GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2012 VOLUME 3 ISSUE 3 PAGES 275-287

http://dx.doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0074

ANALYSIS OF DEFORMATION PROCESSES IN THE LITHOSPHERE FROM GEODETIC MEASUREMENTS BASED ON THE EXAMPLE OF THE SAN ANDREAS FAULT

Yu. V. Gabsatarov

Geophysical Survey RAS, Obninsk, Russia

Abstract: Analysis of data from permanent GPS observation stations located in tectonically active regions provides for direct observation of deformation processes of the earth's surface which result from elastic interaction of the lithospheric plates and also occur when accumulated stresses are released by seismic events and postseismic processes.

This article describes the methodology of applying the regression analysis of time series of data from GPS-stations for identification of individual components of the stations' displacements caused by the influence of various deformation processes. Modelling of the stations' displacements caused only by deformations of the marginal zone, wherein the lithospheric plates interact, allows us to study variations of the steady-state deformation in the marginal zone.

The proposed methodology is applied to studies of variations of fields of cumulative surface displacements, surface displacement velocity and maximum shear strain velocity which are determined from the GPS data recorded prior to the Park-field earthquake of 28 September 2004 (M_w =6.0).

Combined analysis of the variations of the above-mentioned fields shows that measurable anomalies of the elastic deformation of the transform fault's edge took place prior to the seismic event of 28 September 2004, and such anomalies were coincident in space and time with the focal area of the future seismic event.

Key words: deformation, regression analysis, lithosphere, space geodesy.

Recommended by V.A. San'kov 2 July 2012

Citation: *Gabsatarov Yu.V.*, 2012. Analysis of deformation processes in the lithosphere from geodetic measurements based on the example of the San Andreas fault. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (3), 275–287. doi:10.5800/GT-2012-3-3-0074.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА ПРИМЕРЕ РАЗЛОМА САН-АНДРЕАС

Ю. В. Габсатаров

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

Аннотация: Анализ данных постоянных станций GPS-наблюдений в тектонически активных регионах позволяет осуществлять прямое наблюдение процессов деформирования земной поверхности как вследствие упругого взаимодействия литосферных плит, так и вследствие высвобождения накопленного напряжения в результате сейсмических событий и постсейсмических процессов.

Представлена методология использования регрессионного анализа временных рядов станций GPS для выделения



ISSN 2078-502X

отдельных компонент смещения станций, вызванных действием различных деформационных процессов. Возможность создания модели смещения станций, обусловленного только деформированием пограничной зоны взаимодействия литосферных плит, позволяет исследовать вариации стационарного процесса деформирования этой зоны.

В соответствии с представленной методологией получены вариации поля накопленных поверхностных смещений, а также вариации поля скоростей поверхностных смещений и поля скорости максимальной деформации сдвига по данным станций GPS-наблюдений перед Паркфилдским землетрясением 28.09.2004 г., *M*_w=6.0.

Совместный анализ вариаций этих полей показал, что перед сейсмическим событием 28.09.2004 г. происходили заметные аномалии процесса упругого деформирования краевой области трансформного разлома, локализация которых совпадает пространственно и по времени с очаговой областью будущего сейсмического события.

Ключевые слова: деформационные процессы, регрессионный анализ, литосфера, космическая геодезия.

1. Введение

В современном понимании литосфера – это внешняя относительно твердая оболочка Земли, состоящая из земной коры и верхней части мантии до астеносферы. Согласно тектонике плит литосфера разделена на стабильные жесткие фрагменты – литосферные плиты, которые двигаются по относительно пластичной астеносфере и взаимодействуют между собой на границах. Литосферные плиты в первом приближении описываются как жесткие тела, и их движение подчиняется теореме вращения Эйлера. В настоящее время накопление и анализ больших объемов сейсмологических данных, а также развитие сетей высокоточных геодезических наблюдений позволили выдвинуть гипотезы о существовании в составе стабильных литосферных плит более мелких тектонических блоков, движущихся согласованно с основной плитой, но обладающих также и собственным движением. Ярким примером таких блоков, отсутствующих в общепринятой геологической модели NUVEL-1А [DeMets et al., 1990, 1994], являются микроплиты в Северо-Восточной Азии, расположенные в регионе взаимодействия трех крупнейших тектонических плит: Евразийской, Североамериканской и Тихоокеанской. Именно взаимное перемещение тектонических блоков различного масштаба и их столкновение на границах являются основной причиной возникновения деформационных процессов в литосфере [Le Pichon, 1968; Minster et al., 1974; Kuzmin, 2009]. Скорость перемещения тектонических блоков может варьироваться от долей миллиметров в год для геодинамики стабильных в первом приближении областей до нескольких сантиметров в год для крупномасштабной динамики литосферных плит, что обусловливает различную интенсивность деформационных процессов. Наблюдаемые деформационные процессы сосредоточены в основном, вследствие жесткости тектонических блоков, в достаточно узких деформационных поясах вокруг границ этих блоков. Продолжительность деформационных процессов, наблюдаемых в литосфере, варьируется в очень широком диапазоне и может составлять от нескольких секунд до миллионов лет. В общем случае исследование деформационных процессов требует комплексного подхода с использованием геологических, сейсмологических и геодезических данных.

