



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ДВИЖЕНИЙ
ГОРНЫХ ПОРОД НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Т. В. Лобанова, С. А. Лобанов

*Сибирский государственный индустриальный университет,
E-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru, ул. Кирова 42, г. Новокузнецк 654007, Россия*

Показана актуальность исследования короткопериодных смещений горных пород и оценки напряженно-деформированного состояния массива на удароопасных месторождениях. Изложена методика наблюдений с применением методов спутниковой геодезии. Приведены результаты непрерывного многочасового мониторинга сдвижения земной поверхности Таштагольского месторождения за период 2006–2020 гг. Выявлены особенности развития короткопериодных смещений при проявлении сейсмической активности массива горных пород в районе месторождения. Определена зависимость энергии сейсмических событий от скоростей короткопериодных смещений. Показана перспективность данного метода наблюдений на геодинамических полигонах для оценки сейсмической активности месторождений.

Геодинамический полигон, спутниковая геодезия, параметры короткопериодных смещений, энергия сейсмических событий

**STUDYING THE EFFECT OF SHORT-PERIOD ROCK DISPLACEMENTS
ON SEISMIC ACTIVITY OF DEPOSITS**

T. V. Lobanova and S. A. Lobanov

*Siberian State Industrial University,
E-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru, ul. Kirova 42, Novokuznetsk 654007, Russia*

The relevance of studying short-period rock displacements and estimating the stress-strain state of the rock mass in rockburst-hazardous deposits is shown. The observation procedure using satellite geodesy methods is set forth. The results of continuous hours-long monitoring the shear of the Earth's surface at the Tashtagol deposit for the period of 2006–2020 are presented. The features of the development of short-period displacements during seismic activity manifestation of the rock mass in the deposit area are revealed. The dependence of the energy of seismic events on the velocities of short-period displacements is determined. This observation method is prospective in geodynamic test sites to assess the seismic activity of deposits.

Geodynamic test site, satellite geodesy, parameters of short-period displacements, energy of seismic events

Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород и его изменения во времени является одной из важных задач при эксплуатации объектов недропользования, особенно в сейсмически активных регионах. Исследования последних десятилетий в области наук о Земле показали, что напряженно-деформированное состояние массива определяется двумя присущими ему свойствами — иерархически-блочной структурой и постоянной подвижностью, вызванной современными геодинамическими движениями [1]. Экспериментальное изучение геодинамических движений горных пород и земной поверхности стало возможным в связи с внедрением в практику проведения научных исследований методов спутниковой геодезии, которые позволили осуществлять непрерывный мониторинг процессов сдвижения горных пород в течение длительного времени и за короткие временные интервалы.

Впервые короткопериодные смещения были определены в ИГД УрО РАН [2] и продолжают до настоящего времени [3, 4]. С 2005 г. аналогичные исследования осуществлены в ВостНИГРИ на месторождениях Горной Шории [5], в период 2011–2020 гг. — в НИЦ “Геомеханика” СибГИУ. Наиболее представительные данные получены на Таштагольском железорудном месторождении, опасном по горным ударам, где мониторинг сейсмической активности ведется с 1987 г. Возможность сопоставления параметров короткопериодных смещений и энергии сейсмических событий (толчков) позволила изучить влияние короткопериодных движений на сейсмическую активность Таштагольского месторождения.

Методика наблюдений. Мониторинг короткопериодных движений осуществлялся методами спутниковой геодезии в полигоне, созданном на базе наблюдательной станции за сдвижением земной поверхности Восточного (ВУ), Северо-Западного (СЗУ) и Юго-Восточного (ЮВУ) участков месторождения с размещением пунктов наблюдения в наиболее благоприятных местах по условиям спутниковых наблюдений в районах разломов и тектонических нарушений в различных структурных блоках (рис. 1).

