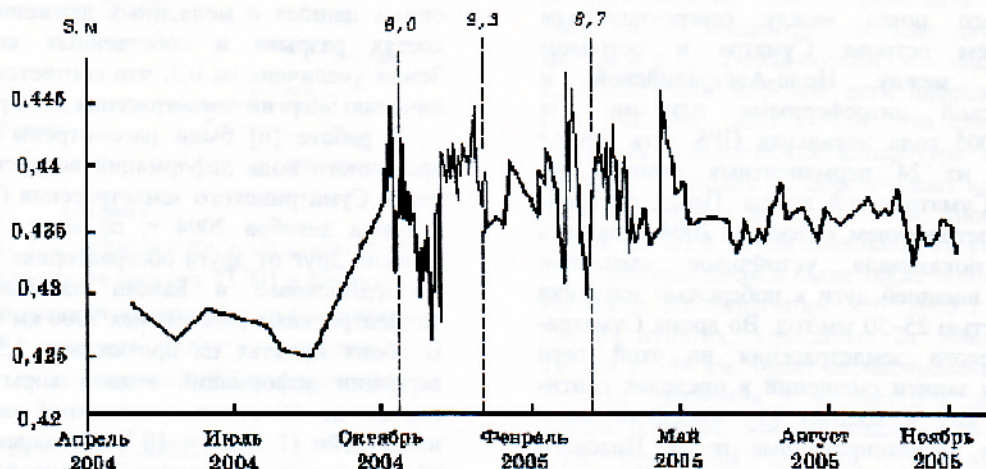


Рис. 7. Изменение длины линии Norsia-PERT и проявление возможных предвестников

на $(5-10) \times 10^{-8}$, а относительные смещения на базе 90 км в Австралии достигают 3–10 мм, что

соответствует деформации $(3-10) \times 10^{-8}$. Так что некоторое совпадение постсейсмических эффек-

тов деформаций имеет место в разных полушариях Земли и в разных направлениях от очага землетрясения.

О природе источника цикличности процесса

Катастрофическое землетрясение в Индонезии 26.12.2004 г с магнитудой 9,3, судя по его масштабам и размерам области аккумуляции его энергии, связано с глобальными геодинамическими процессами. Глобальный характер геодинамических процессов предполагает, что их проявления на земной поверхности повсеместны, синхронны и сходны по форме. Такое подобие отмечено в вариациях деформаций при диапазоне их периодов от 2 до 20 суток на удаленных друг от друга обсерваториях Протвино в Подмоскowie и Баксан на Кавказе за временной интервал, включающий Суматринские землетрясения.

Возникает вопрос о природе источника, которым определяется циклический процесс после землетрясения. Предлагается модель, подобная модели подготовки землетрясения, разработанной в ИФЗ РАН И.П. Добровольским [8]. Рассматривается геологическая среда в напряженно-деформированном состоянии. На некоторой стадии в среде формируется неоднородное включение. Оно связано с разрушением среды и проявляется в изменениях ее упругих параметров и объема. Появление неоднородности возмущает напряженное состояние геологической среды в ее окрестности. После землетрясения происходит аналогичный процесс. За основным разрывом следует процесс постепенного разрушения среды и в очаге, и в его окрестности за счет афтершоков, сдвиговых деформаций и оползней. В результате увеличиваются размеры разрушенной зоны и степень ее разрушения. Этот процесс многоступенчатый: по мере разрушения в зоне землетрясения размеры неоднородности и ее контрастность растут. Решение для точечного источника, отражающее процесс на больших по сравнению с размерами неоднородности расстояниях, имеет простой вид. Смещения по порядку величины равны:

$$U = \alpha V \tau / (8 \pi \mu) r^2, \quad (1)$$

где α – степень изменения модуля сдвига ненарушенной среды μ , V – объем включения, равный объему сферы радиуса R_0 , τ – касательные напряжения в среде. Эти параметры равны: $\alpha = 10\% = 0.1$, $V = 13 \times 10^6 \text{ км}^3$, а $R_0 = 150 \text{ км}$, $\tau = 1 \times 10^8 \text{ Па}$, $\mu = 2 \times 10^{10} \text{ Па}$, r – расстояние от центра неоднородности до рассматриваемой точки.