2. ПРИМЕНЕНИЕ GPS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Одним из способов изучения деформационных процессов в литосфере является изучение распределения деформаций на земной поверхности, полученного с использованием методов космической геодезии. Решение обратных задач с использованием полученных геодезических данных позволяет исследовать механизмы, отвечающие за возникновение деформационных процессов.

В настоящий момент наиболее распространенным методом космической геодезии является использование технологии GPS-наблюдений. Начиная с 80-х годов XX в. сеть станций GPS-наблюдений непрерывно развивалась и к настоящему моменту покрывает весь земной шар, достигая максимальной плотности в наиболее сейсмически и тектонически активных регионах. Такое активное развитие и широкое распространение сети обусловлены относительной дешевизной аппаратуры для приема сигналов GPS, всепогодностью и автономностью системы, а также относительной простотой осуществления наблюдений. Принцип осуществления GPS-наблюдений состоит в применении высокоточного фазового метода измерения дальности для определения расстояния от приемника до активного спутника, излучающего сигнал особой формы. Одновременный прием сигналов от четырех спутников и более на нескольких пунктах GPS-наблюдений позволяет получить высокоточные оценки взаимных расстояний между этими пунктами за счет внесения поправок на задержку прохождения сигнала через ионосферу и тропосферу и уход часов [Steblov, 2004]. В

90-х годах XX в. на основе комплексных данных, полученных различными методами космической геодезии, была создана система относимости ITRF (International Terrestrial Reference Frame), образованная пунктами земной поверхности, высокоточные координаты и скорости которых увязаны таким образом, что вся система движется вместе с земной поверхностью (принцип NNR – No-Net-Rotation – интегрирование векторного произведения $\overline{V}_{cmanцuu} \times \overline{R}_{cmanцuu}$ для станций по всей земной поверхности должно давать ноль).

Анализ всех региональных геодезических данных в системе относимости ITRF [Altamimi, 2006; Altamimi et al., 2007] позволил перейти от измерения относительных деформаций к измерениям абсолютных величин и направлений смещений точек земной поверхности. Повышение точности определения орбит спутников (до 2 см) и совершенствование процедур постобработки исходных данных GPS значительно повысили точность определения координат и скоростей пунктов, которая для достаточно продолжительных непрерывных временных рядов наблюдений (более трех лет) составляет в настоящее время около 0.5 мм. Высокая точность измерения расстояний между точками земной поверхности и рассмотрение этих геодезических данных в системе относимости ITRF обусловливают применимость технологии GPS для исследования деформационных процессов в литосфере.

Анализ многолетних временных рядов ежесуточных наблюдений на почти 200 глобально распределенных пунктах показал, что полученные горизонтальные составляющие скоростей станций отличаются от соответствующих компонент, рассчитанных согласно построенной по данным GPS модели вращения литосферных плит, вследствие смещения центра системы ITRF относительно центра сферы вращения литосферных плит [Kogan, Steblov, 2008]. Это приводит к появлению мнимых деформаций земной поверхности при расчете смещения GPS-станции относительно литосферной плиты. В дальнейшем в данной работе в полученные геодезические данные вносится поправка за смещение центра системы относимости [Kogan, Steblov, 2008], что позволяет рассматривать деформационные процессы в литосфере в качестве единственного механизма, объясняющего полученные смещения станций.

На практике на станциях GPS-наблюдений формируются 24-часовые сессии фазовых отсчетов, затем с помощью пакетов постобработки данных полученные измерения обрабатываются для получения поправок к априорным координатам станций. Полученные высокоточные ежесуточные оценки положений станций сети в системе относимости ITRF комбинируются в продолжительные временные ряды, отражающие движения станций, вызванные как движением соответствующих литосферных плит, так и локальными деформационными процессами. В настоящей работе обработка первичных GPS-измерений осуществлялась с использованием программного пакета GAMIT/GLOBK разработки Массачусетского технологического института [*Herring et al., 2006*].

3. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Многолетние наблюдения на GPS-станциях, расположенных в срединных частях литосферных плит, показывают высокую стабильность этих регионов. Верхний предел скоростей остаточного смещения станций относительно подстилающей литосферной плиты составляет 0.5-0.9 мм/год, что при современной точности примерно равно стандартной ошибке геодезического решения [Kogan, Steblov, 2008]. В этой связи наиболее интересными для исследования являются данные наблюдений на станциях, расположенных в деформационных поясах вблизи границ литосферных плит. Исследование непрерывных временных рядов ежесуточных оценок координат этих станций позволяет осуществлять прямое наблюдение значительно более интенсивных процессов деформирования земной поверхности как вследствие упругого взаимодействия литосферных плит, так и вследствие высвобождения накопленного напряжения в результате сейсмических событий и постсейсмических процессов.

В данной работе для выделения отдельных компонент смещения станции, вызванного действием различных тектонических и нетектонических процессов, используется регрессионный анализ временных рядов.