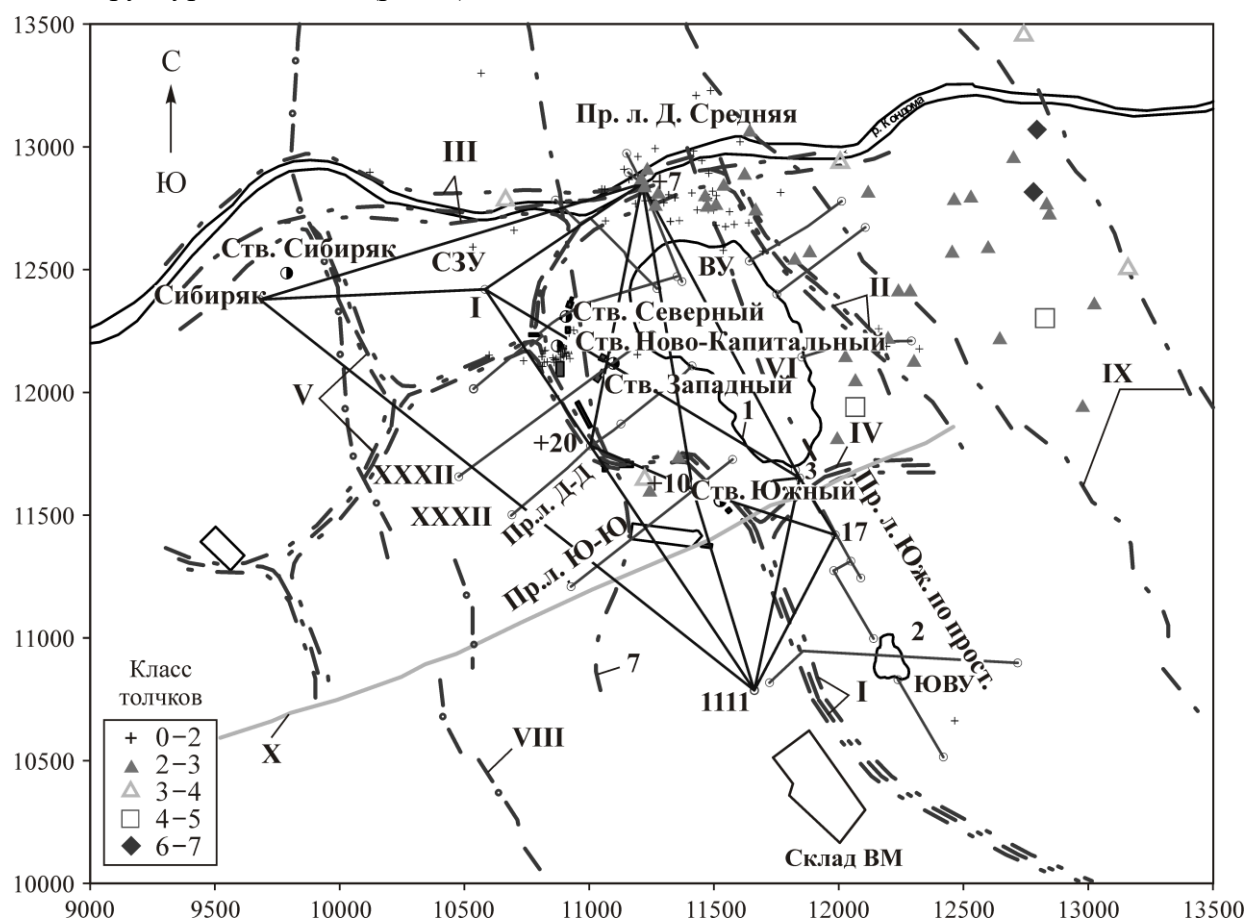


Рис. 1. Схема GPS-полигонов на земной поверхности Таштагольского месторождения с распределением толчков 2019 г. за рудной зоной: 1, 2 — соответственно, граница провала на ВУ и ЮВУ; I–X — границы тектонических нарушений: I, II, III, IV, V — границы, выделенные МГУ (по данным А. А. Лукашова), соответственно, разломы Холодный, Нагорный, Кондомский, Шахтерский, в районе новой промплощадки; VI — диагональный разлом; VII–IX — границы, выделенные ГПП “Запсибгеология”, соответственно, субмеридиональное нарушение, граница крупных блоков структур I-го порядка, надвиг в планах; X — сбросовые уступы (по данным Я. М. Грицюка)

Методика и точность спутниковых наблюдений зависит от применяемого оборудования. В период 2005–2015 гг. использовались одностолотные GPS-приемники Trimble 4600, с 2015 г. — двухстолотные приемники Trimble R4-3, устанавливаемые над реперами геодинами-

ческого полигона. Один из приемников за границами влияния горных разработок принимался в качестве базы (пункт полигонометрии 1111) и условно неподвижной станции, относительно которой определялись координаты остальных пунктов и вычислялись их сдвиги.

