

УДК 539.3
DOI: 10.7868/S25000640190101

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РАЙОНА БОЛЬШОГО СОЧИ МЕТОДАМИ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДИНАМИКИ

© 2019 г. Академик В.А. Бабешко¹, В.Л. Шестопапов²,
Е.А. Глазырин³, В.М. Шереметьев⁴

Аннотация. Рассмотрены результаты измерений тектонических движений в период повышенной сейсмической активности в районе Большого Сочи в 2017 г. Использовалась сеть из четырех постоянно действующих спутниковых геодинимических пунктов GPS/ГЛОНАСС в Сочи, Адлере, поселках Лесное и Эсто-Садок. За время наблюдений в этом районе было зафиксировано четыре землетрясения магнитудами от 3,3 до 4,5. Основное внимание уделено геодинимическим аномалиям, представляющим собой отклонение траектории движения пунктов в горизонтальной плоскости и по высоте от тренда, полученного методом устойчивой регрессии за последние 5 лет наблюдений. В период сейсмической активности летом 2017 г. на черноморском побережье наблюдался коллективный характер смещения плановых траекторий движения пунктов. На основе плоской модели деформаций в период с 1 января по 30 сентября 2017 г. в треугольнике Адлер – Сочи – Лесное получены главные деформации и их направления. Оценка энергии деформирования в пределах территории от Адлера до Туапсе, ограниченной зоной черноморских разломов с юго-запада и Главным Кавказским хребтом с северо-востока, показывает близкое ее значение к энергии землетрясения 28 сентября 2017 г. ($M = 4,5$) в районе Туапсинской зоны поперечных нарушений. Это дает основание предположить заметную роль аномальных деформаций в процессе накопления упругой энергии в массиве горных пород с последующей активизацией сейсмических процессов.

Ключевые слова: деформации земной коры, GPS-технологии, геодинимическая активность.

RESEARCH OF SEISMIC ACTIVITY OF THE GREATER SOCHI AREA BY METHODS OF SATELLITE GEODYNAMICS

Academician RAS V.A. Babeshko¹, V.L. Shestopalov²,
E.A. Glazyrin³, V.M. Sheremet'ev⁴

Abstract. Observed tectonic movements in the period of the increased seismic activity near Greater Sochi in 2017 are considered. The network of 4 permanent satellite geodynamic stations (SGS) GPS/GLONASS near Sochi, Adler, Lesnoe and Esto-Sadok was used. During observations in this area four earthquakes were fixed from $M = 3.3$ to $M = 4.5$. The main attention in work was paid to the geodynamic anomalies representing a deviation of a trajectory of driving of points in the horizontal plane and on height from the trend received by method of robust regression for the last 5 years of observations. In the period of seismic activity in the summer of 2017 at the Black Sea coast the collective nature of horizontal trajectories was observed. On the

¹ Кубанский государственный университет (Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation), Российская Федерация, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: babeshko.kubsu.ru

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: valcpg@mail.ru

³ АО «Южморгеология» (Joint-Stock Company "Yuzhmorgeologiya", Gelendzhik, Krasnodar Region, Russian Federation), Российская Федерация, 353461, Краснодарский кр., г. Геленджик, ул. Крымская, 20, e-mail: glazyrin@ymg.ru

⁴ Проектный институт территориального планирования (Project Institute of Territory Planning Ltd., Krasnodar, Russian Federation), Российская Федерация, 350049, г. Краснодар, ул. Северная, 255, e-mail: pitp@list.ru

basis of flat model of deformations during the period from 1 January to 30 September 2017 in a triangle Adler, Sochi, Lesnoe principal strains and their directions were received. Estimation of deformation energy within the territory from Adler to Tuapse, limited by Black Sea faults from the southwest and Greater Caucasus Range from the northeast, shows the close value with energy of an earthquake 28 September 2017 ($M = 4.5$) at the Tuapse area of transcurrent faults. It gives the grounds to assume a noticeable role of the abnormal deformations in the course of accumulation of elastic energy in the geologic environment with the subsequent activation of seismic processes.

Keywords: deformations of crust, GPS technology, geodynamic activity.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование природных катастроф и в первую очередь землетрясений, связанных с геодинамической активностью в густонаселенных районах Черноморского побережья Кавказа, остается актуальной научной проблемой. В настоящее время признана важная роль современных тектонических движений земной коры для выделения зон повышенной сейсмической опасности [1]. Одним из наиболее эффективных инструментов измерения тектонических движений являются методы спутниковой геодинамики. За последние 20 лет эта технология прошла путь развития от отдельных суточных определений местоположения с периодом 30 с в течение года до международных сетей постоянных спутниковых геодинамических пунктов под эгидой IGS (International Geodynamic Service) и других международных и национальных организаций. GPS-измерения с частотой 1 Гц начали использовать в системах мониторинга геодинамической активности вулканов и в системах предупреждения цунами.

Целью настоящей работы является продвижение в решении двух задач. Первая задача состоит в развитии аппаратных средств и методик для высокоточного исследования свойств деформированной геологической среды. Вторая задача – использование накапливающегося опыта при решении первой задачи для прогноза места и времени стартовых землетрясений [2–4], для чего, наряду с этим, предстоит разрешить еще ряд важных вопросов.