В общем случае движение наземного пункта может быть представлено в виде:

$$y(t_{i}) = a + bt_{i} + c\sin(2\pi t_{i}) + d\cos(2\pi t_{i}) + + e\sin(4\pi t_{i}) + f\cos(4\pi t_{i}) + \sum_{j=1}^{n_{g}} g_{j}H(t_{i} - T_{gj}) + + \sum_{j=1}^{n_{h}} h_{j}H(t_{i} - T_{hj}) + \sum_{j=1}^{n_{k}} k_{j}H(t_{i} - T_{kj}) \cdot t_{i} +$$
(1)
+
$$\sum_{j=1}^{n_{l}} l_{j}\log((t_{i} - T_{lj})/m_{j})H(T_{lendj} - t_{i}) + + \sum_{j=1}^{n_{p}} p_{j}\exp(-(t_{i} - T_{pj})/r_{j})H(t_{i} - T_{pj}) + e_{i} ,$$

где H – ступенчатая функция Хевисайда, t_i , i = 1...N – моменты времени, в которые было измерено положение станции, a – координата станции, b – линейная скорость перемещения станции, c и d описывают годовую периодическую компоненту, e и f – полуго-

довую. Выражение $\sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj})$ описывает возмож-

ные мгновенные изменения положения станции в моменты T_{gj} вследствие смены GPS-антенны или других факторов, не связанных с деформацией земной поверхности. Выражение $\sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{hj})$ описывает

мгновенные смещения вследствие произошедших в моменты T_{hi} сейсмических событий. Выражение

 $\sum_{j=1}^{n_k} k_j H \left(t_i - T_{kj}
ight) \cdot t_i$ отвечает за возможные изменения

линейного тренда движения станции, произошедшие после сейсмических событий T_{kj} вследствие изменения напряженно-деформированного состояния среды.

Выражение $\sum_{j=1}^{n_l} l_j \log((t_i - T_{lj})/m_j) H(T_{lendj} - t_i)$ описыва-

ет возможное действие упругого фрикционного развития разломной зоны [*Marone et al.*, 1991]. Сумма

$$\sum_{j=1}^{j} p_j \exp\left(-\left(t_i - T_{pj}\right)/r_j\right) H\left(t_i - T_{pj}\right) \text{ характеризует эф-$$

фект, вызванный процессом вязкоупругой релаксации в верхней мантии и астеносфере [*Pollitz*, 1997]. Ошибки измерений *e_i* предполагаются независимыми и одинаково распределенными случайными величинами с *Me*=0 и известной корреляционной матрицей С. Моделирование каждой из трех компонент смещения станции производится независимо, так как корреляция между компонентами крайне мала [*Nikolaidis*, 2002].

В случае известного времени сейсмических и несейсмических смещений, а также времени начала и окончания действия постсейсмических процессов вышеописанная модель является линейной относительно искомых коэффициентов:

$$x = \begin{bmatrix} a & b & c & d & e & f & \overline{g} & \overline{h} & \overline{k} & \overline{l} & \overline{m} & \overline{p} & \overline{r} \end{bmatrix}^T.$$
 (2)

Тогда модель наблюдений может быть представлена в виде системы линейных уравнений:

$$y = Ax + e. \tag{3}$$

Таким образом, наилучшая несмещенная линейная оценка параметров \hat{x} , полученная по методу наименьших квадратов, будет иметь вид:

$$\hat{x} = \left(A^T C^{-1} A\right)^{-1} A^T C^{-1} y.$$
(4)

В предложенной регрессионной модели (1) выделяется четыре основных подгруппы параметров, каждая из которых отвечает за моделирование связанных между собой реальных физических процессов, вызывающих изменения положения станции.

К первой подгруппе относятся параметры, отвечающие за моделирование движения станции с некоторой постоянной скоростью. Движение станции с постоянной скоростью, в общем случае, может быть вызвано как ее перемещением в составе жесткого тектонического блока, так и деформированием земной поверхности вследствие близости к границе взаимодействия литосферных плит. Как уже было сказано выше, движение литосферных плит подчиняется теореме Эйлера, и движение любой точки плиты может быть описано с помощью вектора Эйлера, прямая оценка которого возможна по данным GPS [Kogan, Steblov, 2008]. Таким образом, выделение деформационной составляющей линейного тренда осуществляется путем вычитания из суммарного линейного тренда смоделированного перемещения станции, связанного с движением плиты. Изменение степени сомкнутости границы раздела двух литосферных плит вследствие произошедшего крупного сейсмического события может привести к изменению напряженно-деформированного состояния примыкающей к очагу пограничной зоны. Для моделирования этого явления в регрессионной модели оценивается изменение деформационной составляющей движения станции после произошедших событий.

Ко второй подгруппе относятся параметры, отвечающие за моделирование периодической компоненты движения станции, связанной с технологией GPS. Периодическая компонента с годовым и полугодовым периодом отражает наличие сезонных вариаций, связанных, в свою очередь, с различными природными явлениями. Современные пакеты обработки данных GPS-наблюдений позволяют моделировать многие периодические процессы, такие как сезонные колебания положения полюсов, приливные явления в океанах, атмосфере и твердой Земле, вызванные гравитационным воздействием Солнца и Луны. Учет вышеописанных процессов сезонного перераспределения масс позволяет значительно понизить амплитуды наблюдаемых периодических вариаций положения станции, однако задача моделирования периодической компоненты все еще остается актуальной вследствие наличия немоделируемых процессов. В качестве примера подобных процессов можно привести выпадение и таяние снежного покрова, изменение физических свойств антенны и подстилающего грунта при различных температурах и др. [Nikolaidis, 2002].

