

УДК 550.34.016(477.75)  
DOI: 10.7868/S25000640220205

## ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РАЙОНА КРЫМСКОГО МОСТА

© 2022 г. Академик В.А. Бабешко<sup>1</sup>, чл.-корр. РАН В.В. Калинин<sup>1</sup>,  
В.Л. Шестопалов<sup>1</sup>, Е.А. Глазырин<sup>2</sup>, Б.Н. Алёшин<sup>2</sup>, И.В. Леонтьев<sup>2</sup>,  
О.В. Дидикин<sup>2</sup>, А.М. Бородако<sup>2</sup>, В.А. Фоменко<sup>3</sup>, В.М. Шереметьев<sup>4</sup>

**Аннотация.** Представлено описание комплексного автономного геодинимического пункта GPS в районе моста через Керченский пролив, расположенного в сейсмически активной зоне Керченско-Таманской области с максимально возможным уровнем сотрясений до 9 баллов. Опасность для этого сложного инженерного сооружения представляет глубинный Керченский разлом, сейсмическая активность которого зафиксирована в многочисленных исторических записях и в современный индустриальный период. Угрозу представляют также геодинимические асейсмические движения, грязевой вулканизм и другие геологические процессы, которые могут вызвать структурные нарушения конструкции моста и создать аварийные ситуации на этом особо важном объекте.

В 2021 г. с целью мониторинга сейсмогеодинимической активности района моста через Керченский пролив силами ЮНЦ РАН и АО «Южморгеология» на косе Чушка был установлен автономный спутниковый геодинимический пункт (СГП) в составе сети СГП на Таманском полуострове. Приемная наземная конструкция антенного устройства GPS выполнена с учетом рекомендаций международной геодинимической службы IGS и состоит из специального основания и устройства принудительного центрирования. Измерения на геодинимическом пункте выполняются приемником сигналов спутников GPS Trimble 5700 и индикатором объемной активности радона MR-107. Управление работой всех устройств СГП осуществляется безвентиляторным промышленным компьютером ХСУ на базе операционной системы Windows 7. Электрические характеристики схемы бесперебойного электропитания определяли с использованием методики UNAVCO (University NAVSTAR Consortium, США). Данные измерений каждые сутки по сети Интернет принимаются в центр мониторинга ЮНЦ РАН. После первичной обработки GPS-измерения поступают на вторичную обработку в геодинимический пакет программ GAMIT v. 7. Полученные после обработки данные содержат координаты приемной антенны СГП с точностью 2–3 мм по горизонтали и 6–8 мм по высоте. Вторичная обработка завершается с использованием пакета программ (на языке Matlab), разработанного в ЮНЦ РАН.

**Ключевые слова:** Крымский мост, геодинимический пункт, GPS-измерения, землетрясения.

### GEODYNAMIC MONITORING OF THE CRIMEAN BRIDGE AREA

Academician RAS V.A. Babeshko<sup>1</sup>, Corresponding Member RAS V.V. Kalinichuk<sup>1</sup>,  
V.L. Shestopalov<sup>1</sup>, E.A. Glazyrin<sup>2</sup>, B.N. Alyoshin<sup>2</sup>, I.V. Leontyev<sup>2</sup>, O.V. Didikin<sup>2</sup>,  
A.M. Borodako<sup>2</sup>, V.A. Fomenko<sup>3</sup>, V.M. Sheremetyev<sup>4</sup>

**Abstract.** A description of the integrated autonomous GPS geodynamic station in the area of the bridge across the Kerch Strait, located in the seismically active zone of the Kerch-Taman region with the maximum possible level of shaking up to 9 points, is presented. The danger to this complex engineering structure is the

<sup>1</sup> Южный научный центр Российской академии наук (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: vkalin415@mail.ru, valcpg@mail.ru

<sup>2</sup> АО «Южморгеология» (Yuzhmoregeologiya Joint-Stock Company, Gelendzhik, Russian Federation), Российская Федерация, 353461, г. Геленджик, ул. Крымская, 20, e-mail: eaglazyrin@mail.ru, bnaleshin@rusgeology.ru, LeontyevIV@rusgeology.ru, 9@bk.ru, andrejborodako@mail.ru

