

УДК 539.3  
DOI: 10.7868/S25000640210403

## РАЗВИТИЕ GPS-ТЕХНОЛОГИЙ В РАЙОНЕ ТУАПСИНСКО-СОЧИНСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЫ С УЧЕТОМ РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ

© 2021 г. В.Л. Шестопапов<sup>1</sup>, Б.В. Сенин<sup>2</sup>, Е.А. Глазырин<sup>2</sup>

**Аннотация.** Приведены данные о движении сейсмоактивных участков земной коры в районе черноморского побережья по данным GPS-измерений, которые непрерывно выполнялись от 6 до 9 лет в региональной сети спутниковых геодинимических пунктов (СГП) GPS/ГЛОНАСС. Сеть включает в себя два сегмента, охватывающих северо-западную и юго-восточную части Азово-Черноморского побережья Краснодарского края. Определены фоновые значения деформаций земной коры, необходимые для инструментальной оценки напряженного состояния геофизической среды в процессе подготовки землетрясений. Наблюдениями на СГП восточного сегмента сети (Сочи, Адлер, Лесное и Эсто-Садок, расположенных в пределах Пшехско-Адлерской поперечной флексурно-разломной зоны) подтверждена геодинимическая активность наиболее сейсмически опасного Мзымтинского разлома от района Красной Поляны до его сопряжения с Пластунским разломом. GPS-наблюдениями и данными сейсмических исследований установлена геодинимическая активность района нижней долины р. Мзымты, покрытого серией разломов и зонами трещиноватости, ограниченными субширотными разломами, определяющими главную геотектоническую зональность Кавказа, с возможным продолжением геодинимической активности этого района в море до пересечения с Восточно-Черноморской зоной разрывных нарушений. В результате синхронных GPS-измерений на СГП Эсто-Садок и временном СГП Аибга, размещенных с разницей высот в 1700 м, установлен разноблоковый характер движений на этих пунктах и подтвержден левосторонний сдвиг вдоль Мзымтинского разлома. На западе Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны наблюдениями на временном СГП Чемитоквадже выявлена геодинимическая активность разломов поперечного (антикавказского) направления. Мониторинг сейсмогеодинимической активности этих разломов требует установки постоянных СГП в районе Туапсе, пос. Чемитоквадже и пос. Головинка. Более длительный период непрерывных наблюдений на пунктах GPS (25–30 лет) даст возможность обнаружить смену геодинимических периодов сжатия и растяжения земной коры, что важно знать для оценки геодинимической обстановки при строительстве долговременных объектов повышенной ответственности и определения прогнозных признаков сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** GPS-наблюдения, деформация земной коры, прогноз землетрясений, Кавказ.

### DEVELOPMENT OF GPS TECHNOLOGIES IN THE AREA OF THE TUAPSE-SOCHI SEISMIC ZONE, TAKING INTO ACCOUNT THE FAULT-BLOCK STRUCTURE

V.L. Shestopalov<sup>1</sup>, B.V. Senin<sup>2</sup>, E.A. Glazyrin<sup>2</sup>

**Abstract.** Data of movements of seismically active sections of the Earth's crust in the area of the Black Sea coast are given according to GPS measurements, which were continuously carried out from 6 to 9 years in the regional network of satellite geodynamic stations GPS/GLONASS (SGS). The network includes two

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (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

<sup>2</sup> АО «Южморгеология» (Yuzhmorgeologiya Joint-Stock Company, Gelendzhik, Russian Federation), Российская Федерация, 353461, г. Геленджик, ул. Крымская, 20, e-mail: sengri@mail.ru, eaglazyrin@mail.ru

segments covering the northwestern and southeastern parts of the Azov-Black sea coast of the Krasnodar Region. Background values of earth crust deformations required for instrumental assessment of stress state of geological environments during earthquake preparation are determined.

Observations on the SGS of the eastern segment of the Sochi, Adler, Lesnoe and Esto-Sadok network, located within the Pshekh-Adler transverse flexure-fault zone, confirmed the geodynamic activity of the most seismically dangerous Mzymta fault from the Krasnaya Polyana region to its interface with the deep Plastunsky fault. GPS observations and seismic data established the geodynamic activity of the lower valley region of the Mzymta River, covered with a series of faults and fracture zones limited by sub-latitudinal faults that determine the main geotectonic zonality of the Caucasus with the possible continuation of geodynamic activity of this region in the sea until the intersection with the East Black Sea fractured zone. As a result of synchronous GPS measurements at the permanent Esto-Sadok SGS and the periodic SGS Aibga with a height difference of 1700 m a diverse pattern of movements was established and a left-hand shift along the Mzymta fault was confirmed. In the west of the Tuapse-Sochi seismic zone, observations on the periodic SGS Chemitokvadzhe revealed the geodynamic activity of cross-sectional (anti-Caucasian) faults. Monitoring of seismogeodynamic activity of these faults additionally requires installation of permanent SGS in the area of Tuapse, Chemitokvadzhe and Golovinka settlements. A longer period of continuous observations at GPS stations (25–30 years) will make it possible to detect a change in geodynamic compression and stretching periods of the crust, which is important to assess the geodynamic situation during the construction of long-term objects of increased responsibility and determine the seismic hazard precursors.

**Keywords:** GPS observation, crust deformation, earthquake precursors, Caucasus.

В последние годы в исследованиях по прогнозированию опасных геодинамических процессов в общем и землетрясений в частности широкое применение нашли технологии GPS.

В 2012 г. Южным научным центром Российской академии наук при участии АО «Южморгеология» и Кубанского государственного университета была создана сеть из девяти постоянных и двух временных спутниковых геодинамических пунктов (СГП) в пределах сейсмически активных зон Азово-Черноморского побережья. Сеть СГП дает возможность раннего оповещения о вероятной геодинамической активности в районе расположения объектов с высоким экологическим риском, следствием которой могут быть экономический ущерб и человеческие жертвы [1; 2].

СГП оснащены приемной аппаратурой GPS/ГЛОНАСС и высокоточными антеннами, установленными на стабильных спецоснованиях согласно стандартам международной геодинамической службы International GNSS Service (IGS). Данные суточных измерений с периодом 30 с дают возможность после обработки программой GAMIT/GLOBK (V.10.71) получить местоположение фазового центра приемной антенны с миллиметровой точностью на расстояниях до 2000 км от опорных станций IGS.

