

АНАЛИЗ И МОНИТОРИНГ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНОВ С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА

А.И. Маневич

¹ Геофизический центр РАН, Москва

Аннотация: При оценке геодинамического состояния различных по степени тектонической активности районов необходима корректная оценка деформаций земной коры. Один из методов исследования деструкции земной коры – это постановка наблюдений глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). Использование ГНСС наблюдений за современными движениями земной коры позволяет собирать наиболее достоверные данные на разных масштабных уровнях (локальном или региональном). Анализ данных о деформациях земной поверхности позволяет получать фундаментальные знания о геодинамическом режиме исследуемого региона или локальной области и оценивать инженерное состояние природно-технических систем. Цель настоящего исследования – разработка и апробация методики анализа скоростей деформации земной поверхности с учетом масштабного эффекта для локальных геодинамических полигонов. В задачи работы входило: создание каталога данных скоростей деформации; выполнение анализа деформаций с учетом их пространственной масштабируемости; оценка перспектив применения полученных результатов. В работе исследовался эффект уменьшения скоростей деформаций и их производных с увеличением дистанции между пунктами наблюдений. Представлена процедура расчетов, приведены полученные распределения и регрессионные зависимости скоростей деформаций. По выявленным обобщенным зависимостям можно априорно оценивать деформационный режим на геодинамическом полигоне (либо уточнять степень тектонической активности, либо прогнозировать аномально возможные деформации).

Ключевые слова: деформация земной поверхности, деформации, масштабный эффект, современные движения земной коры, СДЗК, ГНСС, GPS/ГЛОНАСС, локальный геодинамический полигон.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Минобрнауки России.

Для цитирования: Маневич А.И. Анализ и мониторинг скоростей деформаций земной поверхности локальных геодинамических полигонов с учетом масштабного эффекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6-1. – С. 194–203. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-194-203.

Analysis and monitoring modern Earth's surface deformation velocity for local geodynamic polygons with scale effect

A.I. Manevich

¹ Geophysical center RAS, Moscow, Russia

Abstract: For assessing the geodynamic state of areas with different tectonic activity it is necessary to correctly assess the deformations of the Earth's crust. One of the methods to study the destruction of the Earth's crust is to make observations using global navigation satellite systems (GNSS). The use of GNSS to observe the current movements of the Earth's crust makes it possible to collect the most reliable data at different scales (local or regional). The analysis of data on the Earth's surface deformations allows obtaining fundamental knowledge about the geodynamic regime of the region or local area under study and assessing the engineering state of natural and technical systems. The purpose of this study is to develop and test a method for analyzing the deformation rates of the Earth's surface, taking into account the scale effect on local geodynamic polygons. The tasks of the work included: creation of a catalogue of deformation velocity data; deformation analysis taking into account their spatial scalability; assessment of the prospects of application of the obtained results. The effect of deformation rates reduction and their derivatives with increasing distance between observation points was investigated. The paper presents the calculation procedure, obtained distributions and regression dependencies of strain rates. Based on the revealed generalized dependencies, it is possible to a priori evaluate the deformation regime on the geodynamic test site (either to specify the degree of tectonic activity or to predict abnormally possible deformations).

Key words: Earth's surface deformation, deformation, scale effect, modern Earth's crust movements, GNSS, GPS/GLONASS, local geopolygon.

Acknowledgements: This work was conducted in the framework of budgetary funding of GC RAS, adopted by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Manevich A.I. Analysis and monitoring modern Earth's surface deformation velocity for local geodynamic polygons with scale effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6-1):194-203. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-194-203.

Введение

При проектировании и эксплуатации площадок размещения радиационно опасных объектов необходимо выполнение работ по оценке долговременной и текущей геодинамической опасности. Обоснование геодинамической безопасности радиационно опасных объектов регулируется серией нормативных документов как Международного агентства по атомной энергии, так и Ростехнадзора. Геодинамические аспекты обоснования долговременной безопасности неразрывно связаны с исследованием современных движений земной коры, смещений и деформаций земной поверхности. Один из методов исследования деструкции земной коры — это постановка наблюдений глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). Методика сбора и высокоточной обработки наблюдений, а также программа

наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК) в районе Нижнеканского массива была разработана на базе лаборатории геодинамики ГЦ РАН [1–4]. Изучение характеристик современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры, обусловленных тектоническими процессами на площадках радиационно опасных объектов, необходимо для:

- выявления активных тектонических структур;
- определения количественных параметров и направленности движений в зоне тектонических разрывов и границ структурных блоков;
- определения скоростей деформаций породного массива для прогноза эволюции изоляционных свойств геологической среды;
- задания граничных условий в математических моделях напряженно-деформированного состояния пород;

– определения степени сейсмической опасности.

