Оценка стабильности опорных пунктов как основы для геодинамического мониторинга

Панжин А. А.^{1*}, Панжина Н. А.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: panzhin@igduran.ru

Реферат

Введение. Статья посвящена вопросу выбора опорных (исходных) пунктов как основы для геодинамического мониторинга. При этом мониторинг может быть как региональным, например Уральского региона, так и локальным, охватывающим группу месторождений и вмещающий массив.

Актуальность. Поскольку массив имеет иерархически блочную структуру и постоянную подвижность, вызванную суммарным воздействием естественных и техногенных факторов, выбор опорных пунктов, свободных от влияния деформационных процессов, является актуальной проблемой.

Идея работы. Для фактической оценки пространственно-временной стабильности опорных пунктов предлагается выполнять их геодезическую привязку к глобальным сетям IGS мониторинга с последующим анализом скоростей и направлений их собственных сдвижений относительно соседних пунктов.

Методология. На основании полученных данных выявляются наиболее стабильные опорные пункты, их скорости и направления пространственных сдвижений сопоставляются с модельными в системе ITRF2014, при этом устраняется фоновая составляющая.

Результаты. Определены фактические векторы сдвижений ряда пунктов геодезической сети IGS и ФАГС и базового пункта административно-бытового комплекса. По результатам серии землетрясений в районе города Катав-Ивановск выполнены исследования НДС массива.

Выводы. Показано использование предложенного способа оценки пространственно-временной стабильности опорных геодезических пунктов как основы для геодинамического мониторинга.

Ключевые слова: геодинамический мониторинг; опорные пункты; вектор сдвижения; иерархически блочная структура; деформации.

Введение. При контроле процесса сдвижения на горнодобывающих предприятиях одним из основных вопросов является выбор и обоснование методики инструментальных измерений. Ключевой проблемой при этом является выбор опорных (исходных) пунктов, пространственное положение которых остается неизменным на весь период мониторинговых наблюдений и свободно от влияния деформационных процессов как естественного (криповые подвижки), так и техногенного (процессы, сопровождающие разработку месторождения) происхождения [1].

Иерархически блочная структура породного массива в условиях нарушения межблочных связей и деформирования среды по границам структурных блоков во многом предопределяет формирование в массиве горных пород напряженно-деформированного состояния (НДС):

- на высоких иерархических уровнях 1-го и 2-го порядков – глобальное поле напряжений геоблоков, реализующееся в виде подвижек тектонических плит;

- на малых уровнях (3-го и ниже порядков) – поле исходных напряжений геоблоков, являющихся вмещающей средой для месторождений полезных ископаемых, при этом масштабная добыча полезных ископаемых из недр Земли зачастую вызывает активизацию внутриплитных геодинамических процессов [2, 3].

Подвижки, вызванные суммарным воздействием естественных и техногенных факторов геодинамических процессов, достигают значительных величин [4].

Методология. Исследованиями в области современной геодинамики с применением современных методов GNSS (сеть IGS), VLBA (РСДБ) радиоинтерферометрии, лазерной космической дальнометрии, радиодальнометрии и др. достаточно подробно изучены движения литосферных плит [5], определены скорости и направления их движения, имеются инструменты для моделирования векторов движений. Пример подобного моделирования приведен на рис. 1.

Рис. 1. Модельные векторы сдвижений для восточной части территории России
Fig. 1. Model vectors of displacement for the Eastern part of Russia

При этом в основу моделей заложен равномерный характер распределения величин и направлений векторов смещений, смена азимутов их действия и амплитуд коррелирует с установленными границами литосферных плит [6]. При этом необходимо отметить, что исследования внутриплатформенных современных геодинамических движений в областях, считающихся асейсмичными, носят эпизодический характер [7].

Подобные работы для условий Уральского региона впервые отражены в [8], было отмечено, что векторы сдвижений во внутриплатформенной области имеют различные направления и амплитуды, вследствие чего Уфимский выступ Восточно-Европейской плиты движется на восток, вклиниваясь в Уральскую структуру,

что приводит к накоплению упругих напряжений на границах выступа, которые при своей разрядке могут вызвать достаточно сильные землетрясения.

Указанная работа не нашла своего продолжения, в том числе из-за высокой стоимости и трудоемкости полевых инструментальных измерений, тем не менее в [9] была высказана идея о возможности использования пунктов постоянно действующих GNSS станций (CORS) и опорных реперов наблюдательных станций для исследования современной геодинамики Уральского региона (рис. 2).