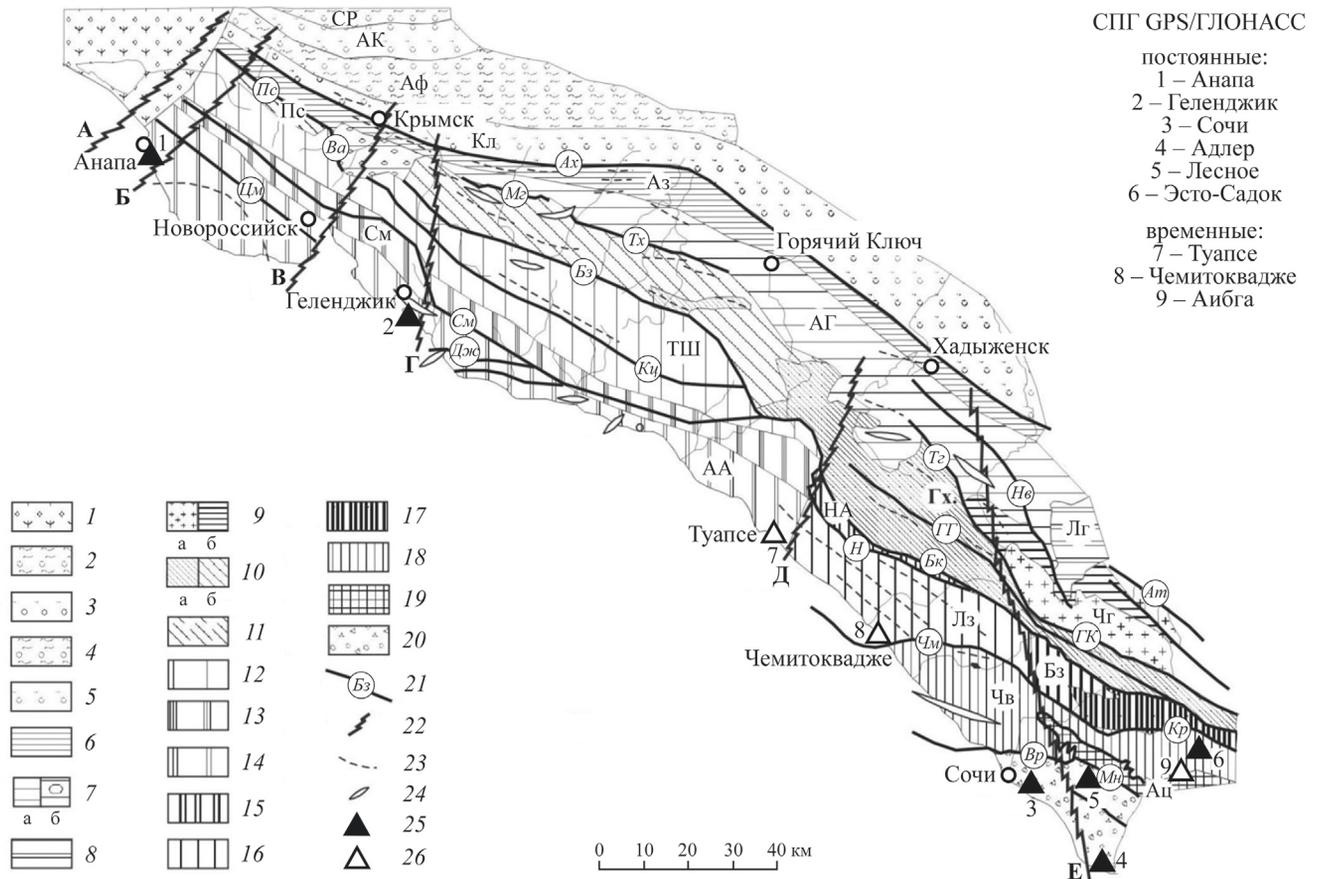
При создании сети СГП учитывались тектонические особенности территории таким образом, чтобы измерить главные и наиболее существенные

характеристики движений отдельных тектонических блоков и оценить активность существующей системы разломов, в районе которых может накапливаться опасная сейсмоупругая энергия деформаций.

На рисунке 1 представлен сегмент сети СГП, характеризующий в тектоническом плане движение участков покровно-складчатой зоны Северо-Западного Кавказа (СГП Анапа, Геленджик – Новороссийско-Лазаревская зона, СГП Эсто-Садок – Краснодарская зона) и Сочи-Адлерской депрессии (СГП Адлер, Сочи, Лесное) [3].

Долговременные непрерывные наблюдения за движениями СГП в этом районе дали возможность решить две основные задачи:

1. Были определены фоновые значения деформаций земной коры, что важно знать для инструментальной оценки напряженного состояния геофизической среды в процессе подготовки землетрясений. Для геодинамически и сейсмически активного кавказского региона это имеет принципиальное значение. Наряду с наличием установленных геотектоникой длительности эпох сжатия и растяжения для орогенов в десятки и сотни миллионов лет повторными нивелировками обнаружено, что смена подобных периодов на Кавказе возможна в течение коротких промежутков времени (25–30 лет) [4]. В этот период поднятия и сжатия обуславливают накопление потенциальной сейсмической энергии. В период растяжений и опускания