Спутниковые наблюдения выполнялись в соответствии с требованиями нормативно-методических документов. Для повышения точности наблюдений приемники над реперами устанавливались на штативы. Центрирование приемников проводилось на керны реперов диаметром 2–3 мм с использованием оптических центриров. Высота инструмента измерялась специальными рулетками.

Двухчастотная быстростатическая съемка дает возможность определять компоненты базовых линий с точностью в плане $\pm 3 + 0.5$ мм/км и по высоте $\pm 5 + 0.5$ мм/км. Точность съемки отражают апостериорные ошибки, полученные после уравнивания, которые составляли в измеренных расстояниях 0–2 мм, в превышениях — 0–3 мм.

Высокая точность результатов съемки достигалась в процессе детальной рекогносцировки пунктов, предварительного планирования работ через утилиту Planning программного обеспечения Trimble Business Center и создания замкнутых фигур при обработке, последовательной обработке и окончательном уравнивании результатов съемки при строгом соблюдении требований к проведению высокоточных наблюдений и допусков на обработку базовых линий и уравнивание сети наблюдений. Применение для съемки приемников Trimble R4-3 GNSS позволяло использовать одновременно отслеживаемые сигналы со спутников GPS и ГЛОНАСС, что также повышало точность определения местоположения реперов.

В процессе наблюдений накопление данных от спутников осуществлялось в течение 9 ч с интервалом 15 с в один файл данных на каждой станции, в которых при постобработке в дальнейшем выделялись файлы по 20 мин и обрабатывались с использованием программного обеспечения Trimble Business Center, после чего вычислялись координаты X, Y, Z и смещения реперов относительно времени начала съемки.

Результаты исследований и их обсуждение. Параметры и особенности короткопериодных смещений горных пород Таштагольского месторождения рассмотрены на примере наблюдений в 2019 г. при активизации смещения горных пород на разломе Холодный в районе АБК шахты (репер +20, Д–Д) и на разломе Шахтерский (репер 3, Южная по простиранию), где максимальные смещения как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях увеличились по сравнению с 2018 г. в 3–6 раз. Увеличились также короткопериодные смещения средние по месторождению, особенно в направлении осей X и Z (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Максимальные короткопериодные смещения горных пород Таштагольского месторождения в 2018–2020 гг., мм

Репер, профильная линия	08.07.2018			12.07.2019			19.07.2020		
	после технологического взрыва						после технологического взрыва		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
+ 20, Д – Д	19	9	29	49	31	104	33	14	55
+ 7, Д. Средняя	23	6	34	19	13	26	38	14	46
I СЗУ	33	15	42	18	19	58	59	21	96
10, Ю – Ю	11	12	30	16	10	22	34	15	53
3, Южная по простиранию	26	27	64	169	27	226	46	26	48
17, Южная по простиранию	15	31	69	60	31	69	92	34	117
Сибиряк	18	12	21	27	11	37	31	12	36
Среднее	20.7	16.0	41.3	51.1	20.3	77.4	47.6	19.4	64.4

Максимальные смещения до 164 мм в направлении оси X и до 218 мм по вертикали отмечались на разломе Шахтерский в 11:20 и являлись упругими смещениями горных пород, которые в период 11:00–11:20 мгновенно развивались, а в следующем временном интервале в

11:40 почти вернулись в состояние на 11:00 (рис. 2). Вектор максимальных горизонтальных смещений направлен по простиранию месторождения в сторону действия максимальных напряжений и характеризует условия сжатия–растяжения разлома Шахтерский. В вертикальной плоскости наблюдалось сначала поднятие, а затем оседание борта разлома. Поднятие соответствовало сжатию, а оседание — растяжению разлома.

В 2019 г. отмечена также активизация смещений на стыке Восточного и Юго-Восточного участков (репер 17, профильная линия “Южная по простиранию”) в направлении оси X, которые по сравнению с 2018 г. возросли в 4 раза. Обращает на себя внимание периодичность изменения направления смещений, особенно вкрест простирания (по оси Y). Если в 2018 г. максимальные смещения в этом направлении были мелкоамплитудными, где выделялся только один максимум, то в 2019 г. они стали высокоамплитудными с наличием пяти максимумов (рис. 2). Повышенный (относительно 2018 г.) уровень короткопериодных смещений зафиксирован в 2019 г. на СЗУ и в районе ствола “Сибиряк”.