В районе Большого Сочи в 2017 г. отмечалась повышенная сейсмическая активность. Исследуемая территория относится к южной продольной зоне новейших альпийских деформаций, тектоническая структура которой сформирована в условиях субмеридионального сжатия под влиянием северо-восточного дрейфа Аравийской плиты [5]. Территория от Адлера до Туапсе, ограниченная зоной черноморских разломов с юго-запада и Глав-

ным Кавказским хребтом с северо-востока, может быть представлена моделью совокупности блоков с прочным верхним слоем земной коры, аккумулирующим энергию деформаций с последующим ее сбросом, и нижним слоем, в котором деформации происходят непрерывно в пластичном режиме на продолжении разломов, выходящих с верхнего сейсмогенного слоя коры [6]. Далее из общего поля напряжений, включающего гравитационную и тектоническую компоненты, будет рассматриваться только тектоническая компонента, отражающая деформации тектонических движений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения деформаций проводили в период с января по октябрь 2017 г. на четырех постоянных спутниковых геодинамических пунктах (СГП), являющихся юго-восточным сегментом сети из 10 СГП, охватывающих сейсмогенные зоны Азово-Черноморского побережья Краснодарского края [2]. На СГП в Сочи, Адлере, в поселках Лесное и Эсто-Садок использовались приемники GPS/ГЛОНАСС с высокоточными антеннами, установленными на стабильных спецоснованиях. Среднее расстояние между пунктами составляло 20 км. Приемники всех пунктов выполняли фазовые измерения с периодом 30 с в течении суток, и накопленная информация автоматически передавалась по каналам телеметрии на сервер Кубанского государственного университета (Краснодар). Полученные данные обрабатывали с помощью пакета программ GAMIT/GLOBK [7]. В процессе обработки устранялись различные помехи и шумы (ионосферная рефракция, атмосферные помехи, земные приливы и пр.)

Для каждого СГП были получены временные ряды компонент вектора местоположения с точностью 2–7 мм в горизонтальной плоскости и 6–12 мм по вертикали в международной координатной системе ITRF2014, реализация которой осуществлялась опорными станциями ARTU (г. Екатеринбург,

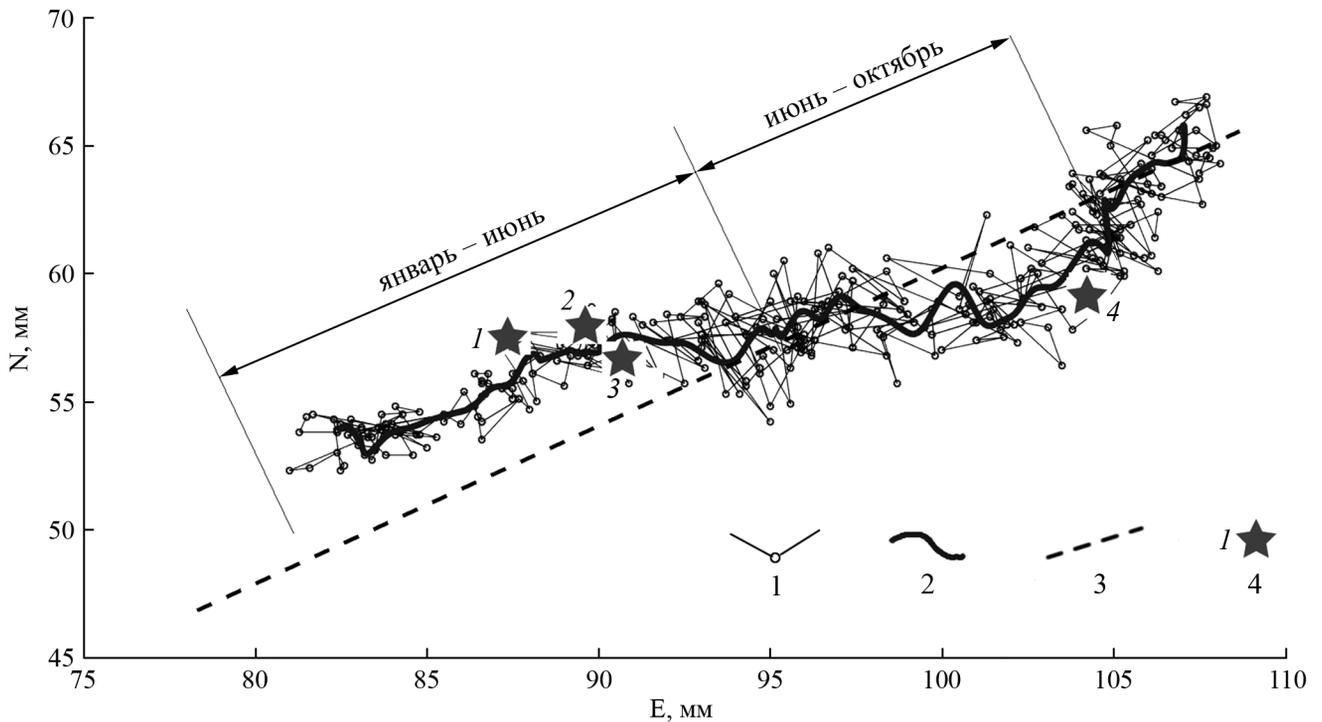


Рис. 1. Движение пункта Адлер в горизонтальной плоскости и сейсмичность в 2017 г. 1–4 – траектория движения: 1 – исходная (суточная), 2 – сглаженная, 3 – среднемонолетний тренд, 4 – номер ближайшего землетрясения (1 – 14.03.17, $M = 3,3$; 2 – 30.04.17, $M = 4,0$; 3 – 01.05.17, $M = 3,7$; 4 – 28.09.17, $M = 4,5$). N, E – смещение в северном и восточном направлениях соответственно.

Fig. 1. Horizontal movement of SGS Adler and seismicity in 2017. 1–4 – trajectory of movement: 1 – initial (daily), 2 – smoothed, 3 – average (trend), 4 – number of the nearest earthquake (1 – 14 March 2017, $M = 3.3$; 2 – 30 April 2017, $M = 4.0$; 3 – 1 May 2017, $M = 3.7$; 4 – 28 September 2017, $M = 4.5$). N, E – movement in northern and eastern direction respectively.