<sup>3</sup> Филиал ЮФУ в Геленджике (Southern Federal University branch in Gelendzhik, Russian Federation), Российская Федерация, 353461, г. Геленджик, ул. Заставная, 10а, e-mail: FomenkoVA@rusgeology.ru

<sup>4</sup> ООО Проектный институт территориального планирования (Project Institute of Territory Planning Ltd., Krasnodar, Russian Federation), Российская Федерация, 350049, г. Краснодар, ул. Северная, 255, помещение 316, e-mail: sheremetyev-v@mail.ru

deep Kerch fault, the seismic activity of which was recorded in numerous historical records and data of the modern industrial period. Geodynamic aseismic movements, mud volcanism and other hazardous geological processes, which can cause damage to the bridge structure and create emergency situations at this particularly important object, are also dangerous.

In 2021, in order to monitor the seismogeodynamic activity of the bridge area across the Kerch Strait, the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS) and Yuzhmoregeologiya JSC installed an autonomous satellite geodynamic station (SGS) as part of the SGS network on the Taman Peninsula. The receiving ground design of the GPS antenna device is made taking into account the recommendations of the international geodynamic service IGS and consists of a special base and a forced centering device. Measurements at the geodynamic station are performed by the GPS Trimble 5700 receiver and the MR-107 radon indicator. The operation of all SGS devices is controlled by a fanless XCY industrial computer based on the Windows 7 operating system. The electrical characteristics of the uninterruptible power supply circuit were determined by the method of UNAVCO (University NAVSTAR Consortium, USA). Measurement data are received every day via the Internet at the monitoring center of the SSC RAS. After primary processing, GPS measurements are sent for secondary processing to the geodynamic program GAMIT v. 7. The data obtained after processing contain the coordinates of the receiving antenna of the SGS with an horizontal accuracy of 2–3 mm and vertical accuracy of 6–8 mm. The secondary processing ends with the Matlab program package developed at the SSC RAS.

**Keywords:** Crimean Bridge, geodynamic station, GPS measurements, earthquakes.

Создание транспортного перехода через Керченский пролив инициировало проблему надежной эксплуатации этого сложного инженерного сооружения, расположенного в сейсмически активной зоне Керченско-Таманской области. Опасность представляют проявления геодинамических асейсмических движений, грязевого вулканизма и другие геологические процессы [1; 2]. Сейсмическая активность и тектонические смещения могут вызывать структурные нарушения конструкции и создать аварийные ситуации на этом особо важном объекте.

Согласно современным данным сейсмической изученности Северо-Западного Кавказа РФ район Азово-Черноморского побережья РФ на карте

предельно возможного (максимального) распределения балльности относится к зоне 9-балльных сотрясений [3; 4].

Данные исторических записей свидетельствуют о разрушительном землетрясении в районе Керченского пролива в 63 г. до н.э. ( $M = 6,4$ ) и разрушениях древних городов Боспорского царства [5]. Сильное землетрясение произошло в 60 км к востоку от Керченского пролива в 275 г. н.э. ( $M = 7,3$ ). В период инструментальных наблюдений, 24.07.2008, Геофизической службой РАН было зафиксировано землетрясение ( $M = 3,7$ ) с глубиной гипоцентра 40 км на расстоянии 500 м от трассы транспортного перехода и в 1 км от побережья Тамани. Землетрясение магнитудой 3,5 на глубине 10 км произошло в Азовском море в районе Керченского глубинного разлома 07.05.2015. В.И. Уломов с соавторами [6] выделяет также в качестве потенциально опасной зоны восточное побережье Крыма, где происходили сильные землетрясения магнитудой до 6,5, и предполагает возможность миграции этой зоны в направлении Керченского пролива.