Рис. 2. Станции CORS и опорные реперы Уральского региона
Fig. 2. CORS stations and reference benchmarks of the Ural region

Для фактической оценки пространственно-временной стабильности опорных геодезических пунктов как основы для мониторинга деформационных процессов была проведена оценка устойчивости реперных пунктов в окрестностях Олимпиадинского месторождения и карьера «Восточный», которая проводилась с использованием архивных данных спутниковых геодезических наблюдений, выполненных в 2010, 2015 и 2017 гг. на базовой точке Олимпиадинского ГОКа.

Таблица 1. Результаты определения движений базового пункта АБК (Еруда) и пунктов постоянно действующих станций в глобальной системе координат ITRF2014
Table 1. The results of determining the displacements of the base point of temporary accommodation facilities (Eruda) and the points of regular stations in ITRF2014 global coordinates

Пункт	Координаты ITRF2014, В/Л				Сдвигения, Δмм/α°				Сдвигения, Δмм/сут			
	10.06.2010 (S0)	10.07.2015 (S1)	21.11.2017 (S2)		(S0)-(S1)	(S1)-(S2)	(S0)-(S2)		(S0)-(S1)	(S1)-(S2)	(S0)-(S2)	
ABK	59 53 28.83432N	59 53 28.83366N	59 53 28.83322N		132	57	188		0,071	0,066	0,069	
	82 54 34.16340E	92 52 59.80574E	92 52 59.80930E		99,0	104,0	100,5					
ARTU	56 25 47.35871N	56 25 47.35968N	56 25 47.36017N		131	62	193		0,071	0,072	0,071	
	58 33 37.65245E	58 33 37.65993E	58 33 37.66343E		77,0	76,0	76,5					
NRIL	69 21 42.59961N	69 21 42.59925N	69 21 42.59909N		114	52	165		0,061	0,060	0,061	
	88 21 35.22127E	88 21 35.23167E	88 21 35.23639E		95,5	95,5	95,5					
YAKT	62 01 51.45384N	62 01 51.45180N	62 01 51.45091N		115	53	168		0,062	0,061	0,062	
	129 40 49.09842E	129 40 49.10505E	129 40 49.10818E		123,0	121,0	122,5					
TIXI	71 38 04.10283N	71 38 04.10096N	71 38 04.10006N		100	45	144		0,054	0,052	0,053	
	128 51 59.12356E	128 51 59.13191E	128 51 59.13551E		125,5	128,5	126,5					
NOVM	55 01 49.80362N	55 01 49.80335N	55 01 49.80339N		128	67	195		0,069	0,077	0,072	
	82 54 34.16340E	82 54 34.17064E	82 54 34.17440E		94,0	89,0	92,0					
NOYA	63 11 09.10776N	63 11 09.10788N	63 11 09.10798N		126	56	183		0,068	0,065	0,067	
	75 26 56.22344E	75 26 56.23249E	75 26 56.23653E		88,5	87,0	88,0					
EKTR	56 52 39.20000N	56 52 39.20075N	56 52 39.20097N		148,0	59,0	207,0		0,080	0,068	0,076	
	60 40 53.94414E	60 40 53.95279E	60 40 53.95629E		81,0	83,5	81,5					
CP					120,9	56,0	176,6		0,065	0,065	0,064	
					100,4	100,1	100,2					

Результаты. В работе были использованы данные долговременных многочасовых измерений на базовой точке Олимпиадинского ГОКа для ее геодезической привязки к пунктам Международной геодезической сети IGS и пунктам ФАГС в глобальной системе координат ITRF2014 (рис. 3). Была выполнена точная геодезическая привязка базовой точки Олимпиадинского ГОКа к пунктам Международной геодезической сети IGS и пунктам ФАГС в глобальной системе координат ITRF2014, результаты которой приведены в табл. 1.

Рис. 3. Схема привязки базовой точки Олимпиадинского ГОКа к пунктам IGS

Fig. 3. The scheme of referencing Oymyakonsky GOK base point to IGS stations

Данный анализ выполнялся с целью определения устойчивости и исключения в дальнейших расчетах и построениях влияния собственных движений базового пункта административно-бытового комплекса (АБК), поскольку, как отмечается в ряде исследований, даже в асейсмичных областях выделяются зоны «суперинтенсивных деформаций», в которых пространственные координаты реперов могут изменяться в широких пределах [10].

