

УДК 551.2/3:553.31(571.17)
DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-4-24-31

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ТАШТАГОЛЬСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Борис Тимофеевич Мазуров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)343-29-11, e-mail: btmazurov@mail.ru

Татьяна Валентиновна Лобанова

Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, доктор технических наук, e-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru

Татьяна Евгеньевна Елишина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, тел. (383)343-29-11, e-mail: dony2005@mail.ru

Динара Аманбековна Абжапарова

Ошский государственный университет, 714000, Киргизия, г. Ош, ул. Ленина, 331, кандидат технических наук, доцент, тел. (996-03-222)5-46-65, e-mail: ada23121970@yandex.ru

Приведены результаты ГНСС-наблюдений в районе охраняемых объектов в зоне влияния горных разработок. Для исследований был выбран Северо-Западный участок Таштагольского железорудного месторождения. Это самое крупное месторождение в Горной Шории. Осложняет мониторинг имеющийся провал непосредственно в районе шахты. Проведен анализ смещений земной поверхности при техногенном воздействии. Использовались метод конечных элементов, модель локально-однородной деформации треугольного конечного элемента. Для определения параметров полей деформации и их визуализации применялись пакеты программ Surfer, Elcut. В статье иллюстрируются изменение формы и границы, перемещения и дилатация, поле деформаций по оси x и поле деформаций по оси y . Результаты исследований помогут обосновать экспертную оценку геодинамической ситуации Таштагольского железорудного месторождения в настоящее время и выполнять обоснованный прогноз деформационной обстановки территории месторождения. Этим обосновывается актуальность регулярно проводимых геодезических наблюдений.

Ключевые слова: железорудное месторождение, ГНСС-наблюдения, конечные элементы, визуализация, поля деформации, дилатация, сдвиг, вращение

Введение

Геодезические методы играют большую роль при исследовании как природных геодинамических процессов: землетрясений, вулканизма [1–5], оползней, цунами, – так и техногенных процессов. Наиболее интенсивно они проявляются в местах разработки полезных ископаемых – нефти, газа, открытых и закрытых карьеров по добыче угля [6, 7], железорудных месторождениях [8] и др. [9, 10].

Горную Шорию (юг Кемеровской области, Россия) представляют железорудные месторождения Тельбесского и Кондомского

районов. К месторождениям Тельбесского района относятся Сухаринское, Темирское и Казское, к Кондомской группе – Таштагольское и Шерегешевское. Наиболее крупными в Горной Шории являются Таштагольский, Шерегешский и Казский рудники. Отличительная особенность железорудных месторождений состоит в том, что их отработка осуществляется в условиях повышенной опасности проявления динамических событий. Например, инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности на Шерегешевском месторождении ведутся с 1964 г. В настоящее время постоянные

наблюдательные станции заложены на всех действующих участках шахты – «Главный», «Болотный», «Новый Шерегеш», «Подруслый». Эти станции представлены системой из 16 профильных линий, по которым наблюдается около 190 реперов. Оценки сдвижения горных пород в районах охраняемых объектов (сооружения промплощадки рудника, ручей Большая речка, жилые дома) в периоды производства массовых взрывов и происходящих после этого перераспределений напряжений в налегающих и боковых породах проводятся на основе многочасовых ГНСС-наблюдений по характерным пунктам профильных линий.

Исходные данные и методика

Наиболее опасным по количеству сейсмических событий и их интенсивности является Таштагольское месторождение [8]. Здесь, уже на глубине 300 м, наблюдались стрельяния горных пород, а в настоящее время при работах на глубине 500 м и более имеют место горные удары, в том числе большой разрушительной силы (10^7 – 10^9 Дж), вызывающие повреждение горных выработок на большой

площади, остановку технологических процессов. В конечном итоге это приводит к существенным экономическим потерям. В период с 1959 г. по настоящее время на месторождении зафиксировано более 23 тыс. динамических проявлений горного давления, из них 20 собственно горных ударов. Обстановка в регионе месторождений усугубляется тем, что Кемеровская область и Хакасия соседствуют с Алтае-Саянской горной провинцией, имеющей повышенную сейсмоактивность. Район Таштагольского месторождения характерен наличием тектонических разломов и нарушений. Движения по их границам обуславливают геодинамическую активность массива горных пород как в зоне влияния подземных горных разработок, так и за ее пределами. Эксплуатация охраняемых объектов Таштагольского рудника (шахтные стволы и сооружения их надшахтных комплексов, административно-бытовой комбинат (АБК) шахты, железнодорожные пути, р. Кондома), расположенных на Восточном участке в разломных зонах (рис. 1), осложняется влиянием очистных работ, системой отработки месторождения с обрушением руд и вмещающих пород, а также проявлением геодинамических процессов.