Общепризнано, что землетрясения являются следствием движения блоков земной коры и предваряются деформациями земной поверхности, которые можно фиксировать различными инструментальными методами на геодинамических пунктах и использовать в качестве предвестников. В последние годы широкое применение нашли сети спутниковых геодинамических пунктов (СП) с приемной аппаратурой глобальных радионавигационных си-

**Таблица 1.** Среднее ожидаемое число для северокавказских землетрясений ( $N$ ) с момента Пантикапейского землетрясения в 63 г. до н.э., вероятная оценка балльности ( $I$ ) и радиус Добровольского ( $R_D$ , км) для максимальной магнитуды ( $M_{max}$ )  
**Table 1.** The average expected number for North Caucasian earthquakes ( $N$ ) since the Panticapean earthquake in 63 BC, the probable estimate of the score ( $I$ ) and the Dobrovolsky radius ( $R_D$ , km) for the maximum magnitude ( $M_{max}$ )

$M_{max}$	$N$	$I$	$R_D$
3,5	74	6,13	31
4,0	27	6,73	52
4,5	10	7,27	86
5,0	3	7,71	141
5,5	1	8,06	230
6,0	0,4	8,47	380
6,5	0,16	8,90	623

стем GPS и ГЛОНАСС. При создании сетей СГП часто применяют эмпирический радиус Добровольского  $R_D$ , установленный дистанционными методами зондирования и определяющий площадь проявления деформационных предвестников готовящегося землетрясения магнитудой  $M$  ( $R_D = 10^{0,43M}$ ) [7]. В таблице 1 для района Керченского пролива представлена оценка среднего ожидаемого числа северокавказских землетрясений разных магнитуд на площади  $1000 \text{ км}^2$  с момента Пантикапейского землетрясения в 63 г. до н.э. [8; 9], макросейсмической балльности и радиуса Добровольского.

В 2021 г. с целью мониторинга сейсмогеодинамической активности района транспортного перехода через Керченский пролив силами Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) и АО «Южморгеология» на косе Чушка был установлен автономный геодинамический пункт на базе действующего СГП Порт-Кавказ в составе сети СГП (Темрюк – Тамань – Анапа) [9; 10]. Для готовящегося землетрясения ( $M = 5$ ) в районе Керченского пролива значение  $R_D$  составляет 141 км, что указывает на возможность фиксировать деформационные предвестники сетью СГП на Таманском полуострове.

СГП Порт-Кавказ расположен в районе субмеридионального Керченского глубинного разлома на расстоянии 9 км к востоку от Крымского моста (рис. 1).

Приемная наземная конструкция антенного устройства СГП Порт-Кавказ выполнена с учетом рекомендаций международной геодинамической службы IGS и состоит из специального основания и устройства принудительного центрирования (УПЦ). Специальное основание антенного устройства выполнено из стальных труб и смонтировано на трех бетонных опорах на глубине 1 м. Бетонные опоры помещены в кожух из полихлорвиниловых труб для уменьшения агрессивного воздействия окружающего грунта. Таким же образом выполнено бетонное основание под центральный маркер, контролирующей точную привязку УПЦ (рис. 2).

Деформации основания и УПЦ при перепаде температур в  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  не превышают 0,9 мм по горизонтали и высоте. Прототипом УПЦ, выполненного из нержавеющей стали, была выбрана аналогичная конструкция фирмы «Trimble» (США). Измерительная аппаратура пункта размещена в строительном вагончике на расстоянии 30 м от приемной антенны. Бесперебойное электропитание напря-

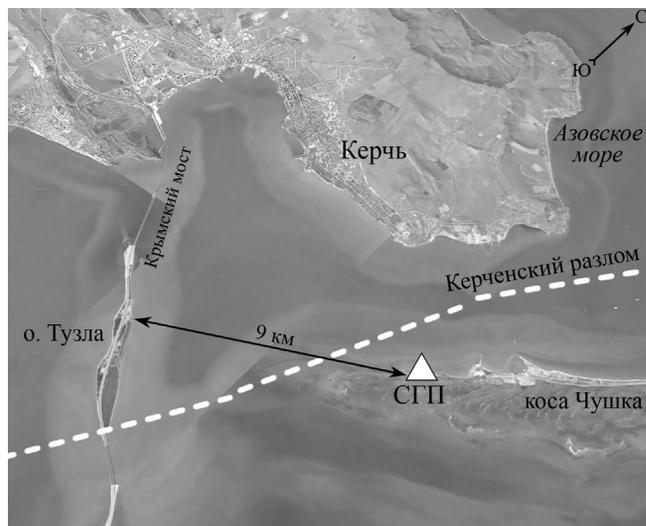


Рис. 1. Схема расположения СГП Порт-Кавказ в районе транспортного перехода через Керченский пролив.

