

УДК 532.517

## К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНАХ ПОВЫШЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ<sup>1</sup>

*Бабешко В. А.<sup>2</sup>, Шестопалов В. Л.<sup>3</sup>, Калинин В. В.<sup>4</sup>, Шереметьев В. М.<sup>5</sup>*

TO THE PROBLEM OF SEISMICITY STATE IN THE HIGH GEODYNAMIC ACTIVITY AREAS

Babeshko V. A., Shestopalov V. L., Kalinchuk V. V., Sheremetyev V. M.

For problem of the stress-strain state estimation in zones of plates drift by block element method, the knowledge of an fault structure, volume form of the lithosphere plate areas and directions of their movement is necessary. Plates drift estimation is possible now with use of GPS/GLONASS network.

The time series analysis of Sochi GPS-station reference point displacement from January on 06.08.2012 in area of Sochi ( $M = 4.3$ ) is presented as an example. The type of site movement on the eve and to the moment of seismic event of 05.30.2012 was discussed.

Keywords: block element method, GPS/GLONASS network, stress-strain state, lithosphere plate drift, GPS time series.

Существующие средства непрерывного мониторинга движения литосферных плит открывают новые возможности для более глубокого понимания геодинамических процессов в глубинных слоях Земли и возможности расчета возникающих в среде напряжений и деформаций.

Теоретическую основу для этого дает новый метод расчета напряженно-деформированного состояния литосферных плит — метод блочного элемента, позволяющий исследовать блочные структуры сложного строения, в частности, литосферные плиты, взаимодействующие с астеносферой верхней мантии в виде покрытий сложной формы. Одновременно плиты взаимодействуют между собой по разломам, вызывая сейсмическую напряженность, приводящую к землетрясениям.

Один из подходов моделирования такого взаимодействия представлен в [1, 2].

1. Не повторяя изложенное в этих работах, сохранив лишь принятые там обозначения, приведем приближенное решение для перемещений в задаче о взаимодействии литосферных плит, моделируемых пластинами, расположенными на деформируемом основании с широким спектром свойств. Проблема сводится к решению системы интегральных уравнений вида

$$\frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \mathbf{K}_{p2}(\alpha_1, \alpha_2) \sum_{n=1}^N \mathbf{G}_n(\alpha_1, \alpha_2) \times \\ \times e^{-i(\alpha, \mathbf{x})} d\alpha_1 d\alpha_2 = \mathbf{V}_p^{-1} [\mathbf{b}_p, \mathbf{f}_p],$$

$$p = 1, 2, \dots, N, \quad x_1, x_2 \in \omega_p,$$

<sup>1</sup>Отдельные фрагменты работы выполнены при поддержке грантов РФФИ (11-08-00381) программы Юг России, проекты (11-08-96502, (11-08-96503), 11-08-96506, 11-08-96504, 11-08-96522, 11-08-96505), проекта НШ-914.2012.1, проекта ФЦП 2009-1.5-503-004-006, программ отделения ЭМПУ и Президиума РАН, выполняемых Южным научным центром РАН, государственного контракта от 1 сентября 2010 г. № 16.740.11.0135 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013.

<sup>2</sup>Бабешко Владимир Андреевич, академик РАН, профессор, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математического моделирования Кубанского государственного университета, руководитель НИЦ прогнозирования геоэкологических катастроф; e-mail: babeshko@kubsu.ru

<sup>3</sup>Шестопалов Валерий Леонидович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией геодинамического мониторинга Южного научного центра РАН; e-mail: ssc-ras@ssc-ras.ru.

<sup>4</sup>Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, заместитель Председателя ЮНЦ РАН, заведующий комплексным отделом механики, химии, физики и нанотехнологий Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru.

<sup>5</sup>Шереметьев Владимир Михайлович, канд. геол.-минерал. наук, начальник отдела Департамента природных ресурсов и государственного экологического надзора Краснодарского края; e-mail: sheremetev-v@mail.ru.

$$\begin{aligned}\mathbf{G}_n(\alpha_1, \alpha_2) &= F\mathbf{g}_n(\mathbf{x})\mathbf{K}_{p2}(\alpha_1, \alpha_2) = \\ &= \mathbf{V}_p^{-1}(-i\alpha_1, -i\alpha_2)\mathbf{K}_{p1}(\alpha_1, \alpha_2).\end{aligned}$$