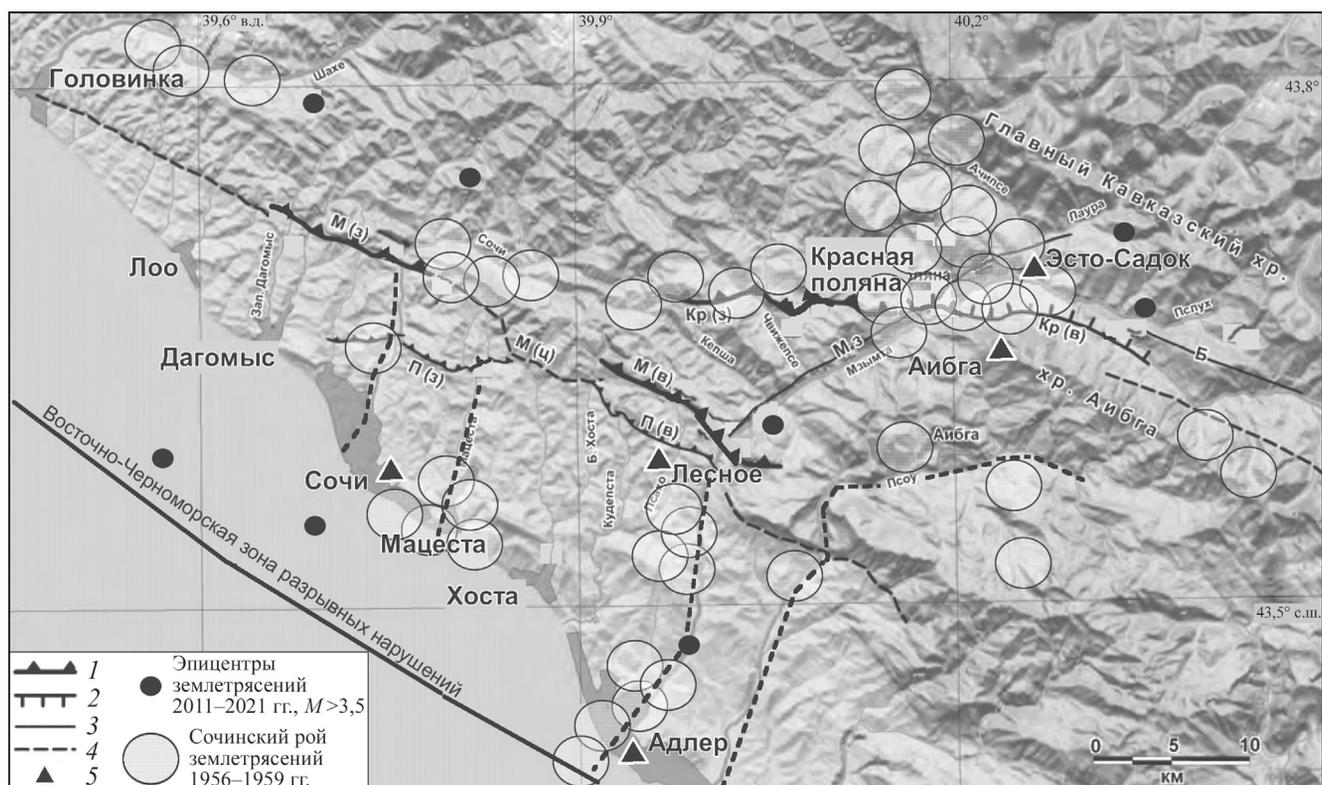


**Рис. 1.** Сеть СПГ GPS/ГЛОНАСС и тектоническая схема Северо-Западного Кавказа (составлена с использованием материалов работы [3]): 1 – Керченско-Таманский поперечный прогиб; 2–5 – Западно-Кубанский краевой прогиб: 2 – Славянско-Рязанская впадина (СР), 3 – Анастасиевско-Краснодарская антиклинальная зона (АК), 4 – Адагуро-Афипская впадина (Аф), 5 – Калужский антиклинальный пояс (Кл); 6–19 – складчатое сооружение Северо-Западного Кавказа: 6–8 – северное крыло мегантиклинория: 6 – Азовская антиклинальная зона (Аз), 7 – Абино-Гунайская зона (АГ) (а – келловей-эоценовый структурный этаж, б – олигоцен-антропогеновый структурный этаж), 8 – Лагонакская зона (ЛГ); 9–11 – центральный антиклинорий: 9 – Чугушское поднятие (Чг) (а – доюрский фундамент, б – ниже-среднеюрский структурный этаж), 10 – Гойтский антиклинорий (Гх) (а – ниже-среднеюрский структурный этаж, б – келловей-эоценовый структурный этаж), 11 – Псебепская антиклинальная зона (антиклинорий) (Пс); 12–19 – южное крыло мегантиклинория (Новороссийский синклинорий): 12 – Тхабско-Шапсутская синклинальная зона (ТШ), 13 – Семигорская антиклинальная зона (См), 14 – Анапско-Агойская синклинальная зона (АА), 15 – Невеб-Аутлинская зона (НА), 16 – Лазаревская зона (Лз), 17 – Бзычская зона (Бз), 18 – Чвежипсинская зона (Чв), 19 – Ахцу шовная (антиклинальная) зона (Ац); 20 – Сочи-Адлерская депрессия; 21 – крупные разрывные нарушения (названия показаны курсивом в кружках): Ах – Ахтырский, Ат – Атаманжийский, Бз – Безепский, Бк – Бекисейский, Ва – Верхнеабинский, Вр – Воронцовский, ГГ – Гойтх-Гогопсинский, ГК – Главный Кавказский, Дж – Джанхотский, Кр – Краснополянский, Кц – Коцехурский, Мз – Медвежьегорский, Мн – Монастырский, Нв – Навагинский, Н – Наужинский, Пс – Псебепский, См – Семигорский, Тз – Тугупсинский, Тх – Тхатахинский, Цм – Цемесский, Чм – Чемитокваджинский; 22 – крупные поперечные флексурно-разломные зоны (А – Джигинская, Б – Анапская, В – Новороссийская, Г – Геленджикская, Д – Туапсинская, Е – Пшехско-Адлерская); 23–24 – крупные складчатые структуры: 23 – синклинали, 24 – антиклинали; 25–26 – СПГ GPS/ГЛОНАСС: 25 – постоянные, 26 – временные.