Третья подгруппа содержит параметры, отвечающие за моделирование возможных мгновенных скачкообразных изменений положения станции вследствие смены оборудования или программного обеспечения. Эти смещения не отражают действительных деформаций земной поверхности, поэтому должны быть смоделированы и удалены из временного ряда.

Четвертая подгруппа содержит параметры, отвечающие за моделирование смещения станции, вызванного деформированием земной поверхности вследст-



Рис. 1. Результат построения регрессионной модели (по данным за период с 01.01.2000 г. по 01.01.2011 г.) для компоненты временного ряда станции CAND (сеть CRTN, Паркфилдский сегмент разлома Сан-Андреас), отражающего смещение станции на север.

Fig. 1. Regression model based on data for the period from 01.01.2000 to 01.01.2011 for the component of the time series of CAND station (CRTN, Parkfield segment of San Andreas fault), which shows the station's displacement to the north.

вие сейсмических событий. В общем случае, во временном ряде изменения положения станции, расположенной в окрестности очага крупного землетрясения, могут наблюдаться как мгновенные скачкообразные смещения в момент самого сейсмического события, так и комплексные постсейсмические эффекты. Сложность моделирования отклика земной поверхности на сейсмическое событие состоит в том, что наблюдаемое с помощью геодезических методов смещение обусловлено совместным действием нескольких неразделимых деформационных процессов. Наличие сейсмических скачков и постсейсмических эффектов зависит от ряда параметров, таких как параметры очага сейсмического события (механизм, глубина, ориентация плоскости разрыва, скалярный сейсмический момент), а также геологических и тектонических особенностей строения региона.

Как уже было сказано выше, для нахождения оцениваемых параметров регрессионной модели необходимо предварительно определить время сейсмических скачков и временные интервалы действия постсейсмических процессов. Для автоматизации определения времени сейсмических скачков был использован алгоритм, в котором критерием для включения в модель скачка от сейсмического события является превышение над заданным минимумом (смещение в 1 мм) значения поверхностной косейсмической деформации в точке нахождения станции, рассчитанной по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве [Okada, 1985]. Параметры сейсмических событий были взяты из международного каталога Global CMT.

Продолжительность наблюдаемых постсейсмических эффектов зависит от физических процессов, обусловливающих эти смещения, и может варьироваться от нескольких дней до десятков лет после сейсмического события. В качестве возможных механизмов, вызывающих постсейсмические деформации, в предложенной регрессионной модели рассматриваются наиболее часто и ярко проявляющиеся постсейсмические процессы: упругое фрикционное развитие разломной зоны [Marone et al., 1991] и вязкоупругая релаксация в верхней мантии и астеносфере [Pollitz, 1997]. Продолжительность действия постсейсмических эффектов определяется путем выбора из ограниченного по физическим соображениям диапазона времени, для которого достигается минимум невязки между модельными и наблюдаемыми смещениями.

Найденная оценка параметров \hat{x} обеспечивает построение модельной кривой, позволяющей определить положение станции в любой момент времени. Пример построения подобной модельной кривой для компоненты временного ряда станции CAND (сеть CRTN, Паркфилдский сегмент разлома Сан-Андреас), отражающей смещение станции на север, приведен на рис. 1 (параметры регрессионной модели оценены за период с 01.01.2000 г. по 01.01.2011 г.). Разность между моделью и наблюдаемыми смещениями может быть в дальнейшем использована для очистки исходного временного ряда от единичных выбросов, вызванных ошибками в определении положения станции, и оценки амплитуды шума. Очищенные исходные данные затем используются в очередной итерации моделирования для получения окончательной оценки параметров \hat{x} .

Вышеописанная методология регрессионного анализа временных рядов реализована автором в виде программного пакета, который позволяет производить все этапы моделирования для групп станций, выбранных по географическому или другому признаку.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Применение регрессионного анализа к данным группы достаточно близко расположенных станций позволяет построить распределение смещений земной поверхности в исследуемом регионе. Возможность рассмотрения модели смещения станций, обусловленного только деформированием пограничной зоны взаимодействия литосферных плит, позволяет исследовать вариации стационарного процесса деформирования этой зоны.

Вышеописанная методология была использована в данной работе для исследования процесса деформирования области подготовки Паркфилдского землетрясения 28 сентября 2004 г., M_w =6.0 (по данным каталога Global CMT). Это землетрясение произошло в южной части Паркфилдского сегмента разлома Сан-Андреас, который является трансформной границей взаимодействия Тихоокеанской и Североамериканской плит (рис. 2). Скорость движения Тихоокеанской плиты относительно Североамериканской в районе Паркфилдского сегмента составляет, по данным GPS, 5 см/год, и ее вектор направлен параллельно разлому Сан-Андреас на север–северо-запад. Скорость движения Тихоокеанской плиты относительно относительно Североамериканской североамериканской в районе Паркфилдского сегмента составляет, по данным GPS, 5 см/год, и ее вектор направлен параллельно разлому Сан-Андреас на север–северо-запад. Скорость движения Тихоокеанской плиты относительно Североамериканской североамериканской получена по формуле:

$$V_{PAC-NAM} = (\Omega_{PAC} - \Omega_{NAM}) \times R, \qquad (5)$$

где R – радиус-вектор точки на общей границе плит, Ω_{PAC} и Ω_{NAM} – векторы Эйлера, описывающие движение на сфере соответственно Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит. Соответствующие векторы Эйлера взяты из работы [Kogan, Steblov, 2008].