Для определения абсолютных координат пункта АБК Олимпиадинского ГОКа и их изменений во времени использовались данные долговременных многочасовых измерений, выполненных непосредственно на пункте АБК, пунктах Международной геодезической сети IGS (Арти, Норильск, Якутск, Тикси, Новосибирск) и пунктах ФАГС (Екатеринбург, Ноябрьск) [11]. Для определения координат использовался сервис AUSPOS, полученные координаты пунктов в каждой серии (S0, S1 и S2) усреднялись, между сериями определялись сдвиги, азимут вектора сдвигов и скорости.

Полученные результаты анализировались в табличном (табл. 1) и графическом виде (рис. 4). Отмечается общая согласованность в сдвигах указанных пунк-

тов, без проявлений аномального характера деформирования [12]. Фактические параметры сдвижений пунктов сравнивались с модельными расчетами UNAVCO глобальных движений верхней части земной коры (рис. 1).

Разность скоростей современных геодинамических движений для исследуемого участка составляет 18,2 мм/год в направлении ΔN (север-юг), 22,2 мм/год в направлении ΔE (запад-восток) и 22,2 мм/год по ΔH (высота).

Рис. 4. Фактические векторы сдвижений пунктов Международной геодезической сети IGS, пунктов ФАГС и базового пункта АБК

Fig. 4. Actual vectors of displacements of IGS and FAGS stations and the base point of temporary accommodation facilities

Модельные скорости сдвижения пунктов в районе карьера «Восточный» составляют 26,3 мм/год, азимут вектора сдвижений – 91° , что достаточно хорошо коррелирует с фактическими данными: скорость сдвижений 26,3 мм/год, азимут вектора сдвижений – $100,5^\circ$. Небольшие расхождения модельных и фактических данных обусловлены скорее всего низкой плотностью на территории Сибири сети пунктов Международной геодезической сети IGS, данные которой используются UNAVCO для построения глобальной геодинамической модели движений верхней части земной коры. Таким образом, можно сделать вывод о стабильности долговременного неизменного положения базового пункта АБК в глобальной системе координат ITRF2014 и считать его устойчивым для последующих геодезических построений. С другой стороны, из табл. 2 видно, что имеется определенная несогласованность в направлениях и амплитудах векторов сдвижений, а также несоответствие фактических и модельных данных по их скоростям.

На втором этапе выполнялись аналогичные исследования для условий Южного Урала в связи с необходимостью диагностики НДС массива, изменение которого произошло в результате серии землетрясений в районе города Катав-Ивановск в сентябре 2018 г. Схема расположения ближайших к эпицентру землетрясения действующих GNSS станций Южного Урала и тектоническая

схема района приведены на рис. 5. Результаты определения скоростей современных геодинамических движений Южного Урала в системе ITRF-2014 приведены в табл. 3.

Для условий Южного Урала разность скоростей современных геодинамических движений составляет 6,2 мм/год в направлении ΔN (север-юг), 13,0 мм/год в направлении ΔE (запад-восток) и 1,9 мм/год по ΔH (высота). По сравнению с данными, полученными для территории северо-востока России, разности скоростей

Таблица 2. Скорости современных геодинамических движений, определенные для территории северо-востока России в глобальной системе координат
Table 2. The velocities of modern geodynamic movements defined for the Northeastern Russia in global coordinates system

Город	Сеть	Станция	ΔT, сут	ΔN, мм/год	ΔE, мм/год	ΔH, мм/год
Арти	IGS	ARTU	2721	6,0	45,5	0,2
Норильск	ФАГС	NRIL	2721	-2,1	62,7	2,1
Якутск	IGS	YAKT	2721	-12,1	40,5	2,0
Тикси	IGS	TIXI	2721	-11,5	49,5	1,2
Новосибирск	IGS	NOVM	2721	-1,0	45,6	16,8
Ноябрьск	ФАГС	NOYA	2721	0,9	54,3	-3,6
Екатеринбург	ФАГС	EKTR	2721	4,0	50,4	-0,1
Еруда	CORS	ABK	2721	-4,5	49,6	-2,6
Еруда	Модель UNAVCO			-3,4	26,0	

ITRF-2014. Составил А. А. Панжин, ИГД УрО РАН, 2018 г.

меньше в горизонтальной плоскости в 2–3 раза, по высоте – в 10 раз, однако при их сравнении необходимо также учитывать и масштабный фактор, с учетом которого приведенные разности скоростей будут значительно выше для локальных участков.