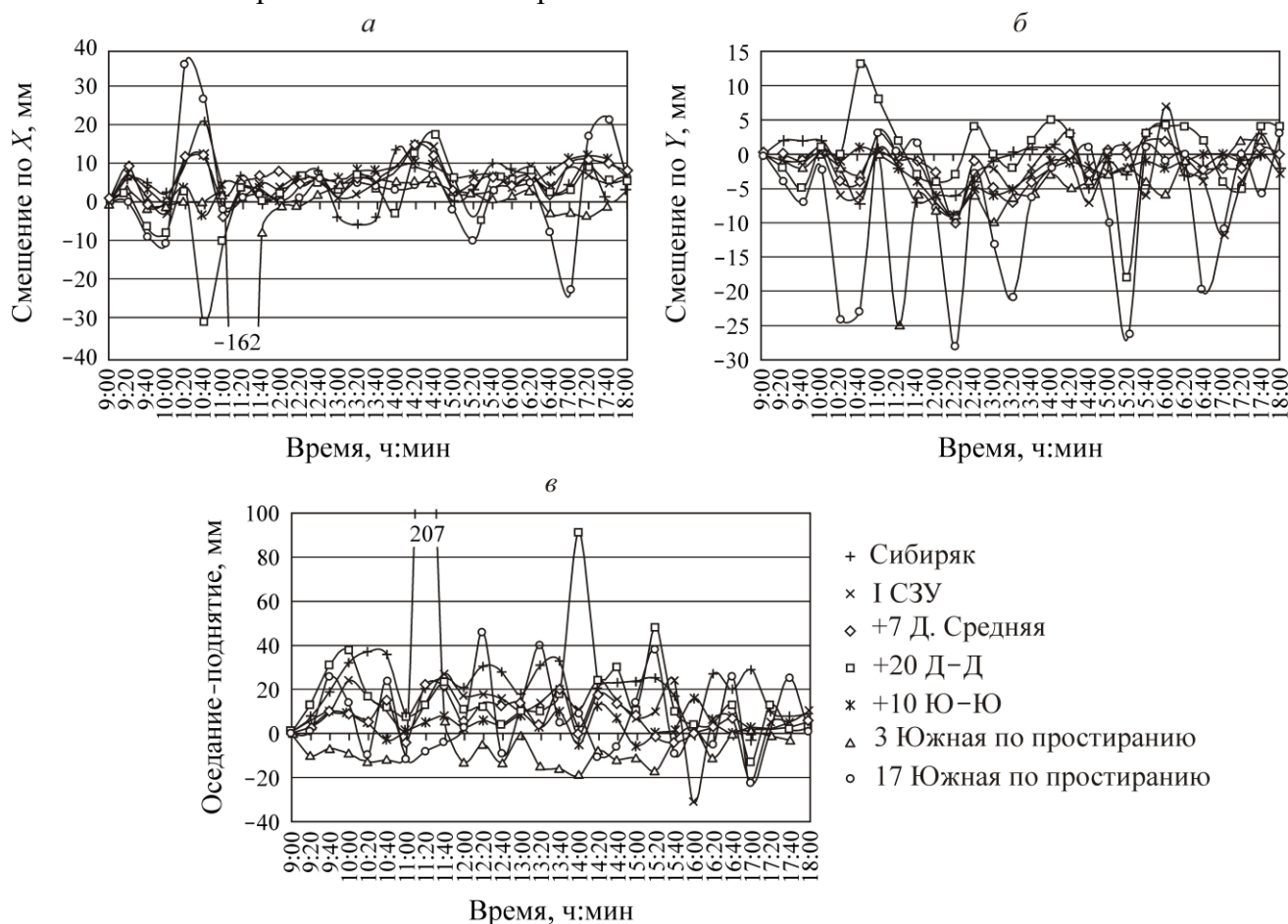


Рис. 2. Короткопериодные смещения горных пород Таштагольского месторождения, зафиксированные 12.07.2019 на реперах профильных линий

Следует отметить, что в 2019 г. наблюдения выполнялись в период осуществления обычных технологических процессов по отработке месторождения и добыче руды без прямой связи с взрывными работами. Максимальные значения короткопериодных смещений в 2019 г. обусловлены, по-видимому, высокой геодинамической активностью массива горных пород в районе Таштагольского месторождения. Так, за 2019 г. вне рудного поля зафиксировано 137 толчков (рис. 1), глубина большинства из них достигала 900–1900 м, энергетический класс в основном составлял 1–2, отмечены отдельные толчки 3, 4 и 6 классов. Характерно, что основная часть толчков приурочена к границам тектонических нарушений, как вблизи месторождения, так и на значительном удалении от горных работ.