Деформация в окрестности очага равна:

$$\varepsilon = (3 \alpha V \tau / 48 \pi \mu) \times (R_0 / r)^3, \quad (2)$$

Смещения среды изменяются с расстоянием от источника по квадратичному закону, деформации – как расстояние в кубе. И.П. Добро-

вольским [8] получено приблизительное решение для упругого полупространства с силовым источником заданного диаметра, расположенным на разной глубине, и дано графическое представление для распределения деформаций вдали от очага. По формулам (1) и (2) для точечного очага и графикам изменения деформации с расстоянием, данными И.П. Добровольским для асимптотического решения, вычислены значения смещений и деформации для Суматранского землетрясения на разном удалении от очага, представленные в таблице.

Теоретические значения горизонтальных смещений и деформаций.

Расстояние от очага	$r = R_0$ (150 км)	$r = 10R_0$ (1500 км)	$r = 40R_0$ (6000 км)
Смещение	120 см	12 см	1 см
Деформации	5×10^{-4}	5×10^{-7}	3×10^{-8}

Таким образом, судя по расчетам, до расстояний порядка 6000 км от очага Суматранского землетрясения, GPS измерениями может быть зарегистрировано постсейсмическое горизонтальное смещение, деформографами и наклономерами – постсейсмические деформации. В процессе постепенного разрушения очаговой зоны параметры среды изменяются снова в α раз и процесс повторяется. Так можно объяснить циклические возмущения деформаций после землетрясения.

Литература

1. Ehrnsperger W. Analysis of the EUREF – stations in the South-East of Europe with respect to the Izmit Earthquake on August 1999 // Proc. of the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). – Munchen. – 2000. – Vol. 9. – P. 79–88.
2. Larson K.M., Bodin P., Gombert J. Using 1-Hz GPS data to measure Deformations caused by the Denali fault Earthquake // Science. – 2003. – V 300 – 30 Vfy – P. 1421–1424.
3. <http://www.tectonics.caltech.edu/sumatra/sugar.html>.
4. Шевченко В.И., Лукк А.А., Прилепин М.Т. Суматранское землетрясение 26.12.2004 г. – проявление неплейттектонического процесса в литосфере // Физика Земли. – 2006. – № 12. – С. 55–76.
5. Park J., Song T., Kanamory H., Berger J., Braitenberg C. at all. Earth's free Oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman Earthquake // Science. – 2005. – V. 308. – P. 1139–1144.
6. Латынина Л.А., Гусева Т.В. Проявления глобальных тектонических процессов в де-

формациях земной коры // XI Міжнародний науково-технічний симпозиум "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS-технології – Львів: АГТ. – 2006. – С. 113–114.

7. Докукин П.А., Кафтан В.И. Непрерывные GPS / ГЛОНАСС измерения коротких

базовых линий для выявления сильных землетрясений // Геодезия и Картография. – 2006. – № 2. – С. 7–10.

8. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ АН СССР, 1984. – 189 с.

GPS ВИМІРЮВАННЯ КОСЕЙСМІЧНИХ І ПОСТСЕЙСМІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ СИЛЬНИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Т.В. Гусева, Л.О. Латиніна

Важливими завданнями GPS вимірювань є пошуки провісників землетрусів і вивчення необоротних і знакозмінних зміщень земної кори, викликаних сильними землетрусами. З розвитком GPS систем і вдосконаленням технологій супутникових вимірювань і методів обробки стала можливою детальна реєстрація процесів, що відбуваються в періоди активізації сейсмічності та інтенсивних сейсмічних коливань. GPS вимірювання з великою частотою реєстрації супутникових сигналів виявляються могутнім інструментом вивчення довгоперіодних хвиль при сильних землетрусах. У роботі розглядаються приклади реєстрації необоротних, ко- і постсейсмічних горизонтальних зміщень та деформацій земної поверхні, що виникають при розвитку сеймотектонічного процесу і підготовці сильного землетрусу (Ізмітського 1999 р., Аляскінського 2002, Суматранського 2004 р. та ін.).

GPS MEASUREMENT COSEISMICAL AND POSTSEISMICAL DEFORMATIONS OF STRONG EARTHQUAKES

T.V. Guseva, L.A. Latynina

The important problems of the GPS measurements are the searches of the earthquake precursors and study of irreversible and varying displacement of the Earth crust, due to the strongest earthquakes. With development of GPS systems and improvement of satellite technologies of measurements and methods of processing there was possible to in detail register the processes occurring during activation of seismicity. GPS measurement with the large frequency of registration of satellite signals are the powerful tool of study longperiodical waves at the strongest earthquakes. There are considered the examples of registration of the irreversible and coseismical horizontal displacements and deformations of the Earth crust surface arising during the tectonical processes, accompanied the strong earthquakes (Izmit by 1999, Alaska 2002, Sumatra 2004 etc.).

Інститут фізики Землі РАН, м. Москва, Росія

Надійшла 29.11.2007