Высокая скорость движения и стационарность процесса накопления напряжения в данном регионе приводят к регулярному возникновению землетрясений с практически идентичными механизмами и одинаковой магнитудой M_w =6.0. Подобная регулярность и характерные механизмы сейсмических событий зародили идею о возможности прогноза следующего Паркфилдского землетрясения на основе данных развернутого инструментального полигона, включающего в себя оборудование для регистрации разнообразных геофизических параметров [Bakun et al., 2005]. В 1985 г. USGS был опубликован долгосрочный прогноз о том, что следующее землетрясение в Паркфилдском сегменте произойдет до 1993 г. [Bilham, 1985], который в дальнейшем не оправдался. Было решено эксперимент по прогнозу Паркфилдского землетрясения продолжить, для того чтобы зарегистрировать различными методами все возможные сигналы, предшествующие будущему землетрясению, и, по возможности, опубликовать краткосрочный прогноз. Однако, когда землетрясение 28.09.2004 г. все же произошло, ни одним из используемых геофизических методов не было зарегистрировано ни одного предвестника [Bakun et al., 2005]. Кроме того, это событие произошло в южной части Паркфилдского сегмента, в то время как происходившие ранее Паркфилдские землетрясения зарождались в его северной части. Объяснением этому может служить уже наблюдавшееся ранее явление активизации этой области разлома Сан-Андреас удаленными сейсмическими событиями [Taira et al., 2009]. В данном случае активизация именно южной части Паркфилдского сегмента предположительно была вызвана воздействием сейсмических и постсейсмических смещений вследствие землетрясения Сан-Симеон 22.12.2003 г., *M*_w=6.5, произошедшего примерно в 50 км западнее [Johanson, Bürgmann, 2010].

Данные, полученные с помощью развернутой сети GPS-наблюдений, также показали уникальность сейсмического события 28.09.2004 г. Это первое относительно небольшое по силе землетрясение, для которого помимо смещений в момент самого события методами космической геодезии было также произведено прямое наблюдение постсейсмических эффектов в первые несколько месяцев после землетрясения. Зарегистрированные постсейсмические смещения, обусловленные процессом упругого фрикционного развития разломной зоны, превысили по величине зарегистрированные сейсмические смещения [Freed, 2007]. Это крайне необычно по сравнению с ранее регистрировавшимися постсейсмическими смещениями от более крупных событий, для которых наблюдается обратная ситуация значительного превышения сейсмических смещений над постсейсмическими.

В качестве исходных данных для построения поля поверхностных смещений в окрестности события 28.09.2004 г. были рассмотрены непрерывные временные ряды всех 14 станций (сеть California Real Time Network (CRTN), все станции были установлены в 1992–2001 гг.), расположенных в радиусе 50 км от очага землетрясения, на которых были зарегистрированы смещения во время события (рис. 3). Используемые временные ряды являются результатом обработки



Рис. 2. Регион Паркфилдского сегмента разлома Сан-Андреас с расположением станций GPS-наблюдений, существовавших на период до Паркфилдского землетрясения (показаны кружочками). Звездочкой отмечен эпицентр Паркфилдского землетрясения 28.09.2004 г.

Fig. 2. The area of Parkfield segment of San Andreas fault. Coloured circles show locations of GPS observation stations in place before the Parkfield earthquake. The star shows the epicentre of 28.09.2004 Parkfield earthquake.

исходных данных сети CRTN в Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), Калифорнийский Университет, Сан-Диего. Параметры регрессионной модели были оценены по данным наблюдений за период с 01.01.2000 г. по 01.01.2011 г. В результате для каждой станции был получен очищенный модельный временной ряд, осредненный методом скользящего среднего (размер окна осреднения – 30 дней) для подавления шума, отражающий остаточное смещение станции относительно подстилающей литосферной плиты, которое происходит только вследствие деформирования пограничной зоны за счет взаимодействия Тихоокеанской и Североамериканской литосферных плит. Данные остаточные смещения лишь косвенно отражают движение станций (а значит, и земной поверхности в целом), так как их величины и направления тесно связаны с распределением коэффициента межплитового сцепления, который определяется как отношение времени сцепленности сейсмогенного интерфейса в данной точке ко всему времени наблюдений и измеряется в диапазоне [0–1]. Если бы происходило свободное, без зацепления, проскальзывание литосферных плит, то деформирование краев взаимодействующих плит не происходило бы и остаточные смещения станций относительно соответствующих плит были бы нулевыми. Отличие этих смещений от нуля говорит о наличии



Рис. 3. Косейсмические смещения, зарегистрированные на станциях GPS-наблюдений во время Паркфилдского землетрясения 28.09. 2004 г.