**Fig. 1.** Network of GPS/GLONASS stations and tectonic scheme of the North-West Caucasus (compiled using materials [3]): 1 – Kerch-Taman transverse deflection; 2–5 – West Kuban regional deflection: 2 – Slavyansko-Ryazan depression (СР), 3 – Anastasievsko-Krasnodar anticlinal zone (АК), 4 – Adagumo-Afipskaya depression (Аф), 5 – Kaluga anticlinal belt (Кл); 6–19 – folding structure of the North-West Caucasus: 6–8 – north wing of meganticlinorium, 6 – Azov anticlinal zone (Аз), 7 – Abino-Gunai zone (АГ) (а – Callovian-Eocene structural floor, б – oligocene-anthropogen structural floor), 8 – Lagonaki zone (ЛГ); 9–11 – central anticlinorium: 9 – Chugush uplift (Чг) (а – pre-Jurassic foundation, б – lower-middle Jurassic structural floor), 10 – Goit anticlinorium (Гх) (а – lower-middle Jurassic structural floor, б – Callovian-Eocene structural floor), 11 – Psebep anticlinal zone (anticlinorium) (Пс); 12–19 – southern wing of meganticlinoria (Novorossiysk synclinoria): 12 – Thab-Shapsug synclinal zone (ТШ), 13 – Semigorsk anticlinal zone (См), 14 – Anapa-Agoia synclinal zone (АА), 15 – Neveb-Autlinskaya zone (НА), 16 – Lazarevskaya zone (Лз), 17 – Bzych zone (Бз), 18 – Chvezhipse zone (Чв), 19 – Akhtsu suture (anticlinal) zone (Ац); 20 – Sochi-Adler Depression; 21 – large discontinuous disorders (names are shown in italics in circles): Ах – Akhtyrskiy, Ат – Atamanzhi, Бз – Bezepkiy, Бк – Bekisheiskiy, Ва – Verkhnabinskiy, Вр – Vorontsovskiy, ГГ – Goitkh-Gogopsinskiy, ГК – Main Caucasian, Дж – Dzhankhotskiy, Кр – Krasnopolyanskiy, Кц – Kotsekhurskiy, Мз – Medvezhyegorskiy, Мн – Monastyrskiy, Нв – Navaginskiy, Н – Nauzhinskiy, Пс – Psebpskiy, См – Semigorskiy, Тз – Tugupsinskiy, Тх – Tkhamakhinskiy, Цм – Tsemesskiy, Чм – Chemitokvadhinskiy); 22 – large transverse flexural-fault zones (А – Dzhiginskaya, Б – Anapskaya, В – Novorossiyskaya, Г – Gelendzhikskaya, Д – Tuapsinskaya, Е – Pshekhsko-Adlerskaya); 23–24 – large folded structures: 23 – synclinals, 24 – anticlinals; 25–26 – GPS/GLONASS stations: 25 – continuous, active, 26 – short-term.

**Таблица 1.** Скорости движений СГП в системе ITRF2014 с 2010 по 2021 г.  
**Table 1.** SGS velocities in the ITRF2014 system in 2010–2021

СГП SGS	Компоненты вектора скорости, мм/год Velocity vector components, mm/year			$V$ Модуль вектора скорости, мм/год / Velocity vector module, mm/year	Азимут, градусы / Azimuth, degrees	$T$ Время наблюдения, годы / Observation time, years
	$V_E$ Запад – восток West-east	$V_N$ Север – юг North-south	$V_h$ Вертикальное движение / Vertical movement			
Адлер / Adler	25,49 ± 0,2	13,40 ± 0,4	-0,6 ± 0,3	28,84 ± 0,4	61,9	6,3
Сочи / Sochi	23,33 ± 0,3	14,19 ± 0,3	-3,4 ± 0,6	27,60 ± 0,4	58,3	9,1
Лесное / Lesnoe	24,08 ± 0,1	12,27 ± 0,2	-2,0 ± 0,8	26,60 ± 0,2	63	7,5
Эсто-Садок / Esto-Sadok	24,51 ± 0,2	11,92 ± 0,2	+1,6 ± 0,5	27,50 ± 0,3	64	9
Геленджик Gelendzhik	24,32 ± 0,2	10,78 ± 0,2	-3,1 ± 0,3	26,70 ± 0,3	66	8,3
Анапа / Anapa	28,10 ± 0,4	13,98 ± 0,4	-4,8 ± 0,5	31,42 ± 0,6	59,6	6,6
Туапсе / Tuapse	23,33 ± 0,4	11,90 ± 0,4	-1,7 ± 0,8	26,19 ± 0,5	62,9	4,2
Аибга / Aibga	32,06 ± 0,3	03,95 ± 0,5	+16,5 ± 2,5	32,3 ± 0,6	82,9	1,3



**Рис. 2.** Схема наиболее активных разломов Сочи-Краснополянского района и сеть СГП GPS/ГЛОНАСС (составлена с использованием материалов работ [9–11]): М(з) – западный сегмент Монастырского разлома, М(в) – восточный, М(ц) – центральный; П(з) – западный сегмент Пластунского разлома, П(в) – восточный; К(з) – западный сегмент Краснополянского разлома, К(в) – восточный (Аибгинский разлом); Б – Бекишейский; Мз – Мзымтинский разлом. 1 – взбросы; 2 – сбросы; 3 – преимущественно сдвиги; 4 – предположительно активные разломы по дистанционным данным и данным сейсмических наблюдений; 5 – СГП.

**Fig. 2.** The scheme of the most active faults of the Sochi-Krasnopolyanskiy district and the GPS/GLONASS SGS network (compiled using materials [9–11]): М(з) – western segment of the Monastery fault, М(в) – eastern, М(ц) – central; П(з) – western segment of the Plastunskiy fault, П(в) – eastern; К(з) – the western segment of the Krasnopolyanskiy fault, К(в) – the eastern (Aibginskiy fault); Б – the Bekisheiskiy fault; Мз – the Mzymtinskiy fault. 1 – thrust faults; 2 – hade faults; 3 – predominantly shifts; 4 – suspected active faults from remote data and seismic observations; 5 – GPS/GLONASS stations.

происходит освобождение сейсмической энергии крупных морфоструктурных блоков в зонах разломов и морфоструктурных узлов. Наблюдения на пунктах сети GPS в районе Азово-Черноморского побережья длительностью 6–9 лет можно принять за первое приближение к полуциклу смены геодинамического режима горной системы Кавказа длительностью 12–15 лет.

2. Относительно фоновых движений СГП были выявлены геодинамические аномалии горизонтальных и вертикальных движений, время формирования которых составляет от нескольких недель до нескольких месяцев, а иногда и несколько суток, причем в силу волновой природы тектонических движений они периодически меняют знак [5]. Наблюдения за геодинамическими аномалиями движения нескольких СГП были использованы в алгоритмах формирования прогнозных признаков накопления сейсмоупругих напряжений с дальнейшей активизацией опасных геодинамических процессов [6; 7].

На основе длительного ряда определений местоположения на протяжении последних 6–9 лет были определены компоненты вектора скорости  $V_E$  (скорость в восточном направлении),  $V_N$  (скорость в северном направлении),  $V_h$  (вертикальная скорость), модуль и азимут вектора движения в международной координатной системе ITRF2014 (табл. 1). Представляемые данные уточняют и дополняют ранее опубликованные измерения [1; 2].