Fig. 1. Layout of the SGS Port-Caucasus in the Crimean Bridge area.

жением 12 В обеспечивается солнечной электростанцией на базе фотоэлектронного модуля мощностью 380 Вт (рис. 3).

Измерения на геодинамическом пункте выполняются приемником сигналов спутников GPS Trimble 5700 и антенной TRM39105. В ноябре 2021 г. в состав аппаратуры был включен индикатор объемной активности радона MR-107. Управление работой всех устройств СГП осуществляется безвентиляторным промышленным компьютером ХСУ на базе операционной системы Windows 7. В целях экономии электроэнергии управляющий

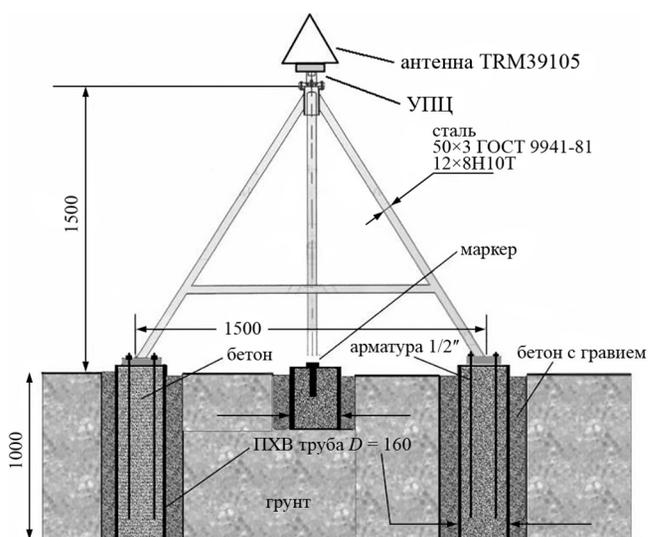


Рис. 2. Схема конструкции специального основания антенны и УПЦ спутникового геодинамического пункта Порт-Кавказ.

Fig. 2. Design diagram of antenna monument and device for forced centering of satellite geodynamic station Port-Caucasus.



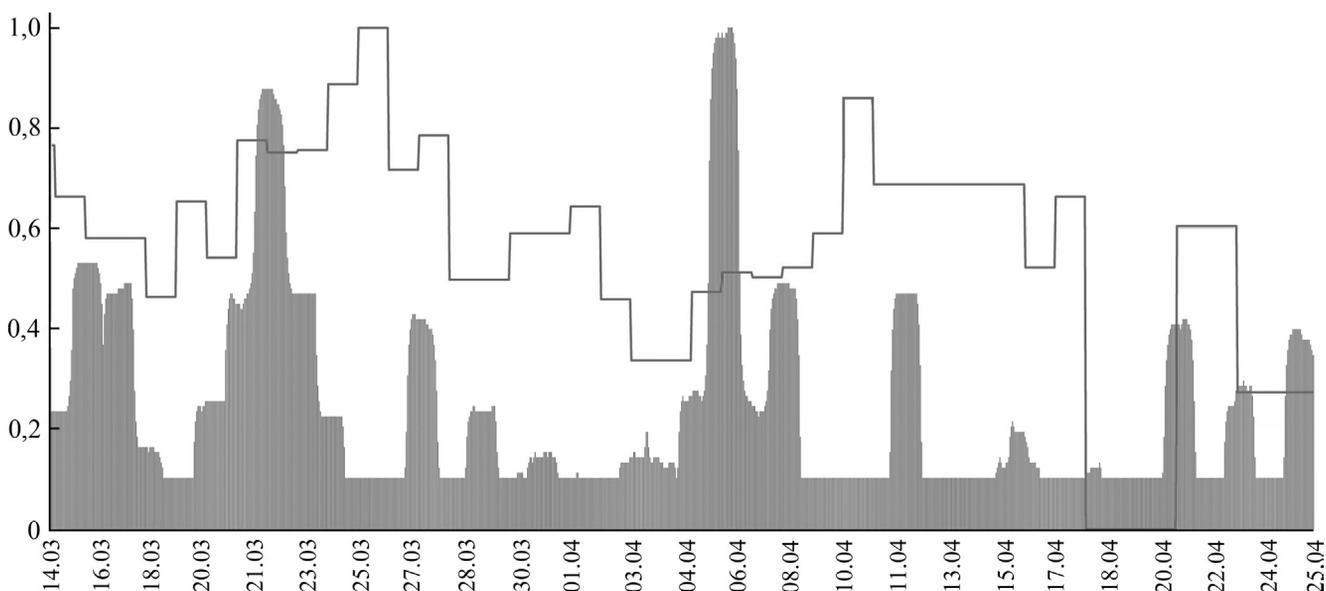
**Рис. 3.** Приемное антенное устройство и фотоэлектрический модуль на крыше вагончика с аппаратурой СГП Порт-Кавказ.  
**Fig. 3.** Receiving antenna and photoelectric module on the roof of the trailer with SGS Port-Caucasus equipment.