В работе [1] был выполнен анализ современной нормативной базы Ростехнадзора и рекомендаций МАГАТЭ по изучению современных движений и деформаций земной коры. Во всех документах регламентируется учет скорости горизонтальных и вертикальных современных тектонических смещений и градиент скорости неотектонических, четвертичных и современных движений земной коры (скорость деформации) [5]. В документе НП-064–17 [6] приводятся численные значения для оценки возможного воздействия на площадку объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) современных дифференцированных движений земной поверхности (табл. 1), которые должны измеряться инструментально (не геологическими методами).

В нормативе, приведенном выше, используются значения деформаций без учета их пространственной масштабируемости. Особенность учета масштабного эффекта заключается в том, что нормативные значения

опасных деформаций на геодинамических полигонах указываются вне привязки к расстоянию или площади, на которую нормируется смещение. Таким образом, нормативная опасная деформация для разных дистанций или площадей может оказаться либо недостаточно высокой, либо, наоборот, слишком завышенной (пример см. рис. 1).

Методы исследований и данные

Масштабный эффект деформаций земной поверхности последовательно рассматривался в работах [7–10]. В качестве исследуемого параметра пространственных особенностей скоростей горизонтальных СДЗК была выбрана скорость относительного изменения дистанции (расстояния между двумя точками на поверхности сферы) между геодезическими пунктами:

$$\varepsilon' = \varepsilon / T, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \Delta L / L$ – относительное изменение длины L между пунктами за временной интервал T между двумя точками наблюдений.

Таблица 1

Деформации земной поверхности, изменение напряжённого состояния грунтов основания [6]
Deformation Earth's surface, changes the stress state of the soils under the stones [6].

№	Значения параметров, согласно которым осуществляется классификация степеней опасности ¹	Степень опасности по последствиям воздействия на ОИАЭ
1	Геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности 10^{-5} 1/год и выше	I
2	Геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности от 10^{-8} до 10^{-5} 1/год и выше	II
3	Геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности менее 10^{-8} 1/год	III

¹ Значения параметров соответствуют вероятности 10^{-4} и выше для факторов природного происхождения и вероятности 10^{-6} и выше для факторов техногенного происхождения.