В Лазаревской зоне южного крыла Новороссийского синклинория выполнялись кратковременные (1,5 года) измерения на пункте Чемитоквадже. В период наблюдений на этом пункте была зафиксирована высокоамплитудная геодинамическая аномалия горизонтального движения, что не дало возможности получить корректные усредненные значения компонент вектора скорости и включить их в таблицу 1. В течение 1,3 года выполнялись GPS-измерения на хребте Аибга. Были также использованы измерения станции Туапсе, работающей в рамках международного проекта GLOSS (Global Sea Level Observing System) под эгидой ЮНЕСКО (4,2 года). Движение всех пунктов сети включает общий тренд в направлении северо-восток и согласуется с движением международной станции Зеленчукская (ZECK), скорость и азимут которой составляют 28,28 мм/год и  $+65,43^\circ$  соответственно [8].

Юго-восточный сегмент сети, включающий постоянные СГП Сочи, Лесное, Адлер и Эсто-Садок,



Рис. 3. Спутниковый геодинамический пункт на хребте Аибга.  
Fig. 3. Satellite geodynamic station at Aibga Ridge.

охватывает территорию Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны, разрывно-складчатая структура которой, согласно современным взглядам на геодинамику Западного Кавказа, сформировалась в условиях тангенциального сжатия антикавказской ориентировки. Для анализа и интерпретации данных движения юго-восточного сегмента сети СГП, представленных в таблице 1, использована схема активной разломной тектоники Сочи-Краснополянского района, сформированная по данным последних исследований [9; 10], а также схема расположения эпицентров Краснополянского роя землетрясений по результатам исследований экспедиции РАН в 1956–1959 гг. [11], на которой показаны зоны активных разломов (рис. 2).

Береговые СГП Сочи и Адлер, отстоящие друг от друга на 22 км, разделены долиной р. Мзымты. Скорость опускания этих пунктов составляет  $-3,4$  и  $-0,6$  мм/год соответственно, что согласуется с данными повторных нивелировок приморской полосы к юго-востоку от Сочи, где скорость опускания берега достигает  $-6$  мм/год [12]. СГП Лесное на расстоянии 17 км к северо-востоку от Сочи и к югу от правого сегмента Пластунского разлома также вовлечен в опускание ( $-2,0$  мм/год). Скорость горизонтального движения СГП Адлер ( $28,84$  мм/год) превышает скорости движения СГП Сочи ( $27,60$  мм/год) и Лесное ( $26,6$  мм/год). Наблюдаемые движения этих пунктов и данные сейсмических исследований [9; 11] подтверждают предположение [11], что сейсмоактивный Мзымтинский

**Таблица 2.** Скорости движений СГП Эсто-Садок и Аибга в системе ITRF2014 с 10.06.2011 по 08.12.2011 г.  
**Table 2.** SGS velocities ESTS and AIBG in the ITRF2014 system from 10.06.2011 to 08.12.2011

СГП SGS	Компоненты вектора скорости, мм/год Velocity vector components, mm/year			$V$ Модуль вектора скорости, мм/год / Velocity vector module, mm/year	Азимут, градусы / Azimuth, degrees	$T$ Время наблюдения, годы / Observation time, years
	$V_E$ Запад – восток West-east	$V_N$ Север – юг North-south	$V_h$ Вертикальное движение / Vertical movement			
Эсто-Садок / Esto-Sadok	28,7 ± 0,2	01,0 ± 1,7	+18,4 ± 0,9	28,8	88,0	0,4
Аибга / Aibga	34,9 ± 0,3	17,5 ± 1,1	-05,5 ± 5,4	39,0	63,4	0,4

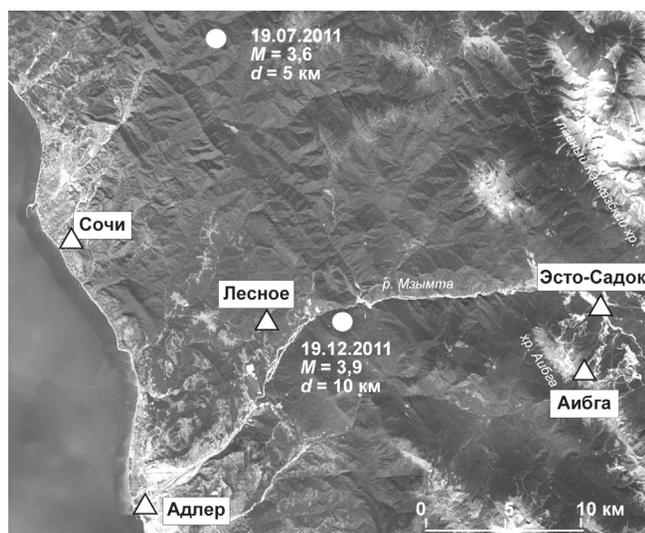
разлом, пересекающий восточный сегмент Краснополянского разлома на северо-востоке до его сопряжения с Пластунским разломом на юго-западе, разделяет в районе Красной Поляны зоны различных тектонических деформаций с элементами левого сдвига. GPS-наблюдениями и данными сейсмических исследований установлена геодинамическая активность района нижней долины р. Мзымты, покрытого серией разломов и зонами трещиноватости, ограниченными субширотными разломами, определяющими главную геотектоническую зональность Кавказа с возможным продолжением геодинамической активности этого района в море до пересечения с Восточно-Черноморской зоной разрывных нарушений, протягивающейся вдоль Черноморского побережья на 200 км. Не исключено также обособленное проседание микроблока

с пунктом Сочи, ограниченного с севера Пластунским разломом, а с запада и востока разломами по долинам рек Сочи и Мацеста соответственно.

СГП Эсто-Садок расположен на южном склоне Большого Кавказского хребта на западном берегу р. Мзымты в пределах неотектонической Мзымтинской депрессии. Его северная компонента скорости движения замедлена до 11,92 мм/год, а устойчивое воздымание этого пункта со скоростью +1,6 мм/год согласуется с современным представлением о сильно дифференцированных и высокоградиентных вертикальных движениях Большого Кавказа, хорошо отражающих особенности его морфоструктуры (от +2... 3 мм/год в предгорьях до +12 мм/год в осевой части [4]). Скорость горизонтального движения СГП Эсто-Садок (27,5 мм/год) близка к аналогичной скорости СГП Сочи и Лесное с разворотом вдоль Краснополянского разлома, в районе которого, по оценкам работ [10; 13], имеется потенциальный сейсмический очаг с прогнозируемой максимальной магнитудой ожидаемых землетрясений  $M = 7,3$ .