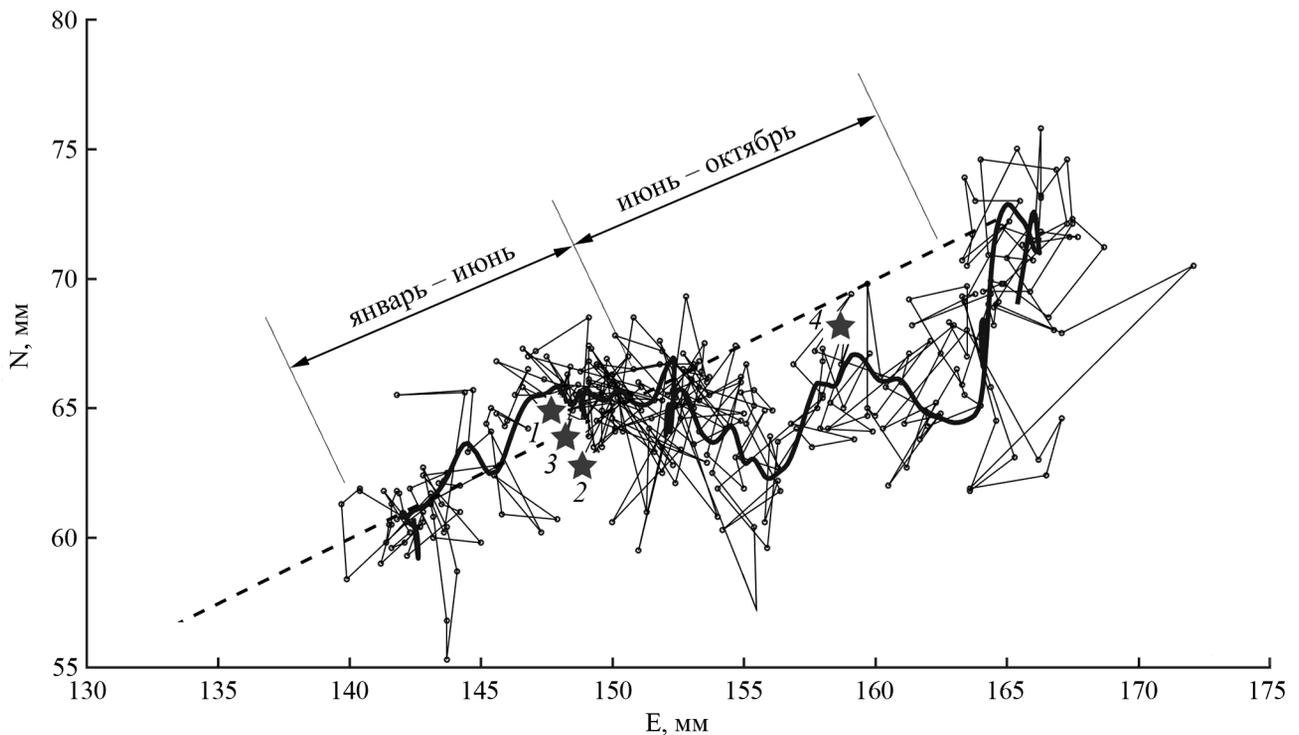


Рис. 2. Движение пункта Эсто-Садок и сейсмичность в горизонтальной плоскости в 2017 г. Условные обозначения даны на рисунке 1.

Fig. 2. Horizontal movement of SGS Esto-Sadok and seismicity in 2017. Legends are given in Fig. 1.

Таблица 1. Смещение СГП (BITH, ADLR, LESN, ESTS, GELN) в период с 01.01.2017 г. по 01.05.2017 г.
Table 1. SGS movement (BITH, ADLR, LESN, ESTS, GELN) during the period from 1 January to 1 May 2017

СГП SGS	Компоненты вектора смещения, мм Components of a vector of the movement, mm			Модуль вектора смещения, мм / Module vector of the movement, mm	Азимут смещения, градусы / Azimuth of the movement, degrees
	dE (запад – восток) / (the West – the East)	dN (север – юг) / (the North – the South)	dH (вертикальное смещение) / (vertical movement)		
ADLR	$8,2 \pm 0,04$	$4,2 \pm 0,9$	$-3,6 \pm 0,8$	$9,2 \pm 0,9$	62,7
BITH	$10,3 \pm 0,09$	$4,1 \pm 0,9$	$-18,4 \pm 2,8$	$11,1 \pm 0,1$	67,9
LESN	$7,5 \pm 0,03$	$5,4 \pm 0,7$	$-4,9 \pm 1,6$	$9,3 \pm 0,2$	53,9
ESTS	$9,3 \pm 0,02$	$6,4 \pm 1,4$	$-1,6 \pm 0,9$	$11,3 \pm 1,4$	55,2
GELN	$8,1 \pm 0,5$	$3,3 \pm 0,2$	$-2,7 \pm 0,7$	$8,8 \pm 0,3$	67,7

Россия), MOBН (г. Обнинск, Московская обл., Россия), GLSV (г. Киев, Украина), JOZ2 (Польша), PENC (Венгрия), WTZR (Германия) и ZECK (станция Зеленчукская, Карачаево-Черкесия, Россия). Критерии выбора опорных станций подробно описаны в работах [2] и [8]. Смещения СГП на выбранном временном интервале были получены обработкой временных рядов GPS-измерений регрессионным методом [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геодинамические аномалии можно определить как значения, превышающие флуктуации фоновых значений параметров движения в 2–3 раза относительно тренда, отражающего движение Кавказско-Каспийской области или отдельного участка исследуемой территории. Геодинамические аномалии происходят на фоне общего движения тектонических блоков под действием ряда причин (неравномерное распределение напряжений по латерали

в земной коре, процессы конвенции в верхней мантии и др.). С геодинамическими аномалиями связаны деформации земной поверхности, которые могут фиксироваться современными высокоточными методами спутниковой геодинамики. В последние годы установлено, что геодинамические аномалии являются одной из основных причин природных и техногенных катастроф [10].