Таблица 3. Скорости современных геодинамических движений, определенные для территории Южного Урала в глобальной системе координат
Table 3. The velocities of modern geodynamic movements defined for the Southern Urals in global coordinates system

Город	Сеть	Станция	ΔT, сут	ΔN, мм/год	ΔE, мм/год	ΔH, мм/год
Б-Устькинское	CORS	BUST	733	7,4	45,5	-0,6
Фершампенуаз	CORS	FRSH	652	10,2	37,4	0,4
Иглино	CORS	IGLI	733	9,7	38,9	-1,5
Магнитогорск	CORS	MAGN	733	5,7	42,8	-0,6
Арти	IGS	ARTU	733	5,9	43,4	-1,1
Челябинск	CORS	CHEL	730	7,2	44,1	-0,2
Екатеринбург	ФАГС	EKRT	2721	4,0	50,4	-0,1

ITRF-2014. Составил А. А. Панжин, ИГД УрО РАН, 2018 г.

Выводы. Таким образом, экспериментально установлено, что предложенный способ оценки пространственно-временной стабильности опорных геодезических пунктов как основы для мониторинга деформационных процессов может быть использован в двух случаях.

Во-первых, при наличии на исследуемом участке долговременного пункта GNSS-сети, на котором возможно выполнение повторных измерений на большом пространственно-временном интервале. Отдельными экспериментами установлено, что для ослабления дисперсии временной промежуток должен составлять более года. При наличии нескольких серий измерений возможно сравнение азимутов и амплитуд криповых движений долговременного пункта GNSS-сети с целью определения характера его полного пространственного смещения (см. табл. 1 и рис. 4), который может быть как равномерным, так и невыдержанным.

Рис. 5. Тектоническая схема района и расположение ближайших к эпицентру землетрясения действующих GNSS-станций Южного Урала

Fig. 5. Tectonic map of the region and the location of currently operating Southern Ural GNSS stations nearest to the earthquake focus

Во-вторых, при оценке изменения напряженно-деформированного состояния массива на средних пространственно-временных базах, например Уральского региона, на основе анализа разности скоростей, азимутов и амплитуд криповых движений постоянно действующих GNSS-станций – определение направлений векторов сдвижений, тензоров деформаций и напряжений, установления характера движений (прямолинейный или ротационный), определения дифференциальных характеристик векторного поля (источника и стока деформационного поля).

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме № 0328-2019-0005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панжин А. А. Решение проблемы выбора опорных реперов при исследовании процесса сдвижения на объектах недропользования // Маркшейдерия и недропользование. 2012. № 2 (58). С. 51–54.
2. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. № 5. С. 87–101.
3. Sainoki A., Mitri H. S. Dynamic behavior of mining-induced fault slip // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2014. Vol. 66. P. 19–29.
4. Панжин А. А. Исследование сдвижений земной поверхности при разработке месторождений с применением площадных инструментальных методов // Известия вузов. Горный журнал. 2009. № 2. С. 69–74.
5. Yan Bao, Wen Guo, Guoquan Wang et al. Millimeter-accuracy structural deformation monitoring using stand-alone GPS // Journal of Surveying Engineering. 2017. Vol. 144. P. 242–251.
6. Yigit C. O., Coskun M. Z., Yavasoglu H. et al. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study // Measurement. 2016. Vol. 91. P. 398–404.
7. Кузьмин Ю. О. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // Вестник отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук Российской академии наук. 2002. № 1. С. 1–27.
8. Уткин В. И., Белоусова А. А., Тягунов Д. С., Баландин Д. В. Исследование геодинамики северного и среднего Урала по данным GPS // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431. № 2. С. 246–251.
9. Панжин А. А. Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса сдвижения на месторождениях Уральского региона // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2015. № 1 (49). С. 22–26.
10. Кузьмин Ю. О. Геодинамический мониторинг объектов недропользования // Гео-Сибирь. 2006. Т. 3. № 1. С. 33–42.
11. Вдовин В. С., Дворкин В. В., Карпик А. П. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 1. С. 6–27.
12. Kodama J., Miyamoto T., Kawasaki S. et al. Estimation of regional stress state and Young's modulus by back analysis of mining-induced deformation // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013. Vol. 63. P. 1–11.