Fig. 3. Co-seismic events recorded by GPS stations during 28.09.2004 Parkfield earthquake.

сцепленности в сейсмогенном интерфейсе, а значит, о потенциальной сейсмической опасности данной зоны. Следует отметить, что в дальнейшем будут рассматриваться только вышеописанные остаточные смещения станций, поэтому деформация будет пониматься в обычном смысле (только как изменение взаимных расстояний между точками среды, а не как изменение положения точек среды в некоторой системе относимости).

Для исследования вариаций накопления поверхностных смещений в области подготовки Паркфилдского землетрясения во временных рядах горизонтальных компонент модельного деформационного смещения всех станций был выделен временной интервал продолжительностью шесть месяцев, конец которого приходится на последний день перед Паркфилдским землетрясением (т.е. на 27.09.2004 г.). Такой временной интервал выбран для того, чтобы, с одной стороны, рассмотреть максимально продолжительный участок временного ряда, а с другой – не рассматривать первые месяцы после землетрясения Сан-Симеон 22.12. 2003 г., которое произошло в 50 км западнее очага Паркфилдского землетрясения и после которого на ряде используемых станций наблюдались нелинейные постсейсмические эффекты. Для исследования возможных вариаций поля смещений и поля скоростей смещений исходный временной отрезок был разделен

на шесть частей. Всего было составлено два типа временных разбиений — «помесячный» (1-й интервал: 6 мес. — 5 мес. до события, ..., 6-й интервал: 1 мес. — 0 мес. до события) и «кумулятивный» (1-й интервал: 6 мес. — 5 мес. до события, ..., 6-й интервал: 6 мес. — 0 мес. до события), после чего для каждой станции и для каждого из наборов временных разбиений с помощью нахождения по методу наименьших квадратов параметров линейной регрессии были оценены смещение и скорость смещения для каждой компоненты и каждой станции. Результирующее изменение поля накопленных поверхностных смещений (красный цвет отражает максимальные смещения, фиолетовый — минимальные) перед сейсмическим событием 28.09. 2004 г. приведено на рис. 4.

Как видно из рис. 4, *а–е*, накопление поверхностных смещений по направлению совпадает со стационарным процессом деформирования пограничной области трансформного разлома, однако в южной части Паркфилдского сегмента разлома Сан-Андреас существует область повышенного накопления смещений, которое достигает своего максимума в области подготовки будущего сейсмического события. Кроме того, начиная с периода за четыре месяца до Паркфилдского землетрясения (рис. 4. *в*) становится заметным значительный градиент между областью максимальных накопленных смещений (область подготовки сейсмиче-



Geodynamics & Tectonophysics 2012 Volume 3 Issue 3 Pages 275–287

Рис. 4. Вариации поля накопленных смещений земной поверхности в окрестности эпицентра будущего Паркфилдского землетрясения 28.09.2004 г. (отмечен звездочкой). Приведены распределения накопленных смещений *a* − за один месяц (06.04.2004 г. − 05.05.2004 г.), *б* − за два месяца (06.04.2004 г. − 03.06.2004 г.), *в* − за три месяца (06.04.2004 г. − 02.07.2004 г.), *г* − за четыре месяца (06.04.2004 г. − 31.07.2004 г.), *д* − за пять месяцев (06.04.2004 г. − 28.08.2004 г.), *е* − за шесть месяцев (06.04.2004 г. − 27.09.2004 г.). Шкала в метрах. Стрелки показывают только направления смещений.

Fig. 4. Variations of the field of accumulated displacements of the earth's surface in the vicinity of the epicentre of the future (28.09.2004) Parkfield earthquake. The epicentre is shown by the star. Distribution patterns of cumulative displacements: a – one month (06.04.2004 – 05.05.2004); δ – two months (06.04.2004 – 03.06.2004); e – three months (06.04.2004 – 02.07.2004); z – four months (06.04.2004 – 31.07.2004); ∂ – five months (06.04.2004 – 28.08.2004); e – six months (06.04.2004 – 27.09.2004). The scale is given in meters. Arrows show only directions of displacement.



Рис. 5. Помесячные вариации поля скоростей смещений земной поверхности в окрестности эпицентра будущего Паркфилдского землетрясения 28.09.2004 г. (отмечен звездочкой). Приведены распределения скоростей смещений за один месяц: *a* – 06.04.2004 г. – 05.05.2004 г., *б* – 05.05.2004 г. – 03.06.2004 г. – 02.07.2004 г., *г* – 02.07.2004 г. – 31.07.2004 г., *д* – 31.07.2004 г. – 28.08.2004 г. – 27.09.2004 г. Шкала в метрах/год. Стрелками показаны единичные векторы скоростей.

Fig. 5. Monthly variations of the field of displacement velocities of the earth's surface in the vicinity of the epicentre of the future (28.09.2004) Parkfield earthquake. The epicentre is shown by the star. Monthly distribution patterns of velocities: a - 06.04.2004 - 05.05.2004; $\delta - 05.05.2004$ - 03.06.2004; e - 03.06.2004 - 02.07.2004; z - 02.07.2004 - 31.07.2004; $\partial - 31.07.2004 - 28.08.2004$; e - 28.08.2004 - 27.09.2004. The scale is given in metres per year. Arrows show single velocity vectors.