На территории Большого Сочи за время наблюдений было зафиксировано четыре землетрясения магнитудами от 3,3 до 4,5. В таблице 1 представлены смещения спутниковых геодинамических пунктов относительно их трендов в период с 1.01.2017 г. по 1.05.2017 г. и в таблице 2 с 15.06.2017 г. по 15.09.2017 г. Характер горизонтального движения пунктов Адлер, Эсто-Садок, Сочи и Лесное показан на рисунках 1–4. На всех пунктах наблюдалась геодинамическая аномалия, выраженная в смещении к северо-западу в марте – мае с дальнейшим заметным отклонением от трендов к юго-востоку с июня по октябрь. Весенние аномалии движения

Таблица 2. Смещение СГП (BITH, ADLR, LESN, ESTS, GELN) в период с 15.06.2017 г. по 15.09.2017 г.
Table 2. SGS movement (BITH, ADLR, LESN, ESTS, GELN) during the period from 15 June to 15 September 2017

СГП SGS	Компоненты вектора смещения, мм Components of a vector of the movement, mm			Модуль вектора смещения, мм / Module vector of the movement, mm	Азимут смещения, градусы / Azimuth of the movement, degrees
	dE (запад – восток) (the West – the East)	dN (север – юг) (the North – the South)	dH (вертикальное смещение) / (vertical movement)		
BITH	$7,8 \pm 0,9$	$-14,9 \pm 0,4$	$-12,1 \pm 4,5$	$16,9 \pm 0,1$	151,9
ADLR	$7,4 \pm 0,04$	$0,63 \pm 0,9$	$10,3 \pm 0,4$	$7,4 \pm 0,9$	85,1
LESN	$7,90 \pm 0,1$	$-1,03 \pm 1,5$	$10,1 \pm 0,8$	$8,0 \pm 0,2$	97,4
ESTS	$7,3 \pm 0,2$	$-2,87 \pm 0,2$	$17,5 \pm 0,9$	$7,8 \pm 0,4$	111,5
GELN	$4,3 \pm 0,04$	$2,88 \pm 2,7$	$-1,99 \pm 1,2$	$5,2 \pm 2,7$	56,5

Таблица 3. Характеристики землетрясений в районе Большого Сочи в 2017 г.
Table 3. Characteristics of earthquakes near Greater Sochi in 2017

№	Дата Date	Координаты эпицентра, градусы / Epicenter coordinates, degrees		Глубина очага, км / Depth of a seismic center, km	M	A , градусы degrees	U , МДж/ MJ
		Широта Latitude	Долгота Longitude				
1	14.03.2017	43,71 N	40,35 E	5	3,3	–	$1,2 \times 10^4$
2	30.04.2017	43,82 N	38,96 E	10	4,0	164	$6,3 \times 10^4$
3	01.05.2017	44,09 N	39,05 E	10	3,7	–	$2,2 \times 10^4$
4	28.09.2017	44,06 N	39,48 E	10	4,5	56	$35,5 \times 10^4$

завершились землетрясением 30 апреля ($M = 4,0$) в районе Восточно-Черноморского разлома в 28 км к юго-западу от пос. Шепси и 1 мая землетрясением ($M = 3,7$) с эпицентром в 3 км к юго-западу от г. Туапсе. На фоне одновременного смещения всех четырех СГП к юго-востоку в июне – сентябре 2017 г. в 20 км к северо-востоку от пос. Лазаревский произошло землетрясение магнитудой 4,5. Характеристики землетрясений в районе Большого Сочи в 2017 г. с января по сентябрь представлены в таблице 3. Для оценки основного направления плоскости разрыва землетрясений 30.04.2017 г. и 28.09.2017 г. использовалось главное направление эллипса рассеивания эпицентров этих землетрясений по данным Евро-

пейского Средиземноморского сейсмологического центра [11]. Направление главной поверхности разрыва землетрясения 30.04.2017 г. ($A_1 = 164^\circ$) близко к направлению простираения Восточно-Черноморского разлома. Направление поверхности разрыва землетрясения 28.09.2017 г. ($A_2 = 56^\circ$) указывает на возможную связь этого сейсмособытия с Туапсинской разломной зоной (рис. 5). Энергию землетрясений U (Дж) в зависимости от магнитуды M оценивали по формуле [12]:

$$\lg U = 1,5M + 4,8.$$

Представляет интерес характер горизонтального движения СГП Геленджик в период коллектив-