Представляет интерес геодинамика разноприподнятых морфоструктурных блоков по разные стороны Мзымтинского разлома. С целью ее изучения в августе 2010 г. в 5 км к юго-востоку и на 1700 м выше СГП Эсто-Садок, на хребте Аибга, был установлен временный пункт GPS-наблюдений. Использовался приемник GPS Trimble 5700 и высокоточная антенна JAVRINGANT\_D. Стальное спецоснование антенны и устройство принудительного центрирования из нержавеющей стали были надежно закреплены в скальном грунте анкерными болтами на глубину 0,5 м (рис. 3).

После обработки исходных данных пакетом GAMIT V.10.7 были сформированы временные ряды пространственного положения пунктов и вычислены компоненты скорости движения в го-



**Рис. 4.** Схема расположения пунктов GPS-наблюдений и сейсмичность в районе Большого Сочи с июня по декабрь 2011 г.  $M$  – магнитуда,  $d$  – глубина.

**Fig. 4.** Location of GPS stations and seismicity in the Greater Sochi area from June to December 2011.  $M$  – magnitude,  $d$  – hypocenter depth.

ризонгальной плоскости ( $V_N$ ,  $V_E$ ) и по высоте ( $V_h$ ). Параметры движения этого пункта с 11.08.2010 по 08.12.2011 г. представлены в таблице 1. Характеристики движения СГП Аибга и Эсто-Садок, полученные в результате синхронных GPS-измерений с 10.06.2011 по 08.12.2011 г., показаны в таблице 2.

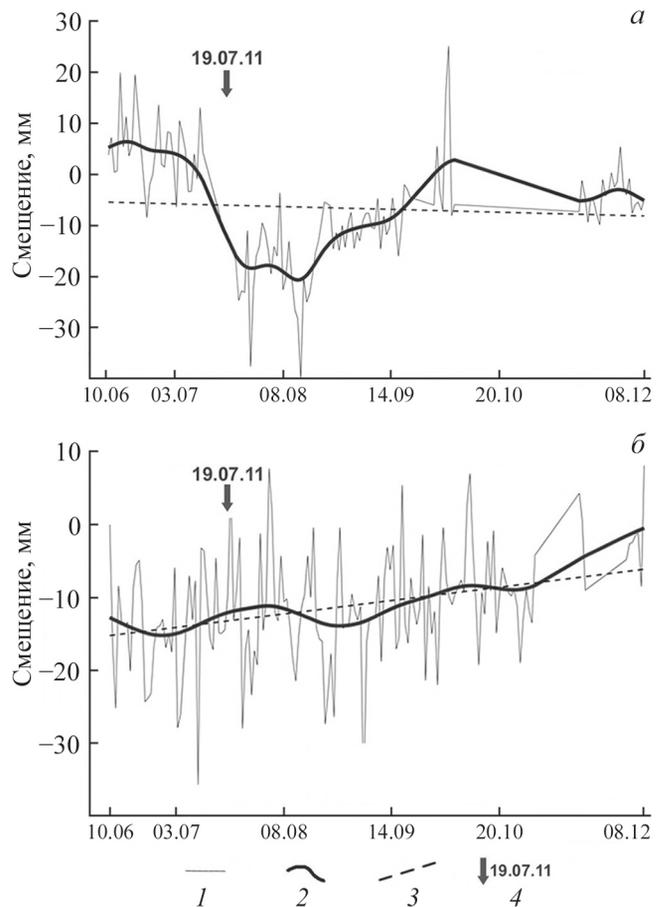
За время наблюдений 19.07.2011 г. в 37 км к северо-западу от СГП Аибга было зафиксировано землетрясение ( $M = 3,6$ ) на глубине 5 км.

19.12.2011 г., через 11 дней после синхронных измерений, произошло землетрясение ( $M = 3,9$ ) на глубине 10 км в 20 км к западу от СГП Эсто-Садок в долине р. Мзымты (рис. 4).

Согласно графику вертикального движения СГП Аибга событие 19.07.2011 г. произошло на фоне бухтообразного проседания высоты с общей скоростью опускания за 4 месяца наблюдений  $-5,5$  мм/год (рис. 5, табл. 2). В то же время СГП Эсто-Садок устойчиво поднимался со скоростью  $+18,4$  мм/год с кратковременным скачком высоты в момент землетрясения 19.07.2011 г. Графики вертикальных движений дают основание предположить разноблоковый характер морфоструктур западной и восточной зон Мзымтинской депрессии, а анализ компонент горизонтального смещения пунктов после элементарных преобразований подтверждает левосторонний сдвиг вдоль Мзымтинского разлома [9] (рис. 5, табл. 2).

В западной части Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны, ограниченной Воронцовским разрывным нарушением на юго-востоке и Туапсинской поперечной флексурно-разломной зоной на северо-западе, преобладает активность разломов поперечного (антикавказского) простирания. Характерной чертой сейсмичности этого района, как и всего района Большой Сочи, является группирование землетрясений в пространстве и времени. Есть достоверные данные о четырех роях землетрясений в прибрежной зоне (Сочинский рой 1869–1870 г., Головинский рой 9–31.10.1912 г., Туапсинский рой 1935–1936 гг. и Сочинский рой 1969–1971 гг.) [10].