Geodynamics & Tectonophysics 2012 Volume 3 Issue 3 Pages 275–287



Рис. 6. Помесячные вариации поля скорости максимальной деформации сдвига в окрестности эпицентра будущего Паркфилдского землетрясения 28.09.2004 г. (отмечен звездочкой). Приведены распределения скорости деформации за один месяц: *a* – 06.04.2004 г. – 05.05.2004 г., *б* – 05.05.2004 г. – 03.06.2004 г. – 02.07.2004 г., *е* – 02.07.2004 г. – 31.07.2004 г., *д* – 31.07.2004 г. – 28.08.2004 г., *е* – 28.08.2004 г. – 27.09.2004 г. Шкала в 10⁻⁶ год⁻¹. Линии показывают простирания траекторий максимальных скоростей сдвига.

Fig. 6. Monthly variations of the field of maximum shear deformation velocity in the vicinity of the epicentre of the future (28.09.2004) Parkfield earthquake. The epicentre is shown by the star. Monthly distribution patterns of deformation velocity: a - 06.04.2004 - 05.05.2004; 6 - 05.05.2004 - 03.06.2004; e - 03.06.2004 - 02.07.2004; c - 02.07.2004 - 31.07.2004; d - 31.07.2004 - 28.08.2004; e - 28.08.2004 - 27.09.2004. The scale is in 10⁻⁶ year⁻¹. Lines show strikes of trajectories of maximum shear velocities.

ского события) и накопленными смещениями на противоположном борту разлома Сан-Андреас. Этот градиент в дальнейшем становится все более значительным (рис. 4, *в*–*е*), достигая своего максимума непосредственно перед сейсмическим событием (рис. 4, *е*).

Полученные ранее горизонтальные компоненты скоростей смещений станций позволили оценить компоненты тензора скорости плоской деформации и скорости смещений точек земной поверхности. Для нахождения компонент тензора использовался метод Шена [Shen et al., 1996], который позволяет найти компоненты тензора и скорость смещения в произвольной точке заданной сетки. В данной работе использовалась равномерная сетка с ячейкой размерами 1.5×3.0 км. Константа затухания, определяющая детализацию полученного поля деформаций, была выбрана равной 5 км, исходя из особенностей расположения станций.

Результирующие помесячные вариации скоростей смещений точек земной поверхности приведены на рис. 5. Следует отметить постоянство противоположной направленности векторов скоростей смещений в области подготовки Паркфилдского землетрясения относительно векторов скоростей смещений остальных точек правого борта разлома Сан-Андреас.

Результирующие помесячные вариации скорости и направления максимальной деформации сдвига приведены на рис. 6. Вектор скорости максимальной деформации сдвига для большинства точек направлен субпараллельно разлому Сан-Андреас, что хорошо согласуется с аналогичными построениями для других участков этого разлома [Shen et al., 1996]. В работе [Kostyuk, 2009] отмечается, что в общем случае сейсмоактивные зоны совпадают как с областями высоких скоростей деформаций, так и с областями высокого градиента скоростей деформаций, причем для поля скорости деформации сдвига отмечается связь сейсмической активности с областями скорее значительного градиента скорости деформации, нежели с областями с просто большими значениями скоростей деформации сдвига. На рис. 6 видно, что область подготовки будущего Паркфилдского землетрясения характеризуется как повышенными значениями скорости максимальной деформации сдвига, так и заметным градиентом скорости деформации.

Совместный анализ полей накопленных поверхностных смещений и скоростей смещений, а также скорости максимальной сдвиговой деформации по данным станций GPS-наблюдений, расположенных в Паркфилдском сегменте разлома Сан-Андреас, показал, что перед сейсмическим событием 28.09.2004 г. происходили заметные аномалии процесса упругого деформирования краевой области трансформного разлома, локализация которых совпадает пространственно и по времени с очаговой областью будущего сейсмического события.

5. Заключение

Представленная методика регрессионного анализа временных рядов изменения положения станций GPS дает возможность прямой оценки деформационной составляющей движения станции, косейсмических смещений и постсейсмических эффектов, что, в свою очередь, позволяет применять данные GPS-наблюдений для исследования деформационных процессов. Высокая точность полученных оценок параметров модели позволяет исследовать вариации поля смещений и деформаций на земной поверхности и выявить возможные аномалии, что показано на примере исследования поля поверхностных смещений и деформаций перед Паркфилдским землетрясением 28.09.2004 г.

Одним из важнейших направлений развития данного исследования является решение задачи определения деформационной составляющей в скоростях станций, расположенных в пограничных поясах литосферных плит, в тех случаях, когда прямое моделирование этой составляющей невозможно. Это особенно актуально для решения задачи выявления микроплит, поскольку станции GPS-наблюдений, данные которых могут быть использованы для нахождения параметров вращения исследуемой микроплиты, в подавляющем большинстве случаев расположены в ее деформируемой пограничной области.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность заведующему сектором геодинамического мониторинга ГС РАН д.ф.м.н. Г.М. Стеблову за обсуждение работы на всех этапах, а также заведующему лабораторией тектонофизики ИФЗ РАН д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому и заведующему лабораторией современной геодинамики ИЗК СО РАН к.г.-м.н. В.А. Санькову за ценные замечания и дополнения, которые позволили улучшить работу.