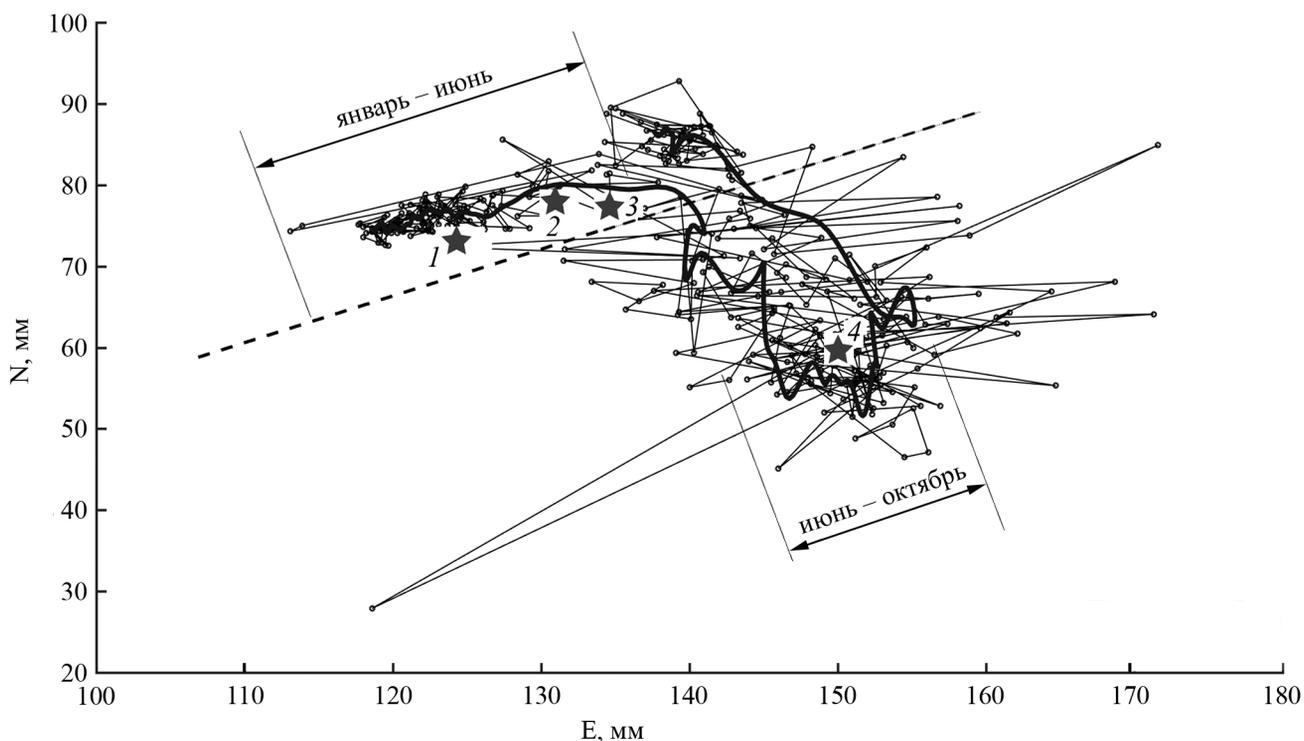


Рис. 3. Движение пункта Сочи и сейсмичность в горизонтальной плоскости в 2017 г. Условные обозначения даны на рисунке 1.
Fig. 3. Horizontal movement of SGS Sochi and seismicity in 2017. Legends are given in Fig. 1.

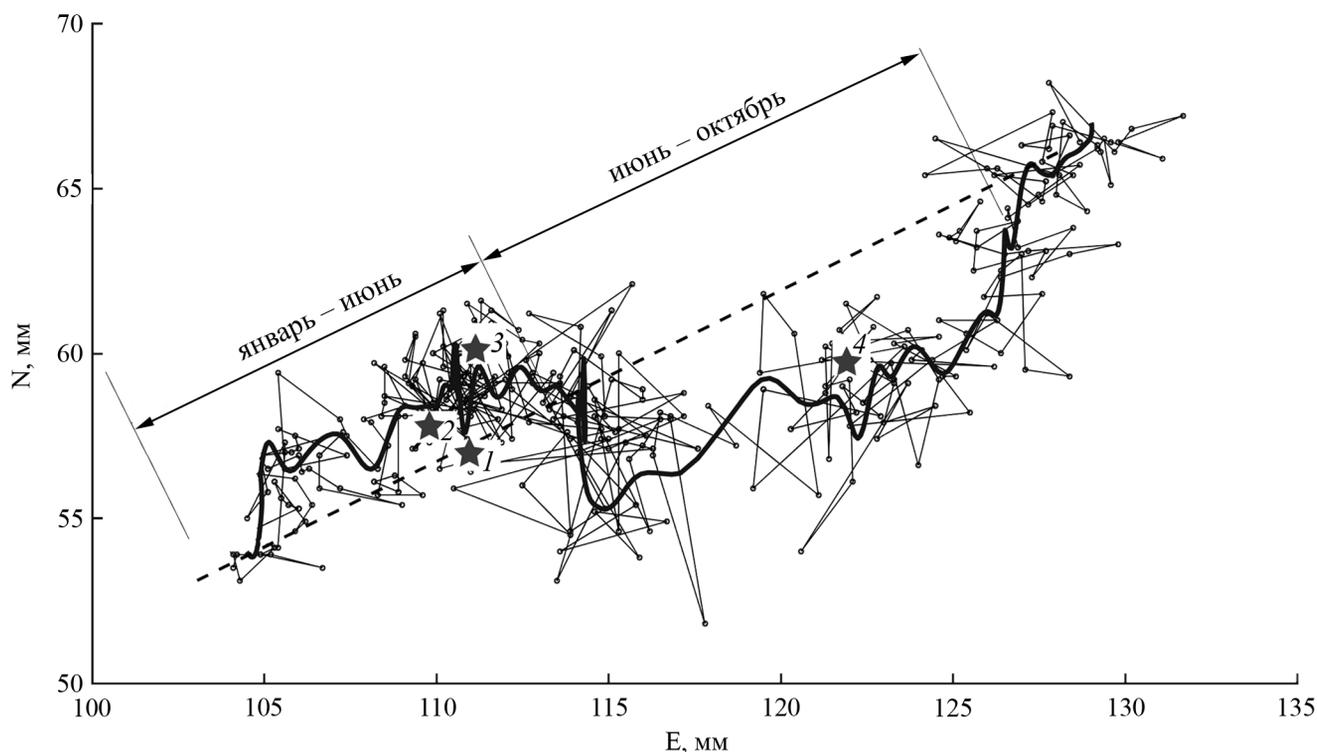


Рис. 4. Движение пункта Лесное и сейсмичность в горизонтальной плоскости в 2017 г. Условные обозначения даны на рисунке 1.
Fig. 4. Horizontal movement of SGS Lesnoe and seismicity in 2017. Legends are given in Fig. 1.

ного проявления геодинамической юго-восточной аномалии движения пунктов восточного сегмента сети СГП (рис. 6). С июня по октябрь в отличие от СГП Сочи, Лесное, Адлер и Эсто-Садок этот пункт смещался относительно своего тренда в северо-западном направлении, что говорит о различных геодинамических обстановках по разные стороны Туапсинской системы разломов, отражающей наличие поперечного глубинного структурного барьера на пересечении с фронтом латерального тектонического потока, направленного из наиболее поднятого, сжатого и деформированного Центрального Кавказа [1].