Их приближенное решение для перемещений пластины имеет вид

$$\begin{aligned}\varphi_\lambda(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \mathbf{K}(\alpha_1, \alpha_2, x_3) \times \\ &\times \mathbf{G}(\alpha_1, \alpha_2) e^{-i\langle \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{x} \rangle} d\alpha_1 d\alpha_2,\end{aligned}$$

$$\mathbf{G}(\alpha_1, \alpha_2) = F\mathbf{g}(\mathbf{x}), \quad \langle \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{x} \rangle = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2,$$

где

$$\begin{aligned}\mathbf{g}_m(x_1, x_2) &= F^{-1} \sum_{p=1}^N \mathbf{K}_{p2}^{-1}(\alpha_1, \alpha_2) \times \\ &\times F\mathbf{V}_p^{-1}(\mathbf{b}_p, \mathbf{f}_p) + O(e^{-\xi|\mathbf{x}-\boldsymbol{\tau}|}),\end{aligned}$$

$$x_1, x_2 \in \omega_m, \quad \boldsymbol{\tau} \in \partial\omega_m, \quad \xi > 0.$$

Знание расположения разломов, форм областей, занятых литосферными плитами, и направлений их движения позволяют получить информацию о напряженно-деформированном состоянии в зонах дрейфа литосферных плит.

Исследование разломов и форм литосферных плит можно получить методом вибросейсморазведки, который, к сожалению, является дорогостоящим.

Данные о дрейфе литосферных плит в настоящее время удается получать, применяя сеть приемников GPS/ГЛОНАСС. Их повсеместное применение значительно продвигает решение вопроса о состоянии сейсмичности и подготовке землетрясений.

Приведем пример получения и применения информации от высокоточных приемников GPS/ГЛОНАСС, установленных в зоне олимпийского строительства. Ограничимся приемником, установленным на сейсмостанции «Сочи». В настоящее время в этом районе функционирует 4 таких приемника, принадлежащих ЮНЦ РАН. Заметим, что при проведении зимней олимпиады в Ванкувере в 2010 г. в районе игр функционировал только один такой приемник, хотя уровень сейсмичности этого района одинаков с уровнем Сочи.

**2.** GPS-станция Сочи, расположенная на территории сейсмического центра ГС РАН в микрорайоне Бытха, была создана ЮНЦ РАН и Центром прогнозирования и предупреждения геоэкологических и техногенных

катастроф (НИЦ ПГК) при Кубанском государственном университете и начала работать в режиме постоянных наблюдений с марта 2011 г. в рамках Государственного контракта № 26/633 от 11.10.2010 г. «Организация регионального полигона в районе строительства олимпийских объектов и ведение наблюдений за предвестниками опасных природных процессов (землетрясений, геодинамической активации). С сентября 2011 г. техническое обслуживание станции и обработка получаемых данных выполняются сотрудниками ЮНЦ РАН. Станция является одним из первых объектов в сети из 4 стационарных спутниковых геодинамических пунктов, предназначенных решать задачи раннего предупреждения сейсмической опасности на территории олимпийского Сочи и направленных на получение деформационных характеристик территории, необходимых для прогнозирования развития опасных геологических процессов различного происхождения.

Станция оборудована двухчастотным спутниковым геодезическим приемником Prego GGD фирмы JNS, принимающим сигналы спутников двух систем глобального определения местоположения: американской «Global Position System» (GPS) и российской «Глобальной навигационной спутниковой системы» (ГЛОНАСС). Металлическая конструкция основания спутниковой антенны и устройства принудительного центрирования (УПЦ) позволяют сохранить точность позиционирования фазового центра антенны с погрешностью не более 0,2 мм в плане и по высоте. Аналогичная конструкция основания и УПЦ были использованы при создании станций GPS на м. Чушка и п. Павловский. Наблюдения, выполняющиеся на этих станциях с 2005 г., показали стабильность и надёжность конструкции в процессе эксплуатации [3]. Опорным репером являлся центр УПЦ, жёстко связанный с фазовым центром помехозащищённой антенны GPS/ГЛОНАСС. Координаты репера вычислялись в геоцентрической прямоугольной системе International Terrestrial Reference Frame 2008 (ITRF2008) с дальнейшим пересчётом в проекцию Universal Transverse Mercator (UTM). Рабочим режимом станции является относительное местоопределение пары приемников с использованием накопленных кодовых и фазовых измерений с последующей обработкой специальным пакетом математической программ GAMIT/GLOBK [4]. Данные второго опорного приёмника принима-