Горизонтальная протяженность эпицентров последнего Сочинского роя землетрясений составила 25 км при глубине 10 км с магнитудой главного толчка 5,2. Деформация морского дна вызвала подъем берега в районе пос. Лоо на 1,2 м [10]. Современная геодинамическая активность этого района подтверждается GPS-наблюдениями на СГП Чемитоквадже, расположенном в Лазаревской

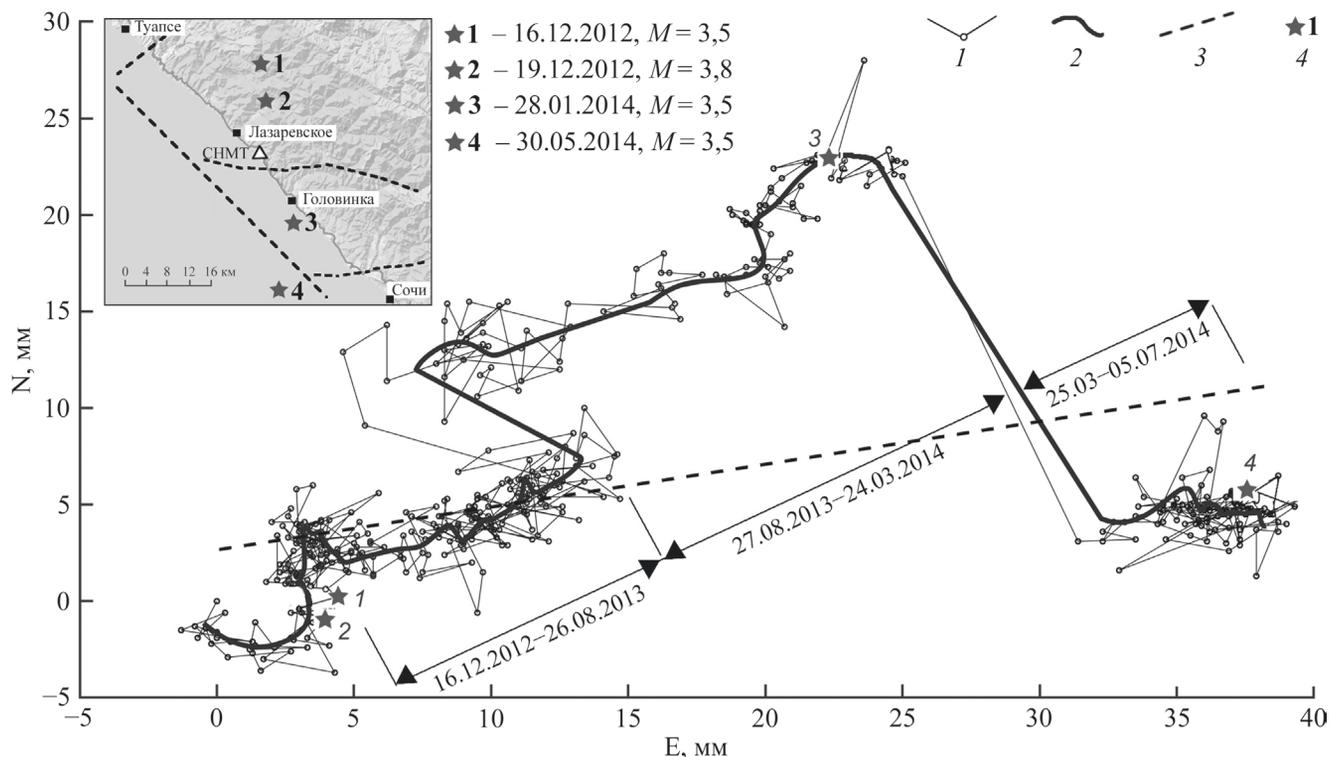


**Рис. 5.** Вариации высоты СГП Аибга (а) и Эсто-Садок (б) с 10.06.2011 г. по 08.12.2011 гг.: 1–3 – траектории движения: 1 – исходная (посуточная), 2 – сглаженная, 3 – тренд; 4 – момент землетрясения 19.07.2011 г.

**Fig. 5.** Variations in the height of the Aibga (a) and Esto-Sadok (b) SGS from 10.06.2011 to 08.12.2011: 1–3 – trajectories of movement: 1 – initial (daily), 2 – smoothed, 3 – trend; 4 – earthquake date of 19.07.2011.

зоне южного крыла Новороссийского синклинория (рис. 6).

Геодинамическая активность в районе СГП Чемитоквадже проявилась в начале 2012 г. высокоамплитудной геодинамической аномалией юго-восточного направления, завершившейся землетрясениями № 1 и № 2 магнитудами 3,5 и 3,9 соответственно. После периода движения в северо-восточном направлении в конце августа 2012 г. траектория резко сдвинулась к северо-западу, после чего сохраняла северо-восточное направление до конца марта 2014 г. На этом отрезке траектории 28.01.2014 г. было зафиксировано землетрясение № 3 в море, в 10 км к югу от пос. Головинка, и в конце марта произошел сдвиг траектории движения на юго-восток к направлению стабильного общекавказского тренда (рис. 6).



**Рис. 6.** Движение СПГ Чемитоквадже и сейсмичность в горизонтальной плоскости в 2012–2014 гг.: 1–3 – траектория движения: 1 – исходная (суточная), 2 – сглаженная, 3 – средний многолетний тренд; 4 – номер ближайшего землетрясения; N и E – смещение по широте и долготе в северном и восточном направлении соответственно.

**Fig. 6.** Movement of SGS Chemitokvadge and seismicity in the horizontal plane in 2012–2014: 1–3 – trajectory of movement: 1 – initial (daily), 2 – smoothed, 3 – average multi-year trend; 4 – number of the nearest earthquake; N and E – latitude and longitude offset northbound and eastbound, respectively.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. В результате многолетних непрерывных наблюдений за движениями постоянно действующих СПГ GPS/ГЛОНАСС в районе черноморского побережья определены фоновые значения деформаций земной коры, что важно знать для инструментальной оценки напряженного состояния геофизической среды в процессе подготовки землетрясений.

2. Наблюдениями на СПГ Сочи, Адлер, Лесное и Эсто-Садок, расположенных в пределах Пшехско-Адлерской поперечной флексуно-разломной зоны, подтверждена геодинамическая активность наиболее сейсмически опасного Мзымтинского разлома от района Красной Поляны до его сопряжения с Пластунским разломом. GPS-наблюдениями и данными сейсмических исследований установлена геодинамическая активность района нижней долины р. Мзымты, покрытого серией разломов и зонами трещиноватости, ограниченными субширотными разломами, определяющими главную геотектоническую зональность Кавказа с возможным

продолжением геодинамической активности этого района в море.

3. В результате синхронных GPS-измерений на СПГ Эсто-Садок и временном СПГ Аибга, расположенных с разницей высот в 1700 м, установлен разноблоковый характер движений на этих пунктах и подтвержден левосторонний сдвиг вдоль Мзымтинского разлома.