Связь геодинамических аномалий с сейсмичностью можно установить, получив деформационные характеристики исследуемой территории. С использованием компоненты вектора смещения гео-

динамических пунктов (табл. 1, 2) были определены главные деформации и энергия деформирования района Большого Сочи в период с 1 января по 1 мая 2017 г. и с 15 июня по 15 сентября 2017 г. Главные деформации ε_1 , ε_2 и направления их осей θ_1 , θ_2 вычисляли в треугольниках Адлер – Сочи – Лесное и Адлер – Сочи – Эсто-Садок по методике, описанной в работе [3] (табл. 4, 5).

Оценку энергии деформаций W можно получить из выражения:

$$W = uV, \quad (1)$$

где u – удельная энергия деформирования, Дж/м³; V – объем деформированного массива геологической среды, м³.

За величину V принимали объем геологической среды, ограниченный поверхностью треугольника

Таблица 4. Главные деформации и энергия деформирования района Большого Сочи в период с 01.01.2017 г. по 01.05.2017 г.
Table 4. Principal strains and deformation energy of the Greater Sochi area during the period from 1 January to 1 May 2017

№	Пункты GPS GPS stations	ε_1	ε_2	θ_1 , градусы degrees	θ_2 , градусы degrees	W , МДж/ MJ
1	Сочи – Адлер – Лесное Sochi – Adler – Lesnoe	$1,66 \times 10^{-7}$	$-6,07 \times 10^{-8}$	97	7	$0,11 \times 10^4$
2	Сочи – Адлер – Эсто-Садок Sochi – Adler – Esto-Sadok	$8,38 \times 10^{-8}$	$-6,72 \times 10^{-8}$	117	27	$0,12 \times 10^4$

с вершинами в пунктах GPS и глубиной D , совпадающей с нижним упруго-хрупким слоем коры, где фиксировались гипоцентры землетрясений 30.04.2017 г., 01.05.2017 г. и 28.09.2017 г. ($D = 10$ км).

Удельную энергию деформирования u (Дж/м³) для плоского случая рассчитывали по формуле [13]:

$$u = [(\lambda + 2\mu) / 2](\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2) + \lambda\epsilon_1\epsilon_2, \quad (2)$$

где ϵ_1, ϵ_2 – главные деформации; λ, μ – коэффициенты Ламе, выражающиеся через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$\lambda = E\nu / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]; \mu = E / [2(1 + \nu)]. \quad (3)$$

Значение модуля Юнга принимали как $E = 5 \times 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$.

Используя полученные характеристики движения пунктов (табл. 1) и данные таблицы 4, зимой – весной 2017 г. можно предположить слабую геодинамическую активность с незначительным преобладанием деформаций сжатия в треугольниках наблюдений ($\epsilon_1 > |\epsilon_2|$). В этот период проявилось согласованное движение всех пунктов GPS в северо-западном направлении и нисходящее по высоте. Главная ось эллипса рассеивания землетрясения 30.04.2017 г. ($A_1 = 164^\circ$) была направлена вдоль простирания Восточно-Черноморского разлома и согласуется с северо-западным направлением главной оси сжатия в треугольнике пунктов Сочи – Адлер – Лесное ($\theta_1 = 97^\circ$) и в треугольнике Сочи – Адлер – Эсто-Садок ($\theta_1 = 117^\circ$). Энергия деформаций, накопленных в этот период ($W = 0,12 \times 10^4$ МДж), не превышает 1,3 % от суммарной энергии землетрясений U_1, U_2 и U_3 ($9,7 \times 10^4$ МДж) (табл. 3).

С начала августа на графиках горизонтального движения (рис. 1–4) фиксировалась геодинамическая аномалия смещения всех пунктов сети к юго-востоку. На всех пунктах, кроме Сочи, нисходящие движения изменились на подъем. Значения главных деформаций заметно нарастали с разворотом главной оси сжатия к северу, и 28 сентября произошло землетрясение магнитудой $M = 4,5$ на глу-

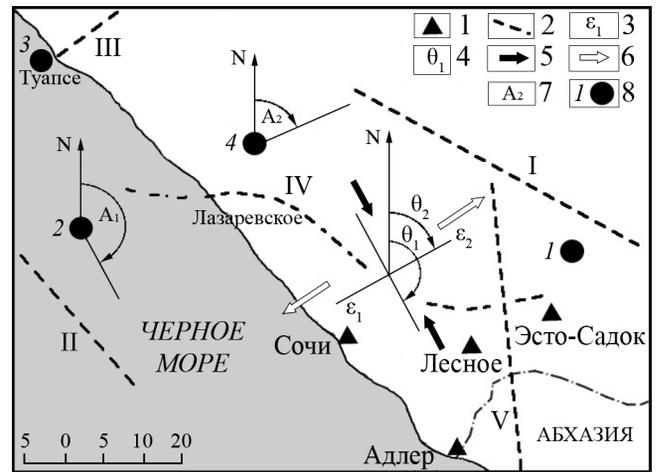


Рис. 5. Сеть СГП в районе Большого Сочи и сейсмичность в 2017 г. 1 – спутниковые геодинамические пункты; 2 – основные разломы (I – Главный Кавказский; II – Восточно-Черноморский; III – Туапсинская зона разломов; IV – Воронцовский; V – Пшехско-Адлерская зона глубинных тектонических нарушений); 3 – главные деформации; 4 – азимуты углов главных осей деформаций; 5 – главные направления деформаций сжатия; 6 – главные направления деформаций растяжения; 7 – азимут эллипса рассеивания; 8 – эпицентры землетрясений (1 – 14.03.17, $M = 3,3$; 2 – 30.04.17, $M = 4,0$; 3 – 01.05.17, $M = 3,7$; 4 – 28.09.17, $M = 4,5$).