**Рис. 4.** Схема аппаратного комплекса СГП Порт-Кавказ.  
**Fig. 4.** Diagram of the SGS Port-Caucasus equipment.

компьютер XCY в течение темного времени суток отключается, а инвертор автоматически подключает аппаратуру к аккумуляторной батарее общей емкостью 450 Ач. В дневное время фотоэлектрический модуль снова обеспечивает аппаратуру пункта электропитанием и подзаряжает аккумуляторную батарею (рис. 4). Электрические характеристики схемы электропитания определялись с использованием методики UNAVCO (University NAVSTAR Consortium, США) [11].

Данные измерений из внутренней памяти приемника GPS и MR-107 каждые сутки считываются оператором по сети Интернет с помощью программ удаленного доступа Supremo и AnyDesk. В процессе первичной обработки суточные файлы измерений GPS конвертируются из внутреннего формата T01 в независимый формат RINEX 2.11 и далее поступают на вторичную обработку в геодинимический пакет программ GAMIT v. 7 под управлением операционной системы Linux [12]. Полученные после обработки данные, содержащие координаты приемной антенны СГП с точностью 2–3 мм по горизонтали и 6–8 мм по высоте, передаются в среду операционной системы Windows. Вторичная обработка завершается с помощью пакета программ (на языке Matlab), разработанного в ЮНЦ РАН. На рисунке 5 представлены графики вариаций объемной активности радона с периодом измерений 1 час и суточные значения высоты GPS-пункта в марте – апреле 2022 г.



**Рис. 5.** Нормированные значения вариаций объемной активности радона-222 (темная диаграмма) и высоты (ломаная линия) на СГП Порт-Кавказ в марте – апреле 2022 г.  
**Fig. 5.** Normalized values of radon-222 volumetric activity variations (dark diagram) and height (broken line) at the Port-Caucasus SGS in March – April 2022.

## ВЫВОДЫ

1. Комплексный автономный спутниковый геодинимический пункт Порт-Кавказ, установленный в районе транспортного перехода через Керченский пролив, дает возможность осуществлять мониторинг геодинимической активности глубинного Керченского разлома, который, по данным исторических записей, может генерировать землетрясения силой до 9 баллов.

2. Представляется целесообразной установка нескольких геодинимических пунктов такого типа на побережье Керченского полуострова для измерения деформаций земной коры с дальнейшей обработкой полученной информации методом блочного элемента с целью прогноза вероятных сейсмических событий.