Изменение во времени короткопериодных смещений в 2019 г. (рис. 2) и предыдущих [5] показало, что в некоторых случаях они высоко амплитудны, отличаются наличием нескольких периодов скачкообразного изменения, что свидетельствует об их скоростных параметрах. Исходя из этого и учитывая равные интервалы выделения (20 мин), рассчитывали скорости короткопериодных смещений, средние и максимальные скорости на каждом репере, в целом по всем наблюдениям на определенную дату и по годам наблюдений. За период 2006–2020 гг. обработано 51 наблюдение, в каждом определено местоположение от трех до семи реперов. Исследованы параметры короткопериодных смещений 180 реперов, данные обобщены по годам наблюдений и приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Обобщенные характерные параметры короткопериодных смещений горных пород Таштагольского месторождения

Год	Максимальное абсолютное смещение, мм			Максимальная скорость смещения, мм/мин			Средняя скорость смещения, мм/мин		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
2006	30.3	14.5	44.4	1.14	0.59	1.65	0.31	0.16	0.47
2007	41.7	23.0	61.4	1.59	0.91	2.31	0.40	0.22	0.61
2008	31.7	15.1	41.7	0.90	0.48	1.28	0.25	0.14	0.46
2009	15.9	10.9	40.9	0.63	0.45	1.53	0.25	0.15	0.55
2010	28.7	19.2	82.4	1.18	0.57	2.53	0.28	0.16	0.63
2011	49.5	38.2	66.1	1.84	1.67	2.68	0.38	0.25	0.63
2012	20.1	13.7	32.8	0.81	0.51	1.25	0.25	0.16	0.43
2013	21.7	13.0	31.2	0.85	0.54	1.24	0.26	0.15	0.38
2014	22.0	15.2	42.0	0.66	0.53	1.34	0.20	0.14	0.38
2015	21.9	13.3	40.1	0.74	0.46	1.56	0.24	0.13	0.45
2016	27.1	18.2	44.7	1.09	0.69	1.66	0.29	0.18	0.48
2017	30.3	13.9	46.4	1.24	0.51	1.72	0.29	0.15	0.46
2018	20.7	16.0	41.3	0.74	0.61	1.45	0.22	0.16	0.38
2019	51.1	20.3	77.4	2.16	0.77	3.39	0.34	0.21	0.69
2020	47.6	19.4	64.4	1.66	0.74	2.54	0.36	0.21	0.73
Среднее	30.7	17.6	50.5	1.15	0.67	1.88	0.29	0.17	0.52

При анализе максимальных скоростей смещения на разломах Холодный, Шахтерский, Кондомский, Нагорный установлено, что очевидной зависимости изменения во времени максимальных скоростей смещений на разломах и энергии толчков не наблюдается. Наибольшее соответствие в характере изменения наклона кривых скоростей и энергии толчков прослеживается по графикам максимальных скоростей смещений в целом по месторождению.

С учетом указанных особенностей исследовалось воздействие максимальных скоростей короткопериодных смещений на тектонических нарушениях и в целом по месторождению на проявление сейсмических событий. Известно [6, 7], что в формировании удароопасной ситуации скорость проявления сейсмособытий играет важную роль. С этой целью определялась зависимость энергии толчков от скоростей короткопериодных смещений по осям X, Y, Z отдельно по каждому разлому и в целом по месторождению (рис. 3). Установлена низкая корреляция найденных зависимостей, что обусловлено как незначительным количеством измерений, так и многообразием влияющих факторов. Необходимо отметить, что достоверность полученных зависимостей по мере накопления данных увеличивается. Это подтверждено исследованиями, проведенными в период 2018–2020 гг. Однако даже для имеющихся данных характерны некоторые особенности: увеличение энергии сейсмособытий (толчков) по месторождению наблюдается при увеличении скоростей короткопериодных смещений на разломах Холодный и Нагорный, где происходит преимущественно сдвиг вдоль шва разлома и поднятие – опускание его бортов, и при их уменьшении на разломе Шахтерский, где возникает преимущественно сжатие – растяжение шва разлома и поднятие – опускание его бортов.