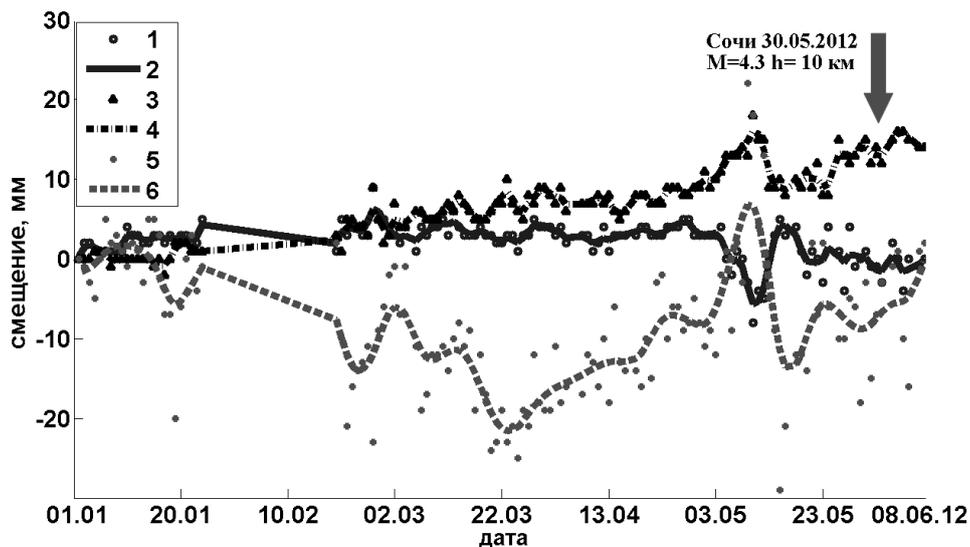


Рис. 1. Вариации координат GPS-станции Сочи в 2012 г.: 1, 3, 5 — суточные измерения смещения широты, долготы и высоты соответственно; 2, 4, 6 — приближение 1, 3, 5 сглаживающим кубическим сплайном

лись по сети Интернет с ближайших станций всемирной GPS-службы (International GPS Service, IGS) в Обнинске (MOBN), Звенигороде (ZWE2), Менделеево (MDVJ), Полтаве (POLV), Николаеве (MIKL), Киеве (GLSV), Зеленчукской (ZECK), Софии (SOFI), Бухаресте (BUCU) и Анкаре (ANKR).

Ниже представлены результаты ежесуточных определений местоположения GPS-станции Сочи в 2012 г. Относительная погрешность местоопределения с учётом средней длины базовой линии до опорных станций в радиусе от 500 до 1000 км составила от  $10^{-8}$  в плане до  $4 \cdot 10^{-8}$  по высоте. За начало отсчёта смещений были выбраны координаты станции 01.01.2012 г.

На рис. 1 представлен временной ряд смещений широты, долготы и высоты опорного репера станции с января по 08.06.2012 г. включительно. Для получения общего характера движения эти величины сглаживались кубическим сплайном. Представляют интерес особенности поведения каждой компоненты местоположения накануне и в момент сейсмического события 30.05.2012 г. в районе г. Сочи ( $M = 4,3$ ). Гипоцентр сейсмического события по данным ГС РАН располагался в 16 км к северо-западу от г. Сочи и в 6 км к северу от п. Дагомыс на глубине 5 км. Европейский Средиземноморский сейсмологический центр (EMSC) зафиксировал это событие ( $M = 4,5$ ) в 29 км к юго-западу от г. Сочи на глубине 10 км. Близкие к EMSC параметры землетрясения были получены в

Центре Гельмгольца, Германия (GFZ, Потсдам) (рис. 2).

Траектория движения станции в плане показана на рис. 3. Прямой линией указан вектор общего движения Европейской платформы и Восточно-Черноморской плиты с составляющими в северном и восточном направлениях ( $V_N = 12$  мм/г,  $V_E = 24$  мм/г). Компоненты этого вектора оценивались как среднее соответствующих составляющих движения международных станций-GPS Звенигород (ZWEN), Зеленчукская (ZECK) и Трабзон (TRAB) по данным международного центра сбора и обработки данных глобальных навигационных спутниковых систем SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Centre) [5]. Анализ временных рядов наблюдений на рис. 2–3 показывает за месяц до сейсмического события 30.05.2012 г. отчётливые флуктуации по каждой из компонент местоположения станции, а её траектория начинает отклоняться от направления вектора общекавказского движения к югу. В момент землетрясения и последующие дни косейсмические деформации не наблюдались. Согласно теории упругой отдачи Рейда [6] можно предположить связь события 30.05.2012 г. с накоплением и последующим сбросом упругой энергии в ходе отклонения движения блока земной коры от направления вектора общекавказского движения.