Fig. 5. SGS network near Greater Sochi and seismicity in 2017. 1 – satellite geodynamic stations; 2 – the main faults (I – Main Caucasian; II – East Black Sea; III – the Tuapse fault zone; IV – Vorontsovsky; V – Pshekhsko-Adlersky zone of deep tectonic violations); 3 – principal strains; 4 – angles of main deformation axes; 5 – main directions of compressive strains; 6 – main directions of tensile strains; 7 – azimuth of dispersion ellipse; 8 – epicenters of earthquakes (1 – 14 March 2017, $M = 3.3$; 2 – 30 April 2017, $M = 4.0$; 3 – 1 May 2017, $M = 3.7$; 4 – 28 September 2017, $M = 4.5$).

бине 10 км вблизи Туапсинской поперечной зоны разломных нарушений. Время проявления предвестника ΔT (58 суток) незначительно превышает оценку этого параметра по формуле [12]:

$$\lg \Delta T = 0,79M - 1,88.$$

Для $M = 4,5 \Delta T = 47$ суток.

Вероятное направление главной поверхности разрыва ($A_2 = 56^\circ$) согласуется с направлением оси главной деформации растяжения в треугольнике Сочи – Адлер – Лесное ($\theta_2 = 52^\circ$)

Таблица 5. Главные деформации и энергия деформирования района Большого Сочи в период с 15.06.2017 г. по 15.09.2017 г.
Table 5. Principal strains and deformation energy of the Greater Sochi area during the period from 15 June to 15 September 2017

№	Пункты GPS GPS stations	ϵ_1	ϵ_2	θ_1 , градусы degrees	θ_2 , градусы degrees	W , МДж / MJ
1	Сочи – Адлер – Лесное Sochi – Adler – Lesnoe	$5,52 \times 10^{-7}$	$-3,26 \times 10^{-7}$	142	52	$1,3 \times 10^4$
2	Сочи – Адлер – Эсто-Садок Sochi – Adler – Esto-Sadok	$6,23 \times 10^{-7}$	$-7,56 \times 10^{-8}$	158	68	$5,2 \times 10^4$

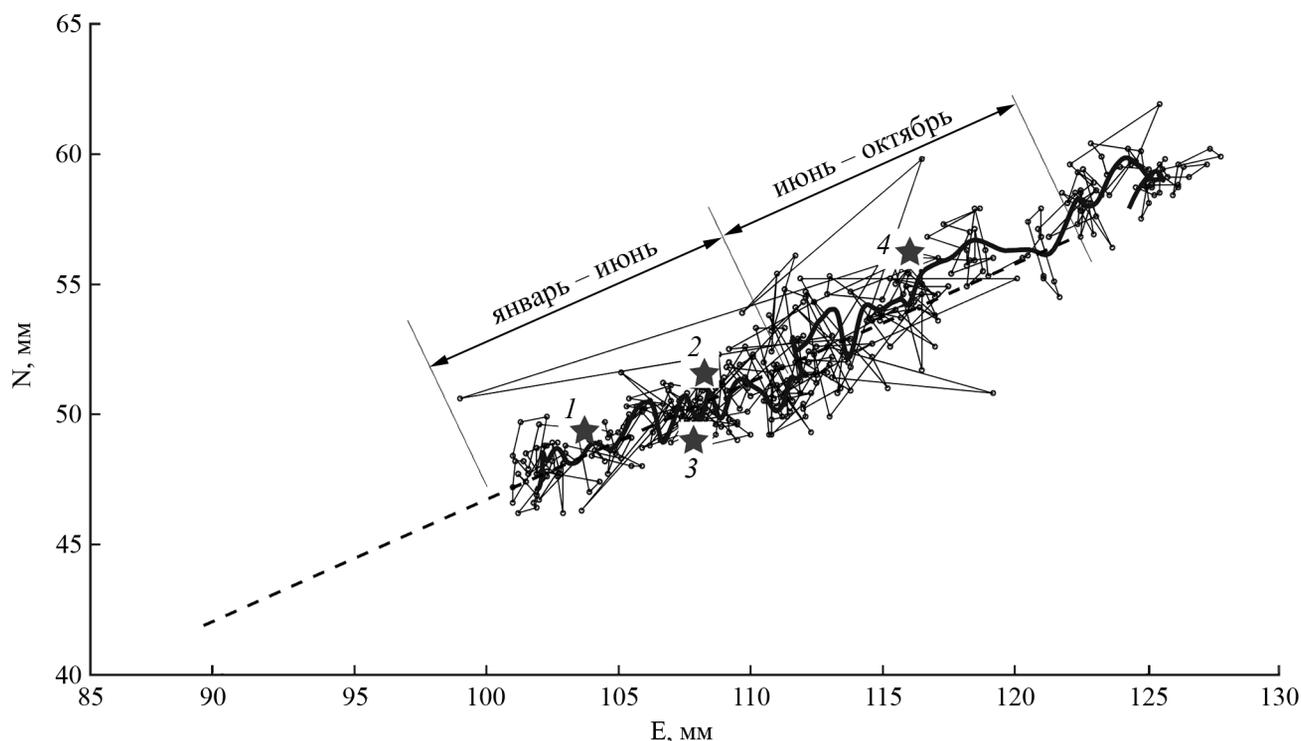


Рис. 6. Движение пункта Геленджик и сейсмичность в горизонтальной плоскости в 2017 г. Условные обозначения даны на рисунке 1.

Fig. 6. Horizontal movement of SGS Gelendzhik and seismicity in 2017. Legends are given in Fig. 1.

(табл. 5). В треугольнике Сочи – Адлер – Эсто-Садок значение энергии накопленных деформаций ($W_2 = 5,2 \times 10^4$ МДж) в рассматриваемый период составило 14,6 % от энергии землетрясения 28.09.2017 г. ($U_4 = 35,5 \times 10^4$ МДж) (табл. 3).