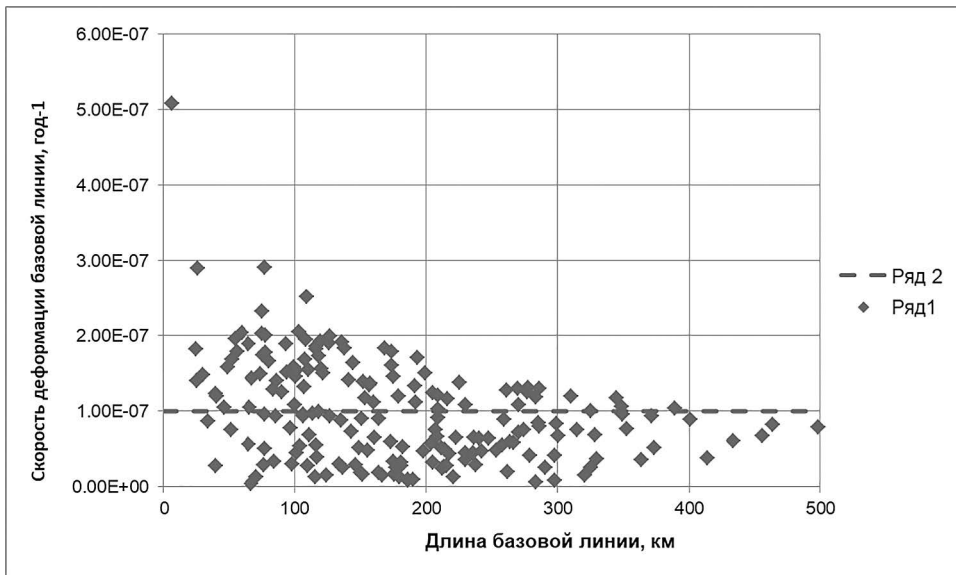


Рис. 1. Пример нормативной опасной деформации и реальной кривой деформации в зависимости от дистанции нормирования: ряд 1 — измеренные значения; ряд 2 — нормативная скорость опасной деформации, принятая $\epsilon' = 1 \times 10^{-7}$ (год⁻¹)

Fig. 1. An example of normative hazardous strain and real strain curve depending on the normalization distance: row 1 — measured values; row 2 — normative strain rate of dangerous strain, adopted by $\epsilon' = 1 \times 10^{-7}$ (year⁻¹)

Таблица 2

Критерии оценки предельной величины скорости деформации с учетом пространственной масштабируемости

Criteria for assessment of maximum value of deformation rate taking into account spatial scalability

№	Площадной масштаб	Размеры, м	Скорость деформаций, год ⁻¹
1	Район	$L_3 = 3 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^4$ м	$ \epsilon_3 = 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-7}$
2	Площадка	$L_2 = 3 \cdot 10^3 \div 10^4$ м	$ \epsilon_2 = 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-6}$
3	Приконтурная часть массива	$L_1 = 1 \div 10^2$ м	$ \epsilon_1 = 10^{-3} \div 10^{-4}$

Результатом этих работ стало расширение «критериев для оценки скоростей деформаций по данным наблюдений за современными движениями земной коры на основе данных ГНСС», приведенных в приложении №4 [5] (табл. 2). Данная таблица дает дифференциацию оценки деформаций по степени их линейных размеров (масштабы района, площадки, приконтурной части массива) в первом приближении.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что в документах недостаточно четко определены количественные критерии районирования территории по степени опасности для скоростей горизонтальных движений. Следовательно, задачи мониторинга СДЗК в районах размещения радиационно опасных объектов должны включать в себя не только инструментальные измерения, но оценку и анализ деформаций с точки зрения их опасности

и развития геодинамического режима района. Однако невозможно выработать деформационные критерии состояния исследуемого района, основываясь только на измерениях в рамках одного полигона. Для этого был создан каталог данных деформаций на различных геодинамических полигонах (рис. 2 и табл. 3) и обработан по методике, изложенной в работе [11], суть которой сводится к следующему:

- Расчет скорости относительного изменения дистанции между пунктами измерения (1);

- Распределение данных на выборки по степеням тектонической активности (активные, умеренно-активные, слабо-активные);

- Расчет разделяющей границы скоростей деформации (как среднее значение скорости деформации по окну в $k = 20$ значений), рис. 3;

- Разделение деформаций внутри своей группы на значения выше и ниже

разделяющей границы (повышенные и пониженные);

- Вычисление обобщенных регрессионных уравнений для повышенных, пониженных и средних значений скоростей деформации.

Результаты вычислений

В результате был получен набор уравнений регрессии, отражающих повышенные, пониженные и осредненные скорости деформаций в районах тектонически активных, умеренно-активных и слабоактивных. На рис. 4 приведен график усредненных скоростей деформации между парами пунктов наблюдений (одномерная скорость деформации), рассчитанный по данным с разнообразных геодинамических полигонов мира (табл. 3). На графике отображены отдельно скорости деформаций сжатия и растяжения в зависимости от расстояния между пунктами наблюдений, уравнения регрессионных кривых приведены в табл. 4.