3. Технология и опыт создания СГП Порт-Кавказ могут быть использованы при создании сети аналогичных автономных СГП в труднодоступных местах, где нет электропитания.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания Южного научного центра Российской академии наук «Исследование сложных природных и техногенных процессов с применением метода блочного элемента», № государственной регистрации проекта 122020100341-0, и контракта АО «Южморгеология» № 01/2018-04-ЮРЦ (03) «Ведение наблюдений за геофизическими и газогидрогеохимическими полями в пределах Азовской, Черноморской и Каспийской прибрежных зон Северо-Кавказского сейсмоактивного региона».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазырин Е.А. 2017. Основные результаты изучения подводного грязевого вулканизма Керченско-Таманского региона. В кн.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том X. Часть 2.* М., ИИЕТ РАН: 39–48.
2. Popkov V.I., Fomenko V.A., Glazyrin E.A., Popkov I.V. 2013. A catastrophic tectonic event in summer 2011 in the Taman Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 448(2): 172–174. doi: 10.1134/S1028334X13020207
3. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. 2014. *Эндеогенные опасности Большого Кавказа.* М., ИФЗ РАН: 256 с.
4. СП 14.13330.2018. *Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП 11-7-81.* 2018. М., Стандартинформ: 122 с.
5. Смирнова М.Н. 2001. Глубинное строение, геодинимика и нефтегазоносность Керченско-Таманской кольцевой структуры. В кн.: *Современные проблемы геологии нефти и газа.* М., Институт геологии: 32–41.
6. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. 2007. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. *Физика Земли*. 7: 31–45.
7. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure and Applied Geophysics*. 117(5): 1025–1044. doi: 10.1007/BF00876083
8. Чернов Ю.К. 2004. *Разработка комплексной методики оценки вероятных сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска (на примере районов Северного Кавказа и Сахалина).* Отчёт о НИР. Ставрополь, Госстрой РФ: 251 с.
9. Бабешко В.А., Калинин В.В., Шестопалов В.Л., Шереметьев В.М. 2016. Технологии геодинимического мониторинга района транспортного перехода через Керченский пролив. *Наука Юга России*. 12(1): 22–31.
10. Бабешко В.А., Шестопалов В.Л., Юбко В.М., Глазырин Е.А. 2016. Характер движений поверхности земной коры по дан-

ным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации. *Наука Юга России*. 12(4): 33–40.

11. Calculations for Solar Arrays and Battery Backup. *UNAVCO*. URL: <https://kb.unavco.org/kb/article.php?id=463> (дата обращения: 20.05.2022).
12. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. 2018. *GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.7.* Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology: 168 p.

## REFERENCES

1. Glazyrin E.A. 2017. [The main results of studying the underwater mud volcanism of the Kerch-Taman region]. In: *Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. Tom X. Chast' 2.* [Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus. Vol. X. Part 2]. Moscow, S.I. Vavilov Institute of the History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences: 39–48. (In Russian).
2. Popkov V.I., Fomenko V.A., Glazyrin E.A., Popkov I.V. 2013. A catastrophic tectonic event in summer 2011 in the Taman Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 448(2): 172–174. doi: 10.1134/S1028334X13020207
3. 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).
4. СП 14.13330.2018. *Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 11-7-81.* [Building in seismic areas. Revised edition of SNiP 11-7-81]. 2018. Moscow, Standartinform: 122 p. (In Russian).
5. Smirnova M.N. 2001. [Deep structure, geodynamics and oil and gas content of the Kerch-Taman ring structure]. In: *Sovremennyye problemy geologii nefiti i gaza.* [Modern problems of oil and gas geology]. Moscow, Institute of Geology: 32–41. (In Russian).

6. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. 2007. Assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 43(7): 559–572. doi: 10.1134/S1069351307070051
7. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure and Applied Geophysics*. 117(5): 1025–1044. doi: 10.1007/BF00876083
8. Chernov Yu.K. 2004. *Razrabotka kompleksnoy metodiki otsenki veroyatnykh seismicheskikh vozdeystviy, seismicheskoy opasnosti i seismicheskogo riska (na primere rayonov Severnogo Kavkaza i Sakhalina). Otchet o NIR. [Development of a complex estimation technique of probable seismic influences, seismic danger and seismic risk (on the example of areas of the Northern Caucasus and Sakhalin). The report on scientific work]*. Stavropol, Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation: 251 p. (In Russian).
9. 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).
10. 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).
11. Calculations for Solar Arrays and Battery Backup. *UNAVCO*. Available at: <https://kb.unavco.org/kb/article.php?id=463> (accessed 20 May 2022).
12. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. 2018. *GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.7*. Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology: 168 p.

*Поступила 15.05.2022*