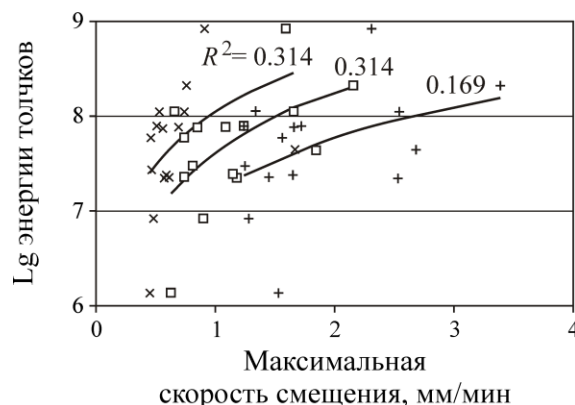


Рис. 3. Зависимость энергии толчков от максимальных скоростей короткопериодных смещений горных пород Таштагольского месторождения: $\square$ — по X; $\times$ — по Y; $+$ — по Z

Увеличению энергии сейсмособытий (толчков) по месторождению соответствует увеличение скоростей короткопериодных смещений в горизонтальной плоскости на разломе Кондомский и уменьшение — в вертикальной. В целом по месторождению установлено, что увеличение максимальных скоростей короткопериодных смещений как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях приводит к увеличению энергии сейсмособытий (толчков). При этом основным механизмом развития высокоамплитудных короткопериодных смещений является сдвиг, сжатие — растяжений и поднятие — опускание горных пород по границам структурных ослаблений массива (тектонические нарушения, глубинные разломы, контакты разномодульных пород, границы формирующихся плоскостей ослабления в массиве).

ВЫВОДЫ

Исходя из полученных результатов исследований, можно сделать вывод о перспективности представленного метода наблюдения короткопериодных смещений на геодинамических полигонах для оценки сейсмической активности месторождений. Некоторая взаимосвязь короткопериодных (геодинамических) смещений горных пород месторождения с его сейсмоактивностью имеется, однако для выявления критериев удароопасности по уровню параметров короткопериодных смещений необходимо проведение дополнительных исследований как по накоплению данных инструментальных наблюдений, так и по выявлению многофакторных зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Sashurin A. D.** Formation of the stress-strain state of a hierarchically blocky rock mass, Subsoil use problems, 2015, no. 1(4), pp. 38–44. [Сашурин А. Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород // Проблемы недропользования. — 2015. — № 1(4). — С. 38–44.]
2. **Panzhin A. A.** Investigation of short-period deformations of fault zones of the upper part of the earth's crust using satellite geodesy systems, Mine surveying and subsurface use, 2003, no. 2, pp. 43–54. [Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии // Маркшейдерия и недропользование. — 2003. — № 2(8). — С. 43–54.]
3. **Panzhin A. A.** Study of short-period geodynamics of rock mass of Kachkanarsky mining and processing station, Subsoil use problems, 2019, no. 4, pp. 57–65. [Панжин А. А. Исследование короткопериодной геодинамики массива горных пород Качканарского горно-обогатительного комбината // Проблемы недропользования. — 2019. — № 4. — С. 57–65.]

4. **Konovalova Yu. P., Ruchkin V. I.** Assessment of influence of short-period geodynamic movements on stress–strain behavior of rock mass, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2020, no. 3-1, pp. 90–104. [Коновалова Ю. П., Ручкин В. И. Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 90–104.]
5. **Lobanova T. V. and Vasil'yeva E. V.** Short-period displacements at the Tashtagol deposit tectonic fault borders, *GEO-Siberia-2010*, 2010, vol. 2, no. 2, pp. 147–151. [Лобанова Т. В., Васильева Е. В. Короткопериодные смещения на границах тектонических разломов Таштагольского месторождения // ГЕО-Сибирь-2010. — 2010. — Т. 2. — № 2. — С. 147–151.]
6. **Oparin V. N., Tapsiev A. P., Vostrikov V. I. et al.** On possible causes of increase in seismic activity of mine fields in the Oktyabrsky and Taimyrsky mines of the Norilsk deposit in 2003, Part I: Seismic regime. *Journal of Mining Science*, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 321–338. [Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I: Сейсмический режим // ФТПРПИ. — 2004. — № 4. — С. 3–22.]
7. **Vostrikov V. I., Oparin V. N., Usoltseva O. M., and Mulev S. N.** The assessment of the geodynamic state of rock massifs in deep mines of the Norilsk-Talnakh polymetallic deposit, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 28–34. [Востриков В. И., Опарин В. Н., Усольцева О. М., Мулев С. Н. Оценка геодинамического состояния массивов горных пород на глубоких рудниках Норильско-Талнахского месторождения полиметаллов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 28–34.]