Таблица 3¹

Список полигонов и ссылок на данные, которые были использованы в анализе

List of polygons and references to the data that were used in the analysis

№	Полигон	Ссылка	Степень тектонической активности ²
1	Тянь-Шань и Памир	[12]	Умеренно-активный
2	Southern_California Network	[13]	Активный
3	Нижнеканский массив	[3]	Слабоактивный
4	CentralUS Network	[13]	Слабоактивный
5	Байкало-Монгольская зона	[14]	Умеренно-активный
6	Приладожье, юго-восток Балтийского щита (Карелия)	[15]	Слабоактивный
7	East African Rift System (Nubia)	[16]	Умеренно-активный
8	Southern part of the Korean Peninsula (Южная Корея)	[17]	Умеренно-активный
9	Осетинская часть Большого Кавказа	[18]	Умеренно-активный
10	Турция (Анатолийский разлом)	[19]	Умеренно-активный
11	Alaska Network	[13]	Активный
12	Бразилия, Анды	[20]	Активный
13	Бразилия, Платформа	[20]	Слабоактивный

¹ 1 — активные (зоны границ литосферных плит); 2 — умеренно-активные (активные внутриплитные процессы); 3 — слабоактивные (платформенные геоструктуры).



Рис. 2. Геодинамические полигоны
Fig. 2. Geodynamic polygons

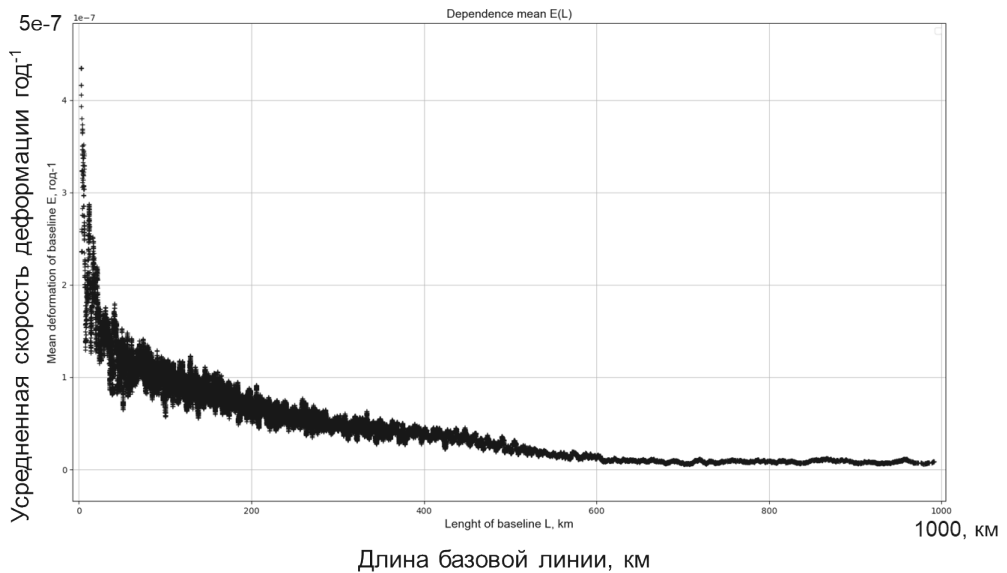


Рис. 3. Пример расчета разделяющей границы скоростей деформации (как среднее значение скорости деформации ϵ')
Fig. 3. Example of calculating the separating strain rate boundary (as the average strain rate value ϵ')