Оценка W_2 отражает, по всей вероятности, нижнюю границу, так как деформационным процессом может быть охвачена территория черноморского побережья от Туапсинского разлома на западе до Пшехско-Адлерской зоны разломных нарушений на востоке с объемом ($V = 95000 \times 35000 \times 10000 = 33250 \times 10^9$ м³). Используя выражение (1), а также значение удельной энергии деформирования u , полученной из (2) и (3) по данным смещения пунктов в треугольнике Сочи – Адлер – Эсто-Садок, можно оценить энергию накопленных деформаций $W = 36,2 \times 10^4$ МДж.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерений тектонических движений с использованием сети из четырех постоянно действующих спутниковых геодинимических пунктов GPS/ГЛОНАСС в районе Большого Сочи показали заметную роль геодинимических аномалий в период сейсмической активности с апреля по сен-

тябрь 2017 г. Доля энергии накопленных деформаций относительно энергии умеренного землетрясения ($M = 4,5$), зафиксированного в этом районе 28.09.2017 г., составила от 15 % в треугольнике пунктов Сочи – Адлер – Эсто-Садок до 102 % для территории черноморского побережья от Туапсе до Адлера.

Особенности горизонтальных движений спутниковых пунктов по разные стороны Туапсинской разломной зоны дают основание представить модель этой зоны в виде геодинимического барьера, изменяющего характер сейсмической активности на территории черноморского побережья от Адлера до Геленджика. Разработанная методология GPS-наблюдений и вычислительные алгоритмы могут быть использованы для выработки прогнозных признаков в системах раннего предупреждения сейсмической опасности в сейсмоактивных районах Азово-Черноморского побережья России.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания Южного научного центра РАН, № госрегистрации проекта 01201354241, и целевой программы Роснедра «Геолого-геофизические работы по прогнозу землетрясений» (использованы геологические материалы, полученные по контракту № 15/2017-04-ЮРЦ(03)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. 2014. *Эндеогенные опасности Большого Кавказа*. М., ИФЗ РАН: 256 с.
2. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Юбко В.М., Глазырин Е.А. 2016. Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации. *Наука Юга России*. 12(4): 33–40.
3. Бабешко В.А., Калинин В.В., Шестопалов В.Л., Шереметьев В.М. 2016. Технологии геодинамического мониторинга района транспортного перехода через Керченский пролив. *Наука Юга России*. 12(1): 22–31.
4. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. 2016. К проблеме физико-механического предвестника стартового землетрясения: место, время, интенсивность *ДАН*. 466(6): 664–669. doi: 10.7868/S0869565216060074
5. Копп М.Л. 1997. *Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизиином поясе*. М., Научный мир: 314 с.
6. Savage J.C., Lisowski M. 1998. Viscoelastic coupling model of the San Andreas Fault along the big bend, southern California. *J. Geophys. Res.* 103(B4): 7281–7292. doi: 10.1029/98JB00148
7. *GAMIT-GLOBK*. URL: <http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm> (дата обращения: 14.01.2019).
8. Altamimi Z., Métivier L., Collilieux X. 2012. ITRF2008 plate motion model. *J. Geophys. Res.* 117: B07402. doi: 10.1029/2011JB008930
9. 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
10. Касьянова Н.А. 2003. *Экологические риски и геодинамика*. М., Научный мир: 332 с.
11. *EMSC*. URL: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=620938#scientific> (дата обращения: 14.01.2019)
12. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. 1991. *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс*. М., Наука: 96 с.
13. Козырев А.А., Калашник А.И., Каспарьян Э.В., Савченко С.Н. 2011. Концепция организации геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов западного сектора российской Арктики. *Вестник МГТУ*. 14(3): 587–600.
1. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatikov A.V. 2014. *Endogennye opasnosti Bol'shogo Kavkaza*. [Endogenic dangers of Greater Caucasus]. Moscow, Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 256 p. (In Russian).
2. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Yubko V.M., Glazyrin E.A. 2016. [Description of crust movements according to GPS measurements in the Azov-Black sea coast area of the Russian Federation]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(4): 33–40. (In Russian).
3. Babeshko V.A., Kalinchuk V.V., Shestopalov V.L., Sheremet'ev V.M. 2016. [Technologies of geodynamic monitoring of the Kerch-Taman Region and deformations of bridge engineering constructions across the Kerch Strait]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(1): 22–31. (In Russian).
4. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. 2016. The problem of physical and mechanical precursors of an earthquake: place, time, and intensity. *Doklady Physics*. 61(2): 92–97. doi: 10.1134/S1028335816020099
5. Kopp M.L. 1997. *Struktury lateral'nogo vyzhmaniya v Al'piysko-Gimalayskom kollizionnom poyase*. [Structures of lateral squeezing in the Alpine and Himalaya collision belt]. Moscow, Nauchnyy mir: 314 p. (In Russian).
6. Savage J.C., Lisowski M. 1998. Viscoelastic coupling model of the San Andreas Fault along the big bend, southern California. *J. Geophys. Res.* 103(B4): 7281–7292. doi: 10.1029/98JB00148
7. *GAMIT-GLOBK*. Available at: <http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm> (accessed 14 January 2019).
8. Altamimi Z., Métivier L., Collilieux X. 2012. ITRF2008 plate motion model. *J. Geophys. Res.* 117: B07402. doi: 10.1029/2011JB008930
9. 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
10. Kasyanova N.A. 2003. *Ekologicheskie riski i geodinamika*. [Environmental risks and geodynamics]. Moscow, Nauchnyy mir: 332 p. (In Russian).
11. *EMSC*. Available at: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=620938#scientific> (accessed 14 January 2019).
12. Sadovsky M.A., Pisarenko V.F. 1991. *Deformirovanie geofizicheskoy sredy i seismicheskiy protsess*. [Deformation of the geophysical environment and seismic process]. Moscow, Nauka: 96 p. (In Russian).
13. Kozyrev A.A., Kalashnik A.I., Kaspar'yan E.V., Savchenko S.N. 2011. [Conception of organization of geodynamic monitoring of oil and gas facilities of the Western sector of Russian Arctic]. *Vestnik MGTU*. 14(3): 587–600. (In Russian).

Поступила 11.01.2019