Поступила в редакцию 18 февраля 2019 года

Сведения об авторах:

Панжин Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, ученый секретарь Института горного дела УрО РАН. E-mail: panzhin@igduran.ru

Панжина Наталия Александровна – младший научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород Института горного дела УрО РАН. E-mail: panzhina@bk.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-31-40

Evaluation of geodetic reference points stability as a basis for geodynamic monitoring

Andrei A. Panzhin¹, Nataliia A. Panzhina¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The article is dedicated to the choice of reference (source) points as a basis for geodynamic monitoring. Monitoring can be both regional, of the Ural region, for instance, and local, covering a group of deposits and an enclosing massif.

Relevance. As soon as a massif has got a hierarchical and blocky structure and constant mobility, caused by the total effect from natural and technogenic factors, the choice of reference points, which are free from the effect of strains, is a relevant problem.

The idea of the research. For actual estimate of the spatial-temporal stability of the reference points, it is proposed to establish a geodetic tie to the IGS global network with further analysis of velocities and directions of their proper movements relative to the neighboring points.

Methodology. Based on the obtained data, the most stable reference points are detected; their velocities and directions of spatial displacements are compared with the model ones in ITRF2014 system, the background being eliminated.

Results. Actual displacement vectors have been determined for a range of IGS and FAGS stations and the base point of temporary accommodation facilities. According to the outcome of a series of earthquakes in the neighborhood of the town of Katav-Ivanovsk, the stress-strain state of the massif has been examined.

Summary. The article reveals the way of applying the proposed method of spatial-temporal stability evaluation of geodetic reference points as a basis for geodynamic monitoring.

Key words: geodynamic monitoring; reference points; displacement vector; hierarchical and blocky structure; strains.

Acknowledgements: Research has been carried out under the government contract of IM UB RAS, theme no. 0328-2019-0005.

REFERENCES

1. Panzhin A. A. The solution of the problem of reference checkpoints selection during the research of the displacement process at subsoil management objects. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2012; 2 (58): 51–54. (In Russ.)
2. Kuzmin Iu. O. Recent geodynamics of dangerous faults. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016; 5: 87–101. (In Russ.)
3. Sainoki A., Mitri H. S. Dynamic behavior of mining-induced fault slip. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2014; 66: 19–29.
4. Panzhin A. A. Investigation of displacement of the earth's surface in deposits development applying areal instrumental methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2009; 2: 69–74. (In Russ.)
5. Yan Bao, Wen Guo, Guoquan Wang et al. Millimeter-accuracy structural deformation monitoring using stand-alone GPS. *Journal of Surveying Engineering*. 2017; 144: 242–251.
6. Yigit C. O., Coskun M. Z., Yavasoglu H. et al. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study. *Measurement*. 2016; 91: 398–404.
7. Kuzmin Iu. O. Recent anomalous geodynamics of aseismic fault zones. *Vestnik otdeleniia geologii, geofiziki, geokhimii i gornykh nauk Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the Department of Geology, Geophysics, Geochemistry and Mining of the Russian Academy of Science*. 2002; 1: 1–27. (In Russ.)
8. Utkin V. I., Belousova A. A., Tiagunov D. S., Balandin D. V. Study of geodynamics of the Northern and Middle Urals according to GPS. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 431 (2): 246–251. (In Russ.)
9. Panzhin A. A. Study of CORS geodynamic movements to substantiate control methods of the displacement process in deposits of the Ural region. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2015; 1 (49): 22–26. (In Russ.)
10. Kuzmin Iu. O. Geodynamic monitoring of subsoil assets. *Geo-Sibir = GEO-Siberia*. 2006; 3 (1): 33–42. (In Russ.)
11. Vdovin V. S., Dvorkin V. V., Karpik A. P. et al. Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT = Vestnik SSUGT*. 2018; 23 (1): 6–27. (In Russ.)
12. Kodama J., Miyamoto T., Kawasaki S. et al. Estimation of regional stress state and Young's modulus by back analysis of mining-induced deformation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013; 63: 1–11.

Received 18 February 2019

Information about authors:

Andrei A. Panzhin – PhD (Engineering), scientific secretary, Institute of Mining UB RAS.
E-mail: panzhin@igduran.ru

Nataliia A. Panzhina – senior researcher, Laboratory of Rocks Displacement, Institute of Mining UB RAS.
E-mail: panzhina@bk.ru

Для цитирования: Панжин А. А., Панжина Н. А. Оценка стабильности опорных пунктов как основы для геодинамического мониторинга // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 31–40. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-31-40

For citation: Panzhin A. A., Panzhina N. A. Evaluation of geodetic reference points stability as a basis for geodynamic monitoring. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 31–40 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-31-40