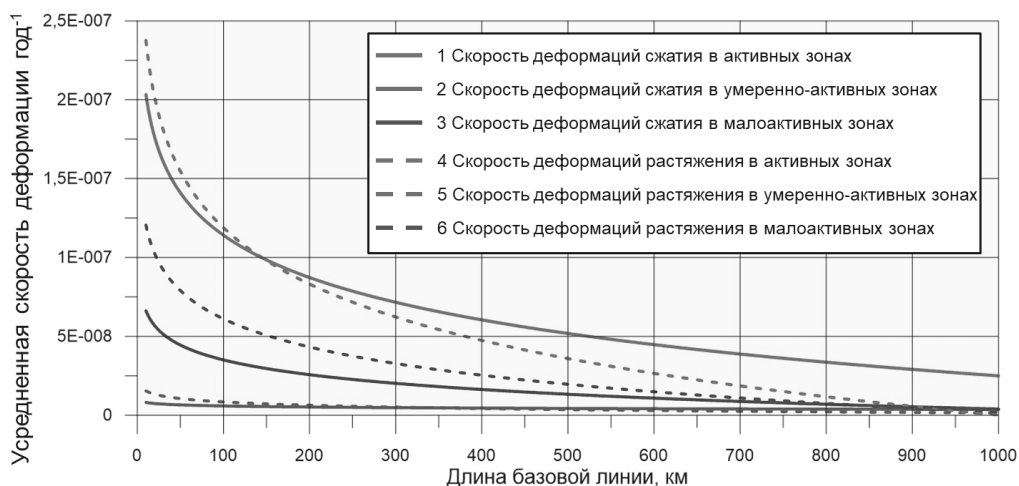


Рис. 4. График осредненных скоростей деформации: 1 – сжатие в активных районах; 2 – сжатие в умеренно-активных районах; 3 – сжатие в малоактивных районах; 4 – растяжение в активных районах; 5 – растяжение в умеренно-активных районах; 6 – растяжение в малоактивных районах

Fig. 4. Average strain velocity graph: 1 – compression in active areas; 2 – compression in moderately active areas; 3 – compression in inactive areas; 4 – stretching in active areas; 5 – stretching in moderately active areas; 6 – stretching in low-active areas

Таблица 4

Регрессионные зависимости осредненных скоростей деформаций от длины базовой линии для кривых, приведенных на рис. 4

Regression dependencies of average strain rates on the length of the baseline for the curves shown in Fig. 4

№	Районы	Уравнение
1	Сжатие в активных районах	$\epsilon = -3,872 \cdot 10^{-8} \ln(L) + 2,925 \cdot 10^{-7}$
2	Сжатие в умеренно-активных районах	$\epsilon = -1,354 \cdot 10^{-8} \ln(L) + 0,975 \cdot 10^{-7}$
3	Сжатие в малоактивных районах	$\epsilon = -9,756 \cdot 10^{-10} \ln(L) + 1,043 \cdot 10^{-8}$
4	Растяжение в активных районах	$\epsilon = -5,154 \cdot 10^{-8} \ln(L) + 3,563 \cdot 10^{-7}$
5	Растяжение в умеренно-активных районах	$\epsilon = -2,58 \cdot 10^{-8} \ln(L) + 1,8 \cdot 10^{-7}$
6	Растяжение в малоактивных районах	$\epsilon = -3,04 \cdot 10^{-9} \ln(L) + 2,25 \cdot 10^{-8}$

Полученные уравнения могут быть полезны в априорной оценке геодинамического режима района. Определив по обобщенным геологическим условиям района группу тектонической активности района, можно выбрать соответствующее регрессионное уравнение и сопоставить скорости деформаций, расчетные и измеренные инструментально на различных длинах базисных линий. Сопоставление

покажет к какому уровню деформаций, характерных для выбранного по степени тектонической активности района относятся измеренные деформации (к повышенным, средним, пониженным значениям).

Заключение

Результаты экспериментальных расчетов деформаций земной поверхности для различных по степени геодинамиче-

ской активности районов мира позволили выявить экспоненциальные зависимости осредненных скоростей деформаций от длин базовых линий. Общие закономерности изменений значений деформаций земной поверхности однозначно связаны со степенью геодинамической активности изучаемого района. Регрессионные зависимости дают возможность количественной оценки осредненных

скоростей деформаций от длины базовой линии в зависимости от степени геодинамической активности района.

Полученные регрессионные зависимости были получены на основе данных с 14 геодинамических полигонов мира. Полученные результаты могут быть использованы при оценке и выявлении опасных деформаций на геодинамических полигонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринев В.Н.* Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // *Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса.* — 2019. — №1. — С. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-83-94.
2. *Татаринев В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринова Т.А.* Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // *Радиоактивные отходы.* — 2019. — № 1 (6). — С. 77–89.
3. *Татаринев В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И.* Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений // *Геофизические исследования.* — 2018. — Т. 19. — № 4. — С. 64–79, DOI: 10.21455/gr2018.4–5.
4. *Kaftan V., A. Melnikov.* Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data, *Russian Journal of Earth Science.* — 2016. — ES3001. DOI:10.2205/2016ES000568.
5. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях» 2018. РБ-019–18.
6. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии». 2017. НП-064–17.
7. *Гусева Т.В., Мишин А.В., Сквородкин Ю.П.* Современные горизонтальные движения на разных масштабных уровнях // *Физика Земли.* — 1996. — №12. — С. 86–91.
8. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // *Физика Земли.* — 2019. — № 1. — С. 78–103. DOI: 10.31857/S0002–33372019178–103.
9. *Татаринев В.Н., Бугаев Е.Г., Татаринова Т.А.* Оценка деформаций земной коры по данным спутниковых наблюдений при обосновании безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов // *Горный журнал.* — 2015. — №10. — С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.05.
10. *Коновалова Ю.П.* Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования // *Известия вузов. Горный журнал.* — 2018. — №6. — Сс. 6 – 17. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-6-17.
11. *Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S.* Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // *Eurasian mining.* — 2019. — no. 2. — pp. 19–22. DOI: 10.17580/em.2019.02.03.
12. *Zubovich A.V., Wang X., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R.T.,* GPS velocity field