Ввод в эксплуатацию GPS-станции Сочи даёт возможность получать ежесуточно важ-

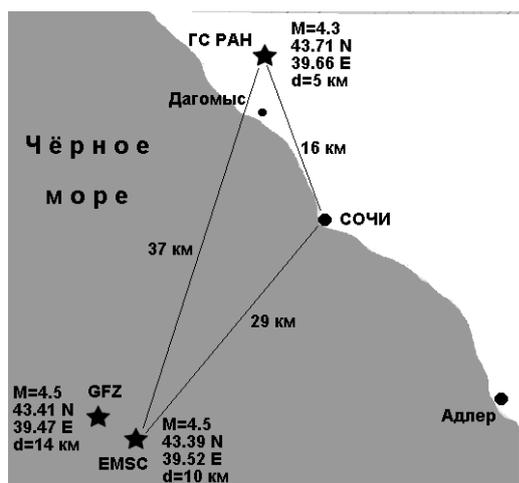


Рис. 2. Эпицентры землетрясения в районе г. Сочи 30.05.2012 г. по данным Геофизической службы РАН, Европейского Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC) и Центра Гельмгольца в Потсдаме (GFZ)

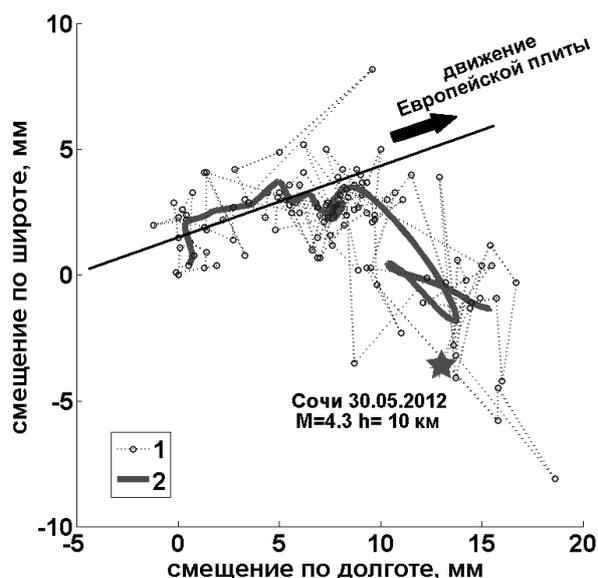


Рис. 3. Траектория движения в плане GPS-станции Сочи в 2012 г.

ный цифровой материал для оценки скорости и характера современных геодинамических движений.

Использование сети GPS-станций подобного класса поможет отслеживать процессы накопления упругой деформации и оценить с учётом разломно-блоковой структуры региона степень её приближения к критическим значениям ( $10^{-5}$ – $10^{-4}$ ), характерным для резких подвижек бортов разлома с освобождением накопленной энергии [7]. Непрерывное наблюдение на всех станциях сети поможет определить дополнительные деформационные характеристики исследуемого района (главные деформации, направления их осей и предельную деформацию сдвига), необходимые для решения главной задачи — определения деформационных предвестников с целью прогноза землетрясений.

### Литература

1. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В. К проблеме исследования материалов с

покрытиями // ДАН. 2006. Т. 410. № 1. С. 49–52.

2. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В. К проблеме оценки состояния материалов с покрытиями // ДАН. 2006. Т. 409. № 4. С.481–485.
3. Илюхин С.Р., Шестопапов В.Л. Исследование геодинамики региона Крым – Западный Кавказ методами GPS-измерений // Известия Высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка, МИИГАиК. 2007. №3. С. 9–17.
4. King R.W. GAMIT-GLOBK, lecture notes, November 30 – 01 December. Sofia. Bulgaria. 2007. 80 p.
5. Nikolaidis R. Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System, Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, 2002. 24 p.
6. Reid H.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906 // Rep. Of the State Investigation Comiss. Vol. 2. P. 1. Washington: 1910. 55 p.
7. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений, М.: Мир, 1979. 388 с.

Ключевые слова: метод блочного элемента, GPS/GLONASS сеть, напряженно-деформированное состояние, движение литосферных плит, GPS временные ряды.

Статья поступила 19 апреля 2012 г.

Кубанский государственный университет, г. Краснодар  
Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

© Бабешко В. А., Шестопапов В. Л., Калинин В. В., Шереметьев В. М., 2012