4. В западном районе Туапсинско-Сочинской сейсмоактивной зоны наблюдениями на временном СПГ Чемитоквадже выявлена геодинамическая активность разломов поперечного (антикавказского) направления, что требует установки постоянных СПГ в районе Туапсе, пос. Чемитоквадже и пос. Головинка.

5. Более длительный период непрерывных наблюдений на пунктах GPS (25–30 лет) даст возможность обнаружить смену геодинамических периодов сжатия и растяжения земной коры района исследований для оценки геодинамической обстановки при строительстве долговременных объектов повышенной ответственности и определения прогнозных признаков сейсмической опасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Глазырин Е.А., Фоменко В.А., Карцева М.В. 2020. Итоги и перспективы применения GNSS-пунктов для мониторинга состояния геодинамической активности северокавказского сейсмоактивного региона. В кн.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том X. Часть 2*. М., ИИЕТ РАН: 21–26.
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. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. 2008. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа. В кн.: *Проблемы тектонофизики*. М., ИФЗ РАН: 194–224.
4. Лилиенберг Д.А., Яценко В.Р. 1991. Основные тенденции современной геодинамики горных морфоструктур Большого Кавказа по новым геодезическим данным. *Геодезия и картография*. 2: 21–28.
5. Касьянова Н.А. 2003. *Экологические риски и геодинамика*. М., Научный мир: 332 с.
6. Бабешко В.А., Калинин В.В., Шестопалов В.Л. 2020. Интегральный признак напряженно-деформированного состояния среды по данным GNSS-наблюдений. *Наука Юга России*. 16(1): 3–10. doi: 10.7868/S25000640200101
7. Любушин А.А. 1993. Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга. *Физика Земли*. 3: 103–108.
8. Милуков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. 2015. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. *Геотектоника*. 3: 56–65.
9. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатиков А.В. 2014. *Эндогенные опасности Большого Кавказа*. М., ИФЗ РАН: 256 с.
10. Кузин И.П., Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Парамонов А.А. 2009. О сейсмической опасности района Большой Сочи. *Океанология*. 49(5): 773–783.
11. Кац А.З., Рустанович Д.Н. 1961. Сейсмичность района Сочи – Красная Поляна. В кн.: *Землетрясения в СССР*. М., ИФЗ РАН: 235–239.
12. Джикия В.М. 1966. *Результаты изучения современных тектонических движений на побережье Черного моря (Колхидская низменность) по данным повторных нивелировок. Глубинное строение Кавказа*. М., Наука: 164 с.
13. Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л., Богатиков О.А., Гурбанов А.Г., Коваленко В.И., Газеев В.М., Поляк Б.Г., Покровский Б.Г., Лаврушин В.Ю., Куликов В.И., Мелекесцев И.В., Кашук Д.Г., Милуков В.К., Копяев А.В. 2001. *Геодинамика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа*. М., ИФЗ РАН: 333 с.
14. *geoecology of the North Caucasus. Vol. 10. Part 2*. Moscow, S.I. Vavilov Institute of the History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences: 21–26. (In Russian).
15. 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).
16. Marinin A.V., Rastsvetaev L.M. 2008. *Strukturnye paragenезы Severo-Zapadnogo Kavkaza*. [Structural parageneses of the North-West Caucasus]. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 194–224. (In Russian).
17. Lilienberg D.A., Yashchenko V.R. 1991. [The main trends of modern geodynamics of mountain morphology structures of the Greater Caucasus according to new geodetic data]. *Geodeziya i kartografiya*. 2: 21–28. (In Russian).
18. Kas'yanova N.A. 2003. *Ekologicheskie riski i geodinamika*. [Environmental risks and geodynamics]. Moscow, Nauchnyy mir: 332 p. (In Russian).
19. Babeshko V.A., Kalinchuk V.V., Shestopalov V.L. 2020. [Integrated indicator of stressed-strain state of the Earth's crust from GNSS observations]. *Nauka Yuga Rossii*. 16(1): 3–10. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640200101
20. Lyubushin A.A. 1993. [Multidimensional analysis of time series of geophysical monitoring systems]. *Fizika Zemli*. 3: 103–108. (In Russian).
21. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. 2015. Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations. *Geotectonics*. 49(3): 210–218. doi: 10.1134/S0016852115030036
22. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Gorbatikov A.V. 2014. *Endogennyye opasnosti Bol'shogo Kavkaza*. [Endogenous hazards of the Greater Caucasus]. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 256 p. (In Russian).
23. Kuzin I.P., Levchenko D.G., Lobkovsky L.I., Paramonov A.A. 2009. On the seismic hazard of the Bolshoi Sochi region. *Oceanology*. 49(5): 718–728. doi: 10.1134/S0001437009050130
24. Kats A.Z., Rustanovich D.N. 1961. [Seismicity of Sochi – Krasnaya Polyana district]. In: *Zemletryaseniya v SSSR*. [Earthquakes in the USSR]. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 235–239. (In Russian).
25. Dzhikiya V.M. 1966. *Rezul'taty izucheniya sovremennykh tektonicheskikh dvizheniy na poberezh'e Chernogo morya (Kolkhidskaya nizmennost') po dannym povtornykh nivelirovok. Glubinnoe stroenie Kavkaza*. [Results of the modern tectonic movements investigations on the coast of the Black Sea (the Colchis lowland), according to repeated levellings. Deep structure of the Caucasus]. Moscow, Nauka: 164 p. (In Russian).
26. Rogozhin E.A., Sobisevich L.E., Nechaev Yu.V., Sobisevich A.L., Bogatikov O.A., Gurbanov A.G., Kovalenko V.I., Gazeev V.M., Polyak B.G., Pokrovskiy B.G., Lavrushin V.Yu., Kulikov V.I., Melekestsev I.V., Kashchuk D.G., Milyukov V.K., Kopyaev A.V. 2001. *Geodinamika, seysmotektonika i vulkanizm Severnogo Kavkaza*. [Geodynamics, seismotectonics and volcanism of the North Caucasus]. Moscow, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences: 333 p. (In Russian).

## REFERENCES

1. Babeshko V.A., Shestopalov V.L., Glazyrin E.A., Fomenko V.A., Kartseva M.V. 2020. [Results and prospects of GNSS-stations application for monitoring of state of geodynamic activity of North Caucasus seismic region]. In: *Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. Tom X. Chast' 2*. [Modern problems of geology, geophysics and

Поступила 02.09.2021