for the Tien Shan and surrounding regions // *Tectonics*. — 2010. — Vol. 29. — TC6014. DOI:10.1029/2010TC002772.

13. Murray J.R., Svarc J. Global Positioning System data collection, processing, and analysis conducted by the U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program // *Seismological Research Letters*. — 2017. — Vol. 88. — Iss. 3. DOI:10.1785/0220160204.

14. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // *Геология и геофизика*. — 2010. — Т. 51. — № 7. — С. 1006–1017.


15. Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Девяткина А.С. Оценка влияния современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья (юго-восток Балтийского щита) // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2017. — Т. 8. — № 4. — С. 791–807. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0317.

16. Déprez A., Doubre C., Masson F., Ulrich P. Seismic and aseismic deformation along the East African Rift System from a reanalysis of the GPS velocity field of Africa // *Geophysical Journal International*. — 2013. — Vol. 3. — Iss. 193. — p.1353–1369.

17. Shuanggen J., Li Z., Park P.H. Seismicity and GPS constraints on crustal deformation in the southern part of the Korean Peninsula // *Geosciences Journal*. — 2006. — Vol. 10. — No. 4. — p. 491–497.

18. Милюков В.К., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Шевченко В.И., Кусраев А.Г., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М. Современные горизонтальные движения основных элементов тектонической структуры осетинской части Большого Кавказа по GPS измерениям // *Физика Земли*. — 2015. — №4. — С. 68–80.

19. Tiryakioğlu I., Özkaymak C., Baybura T., Sözbilir H., Uysal M. Comparison of palaeostress analysis, geodetic strain rates and seismic data in the western part of the Sultandağı fault in Turkey // *Annals of geophysics*. — 2018. — Vol. 61. — No. 3. DOI: 10.4401/ag-7591

20. Drewes H. and Sánchez L. Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017 Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut DGFI-TUM, IGS RNAAC SIRGAS 

REFERENCES

1. Kaftan V.I., Gvishiani A.D. Morozov V.N., Tatarinov V.N. Methods and results of determination of movements and deformations of the Earth's crust according to GNSS data at the Nizhne-Kansk geodynamic test network in the area of radioactive waste disposal. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya iz kosmosa*. 2019. no. 1. pp. 83–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-83-94. [In Russ]

2. Tatarinov V.N., Morozov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I., Tatarinova T.A. Underground Research Laboratory: Problems of Geodynamic Research. *Radioaktivnye othody*. 2019. no. 1 (6). pp. 77–89. [In Russ]

3. Tatarinov V.N., Morozov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I. Modern geodynamics of the southern of the Yenisei ridge derived from the results of satellite observations. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2018. T. 19. no. 4. pp. 64–79. DOI: 10.21455/gr2018.4–5. [In Russ]

4. Kaftan V., A. Melnikov. Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data. *Russian Journal of Earth Science*. 2016. ES3001. DOI:10.2205/2016ES000568.

5. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoj energii «Ocenka iskhodno j sejsmichnosti rajona i ploshchadki razmeshcheniya ob'ekta ispol'zovaniya atomnoj energii pri inzhenernyh izyskaniyah i issledovaniyah» 2018. RB-019–18. [In Russ]

6. Federal'nye no. rmy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomno j energii «Uchet vneshnih vozdeystvij prirodnoho i tekhnogennogo proiskhozhdeniya na ob'ekty ispol'zovaniya atomno j energii». 2017. NP-064–17. [In Russ]

7. Guseva T.V., Mishin A.V., Skovorodkin Yu.P. Modern horizontal movements at different scale levels. *Fizika Zemli*. 1996. no. 12. pp. 86–91. [In Russ]

8. Kuz'min Yu.O. Recent geodynamics: from crustal movements to monitoring critical objects. *Fizika Zemli*. 2019. no. 1. pp. 78–103. DOI: 10.31857/S0002-33372019178-103. [In Russ]
9. Tatarinov V.N., Bugaev E.G., Tatarinova T.A. Crust deformation assessment by satellite observation data in the context of validation program for safe geological radioactive waste disposal and isolation. *Gornyj zhurnal*. 2015. no. 10. pp. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.05. [In Russ]
10. Konovalova Yu.P. Features of accounting for geodynamic factors when choosing safe sites for responsible subsoil use facilities. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2018. no. 6. pp. 6–17. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-6-17. [In Russ]
11. Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation and malies with regard to spatial scale effect. *Eurasian mining*. 2019. no. 2. pp. 19–22. DOI: 10.17580/em.2019.02.03.
12. Zubovich A.V., Wang X., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.W., Hager B.H., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R.T., GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. *Tectonics*. 2010. Vol. 29. TC6014. DOI:10.1029/2010TC002772.
13. Murray J.R., Svarc J. Global Positioning System data collection, processing, and analysis conducted by the U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program. *Seismological Research Letters*. 2017. Vol. 88. Iss. 3. DOI:10.1785/0220160204.
14. Luhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Kale E. Rotations and deformations of the earth's surface in the Baikal-Mongolian region according to GPS measurements. *Geologiya i geofizika*. 2010. T. 51. no. 7. pp. 1006–1017. [In Russ]
15. Agibalov A.O., Zajcev V.A., Sencov A.A., Devyatkina A.S. Assessment of the influence of modern crustal movements and the recently activated precambrian structural plan on the relief of the lake Ladoga region (the southeastern Baltic shield). *Geodinamika i tektonofizika*. 2017. T. 8. no. 4. pp. 791–807. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0317. [In Russ]
16. Déprez A., Doubre C., Masson F., Ulrich P. Seismic and aseismic deformation along the East African Rift System from a reanalysis of the GPS velocity field of Africa. *Geophysical Journal International*. 2013. Vol. 3. Iss. 193. pp. 1353–1369.
17. Shuanggen J., Li Z., Park P.H. Seismicity and GPS constraints on crustal deformation in the southern part of the Korean Peninsula. *Geosciences Journal*. 2006. Vol. 10. no. 4. pp. 491–497.
18. Milyukov V.K., Mironov A.P., Steblou G.M., Shevchenko V.I., Kusraev A.G., Drobyshev V.N., Hubaev H.M. Modern horizontal movements of the main elements of the tectonic structure of the Ossetian part of the Greater Caucasus by GPS measurements. *Fizika Zemli*. 2015. no. 4. pp. 68–80. [In Russ]
19. Tiryakioğlu I., Özkaymak C., Baybura T., Sözbilir H., Uysal M. Comparison of palaeostress analysis, geodetic strain rates and seismic data in the western part of the Sultandağı fault in Turkey. *Annals of geophysics*. 2018. Vol. 61. no. 3. DOI: 10.4401/ag-7591.
20. Drewes H. and Sánchez L. Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017 Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut DGF-TUM, IGS RNAAC SIRGAS.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Маневич Александр Ильич — научный сотрудник лаборатории геодинимики, Геофизический центр Российской Академии Наук. 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д. 3, e-mail: ai.manevich@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Manevich A.I., researcher, laboratory of geodynamics, Geophysical Center Russian Academy of Sciences. 119296, Moscow, st. Molodezhnaya, 3, e-mail: ai.manevich@yandex.ru, Russia.

Получена редакцией 11.03.2020; получена после рецензии 06.04.2020; принята к печати 20.05.2020.
Received by the editors 11.03.2020; received after the review 06.04.2020; accepted for printing 20.05.2020.