7. ЛИТЕРАТУРА

Altamimi Z., 2006. Station positioning and the ITRF. In: Proceedings of the 15th International workshop on laser ranging, Canberra, Australia, October 15–20, 2006. Available from: http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/Station Positioning and the ITRF.pdf.

Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C., 2007. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters. *Journal of Geophysical Research* 112 (B9), B09401. http://dx.doi.org/10.1029/2007JB004949.

- Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L., Hardebeck J.L., Harris R.A., Ji C., Johnston M.J.S., Langbein J., Lienkaemper J.J., Michael A.J., Murray J.R., Nadeau R.M., Reasenberg P.A., Reichle M.S., Roeloff E.A., Shakal A., Simpson R.W., Waldhauser F., 2005. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake. Nature 437 (7061), 969–974. http://dx.doi.org/10.1038/nature04067.
- Bilham R., 1985. Southern San Andreas fault geometry and fault zone deformation: implications for earthquake prediction in the Coachella Valley, California. In: C.F. Shearer (Ed.), Minutes of the national earthquake prediction evaluation council, March 29–30, 1985, Pasadena, California. US Geological Survey Open File Report 85–507, p. 44–65.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S., 1990. Current plate motions. Geophysical Journal International 101 (2), 425– 478. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x.
- *DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.,* 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21 (20), 2191–2194. http://dx.doi.org/10.1029/94GL 02118.
- *Freed A.M.*, 2007. Afterslip (and only afterslip) following the 2004 Parkfield, California, earthquake. *Geophysical Research Letters* 34 (6), L06312. http://dx.doi.org/10.1029/2006GL029155.
- *Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.,* 2006. GAMIT/GLOBK Reference Manual Release 10.3, MIT. 2006. Available from: http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm.
- Johanson I.A., Bürgmann R., 2010. Coseismic and postseismic slip from the 2003 San Simeon earthquake and their effects on backthrust slip and the 2004 Parkfield earthquake. Journal of Geophysical Research 115 (B7), B07411. http://dx.doi.org/ 10.1029/2009JB006599.
- Kogan M.G., Steblov G.M., 2008. Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate-consistent reference frame. Journal of Geophysical Research 113 (B4), B04416. http://dx.doi.org/10.1029/2007JB005353.
- Kostyuk A.D., 2009. Studies of crustal deformation of the Northern Tien Shan based on earthquake focuses and space geodesy: Ph.D. Thesis. Institute of Physics of the Earth, Moscow, 167 p. (in Russian) [Костюк А.Д. Исследование современной деформации земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2009. 167 с.].
- Kuzmin Yu.O., 2009. Tectonophysics and recent geodynamics. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 45 (11), 973–986. http://dx.doi.org/10.1134/S1069351309110056.
- Le Pichon X., 1968. Sea-floor spreading and continental drift. Journal of Geophysical Research 73 (12), 3661–3697. http://dx.doi.org/10.1029/JB073i012p03661.
- Marone C.J., Scholtz C.H., Bilham R.G., 1991. On the mechanics of earthquake afterslip. Journal of Geophysical Research 96 (B5), 8441–8452. http://dx.doi.org/10.1029/91JB00275.
- *Minster J.B., Jordan T.H., Molnar P., Haines E.,* 1974. Numerical modelling of instantaneous plate tectonics. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 36 (3), 541–576. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1974.tb00613.x.
- *Nikolaidis R.*, 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system: Ph.D. Thesis. University of California, San Diego, 305 p.
- Okada Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 75 (4), 1135–1154.
- Pollitz F.F., 1997. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical earth. Journal of Geophysical Research 102 (B8), 17921–17941. http://dx.doi.org/10.1029/97JB01277.
- Shen Z., Jackson D.D., Ge B.X., 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles Basin from geodetic measurements. Journal of Geophysical Research 101 (B12), 27957–27980. http://dx.doi.org/10.1029/96JB02544.
- *Steblov G.M.*, 2004. Large-scale geodynamics based on space geodesy: Doctoral Thesis. Institute of Physics of the Earth, Moscow, 203 p. (in Russian) [*Стеблов Г.М.* Крупномасштабная геодинамика на основе космической геодезии: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2004. 203 с.].
- *Taira T., Silver P.G., Niu F., Nadeau R.M.,* 2009. Remote triggering of fault-strength changes on the San Andreas fault at Parkfield. *Nature* 461 (7264), 636–639. http://dx.doi.org/10.1038/nature08395.



Габсатаров Юрий Владимирович, м.н.с. Геофизическая служба РАН 249035, Обнинск, пр. Ленина, 189, Россия Тел.: (48439)31405; ⊠ e-mail: yurug@gsras.ru

Gabsatarov, Yury V., Junior Researcher Geophysical Survey RAS 189 Lenin street, Obninsk 249035, Russia Tel.: (48439)31405; ⊠ e-mail: yurug@gsras.ru