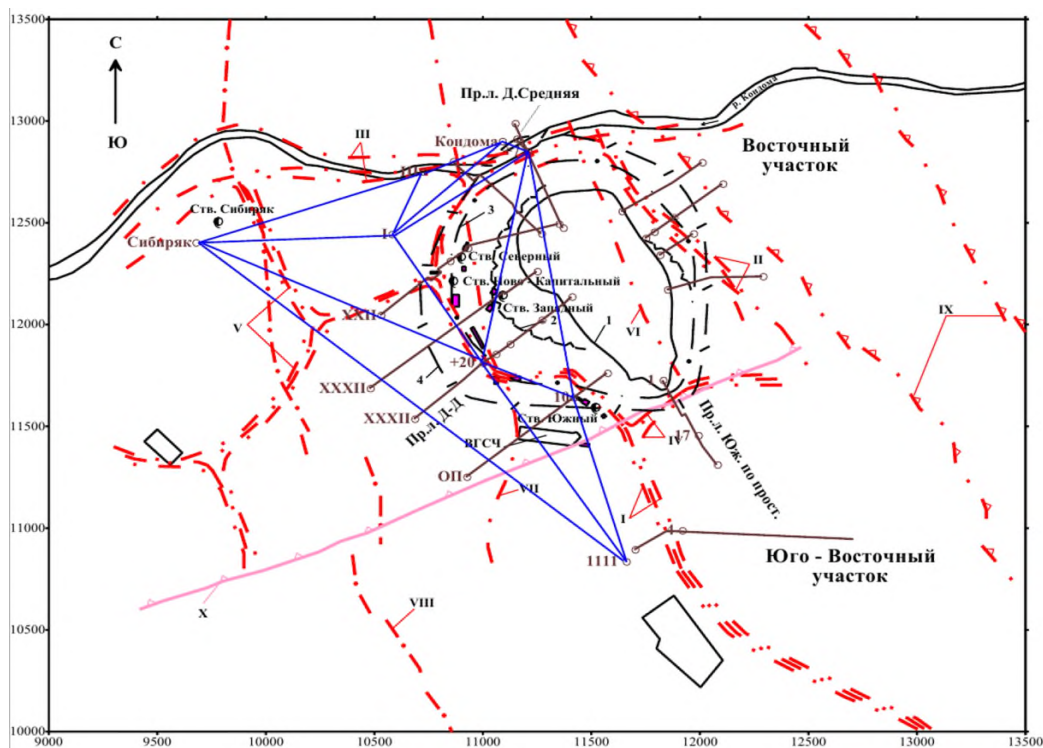


Рис. 1. Схема структурных блоков Таштагольского месторождения и ГНСС-полигонов на основе наблюдательной станции

Для оценки возможности безопасной эксплуатации этих объектов и прогнозирования ожидаемых величин деформаций необходимо определить характер и тип движений земной поверхности, установить достоверность выявленных особенностей и закономерностей развития деформаций земной поверхности, горных пород, строительных конструкций.

Исследования выполнены по данным дискретных ГНСС-наблюдений, проведенных на Таштагольском руднике (см. рис. 1).

За время проведения ГНСС-наблюдений неоднократно менялась геометрия наблюдательной сети. Для анализа накоплений сдвижений нами были взяты результаты наблюдений за период 23.05.2012–13.07.2019 (таблица).

Координаты пунктов и накопленных сдвижений

Реперы, профильные линии	X, м (геод)	Y, м (геод)	Z, м	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔXY , мм	ΔZ , мм
+16, Шх. Северная	10 994	12 728	437	+1	+27	27	+16
+6, Шх. Северная	11 868	12 503	542	-16	+59	61	+42
I	11 044	11 841	477	-14	+22	26	+17
VI	11 210	12 856	437	-19	+26	32	+4
IV	11 158	12 911	438	-15	+36	39	+7
V	11 156	12 986	457	-11	+44	45	+27
II	10 915	12 014	468	-16	+9	18	+4
III	10 941	12 361	469	-18	+11	21	+9
+12, Сев. по простир.	10 843	12 303	456	-66	+31	73	+32
+7, Д. Средняя	10 657	12 152	470	-73	+32	80	+45

Это Северо-Западный участок месторождения. Наблюдения выполнялись сотрудниками Сибирского государственного индустриального университета.

Результаты

При визуализации поверхности территории месторождения использовался метод Kriging [4, 11–13], реализованный в программе Surfer.

На рис. 2–4 приведены варианты визуализации рельефа территории Таштагольского месторождения. Для каждого рисунка использовались различные приемы картографического изображения рельефа поверхности.

Для представления картины горизонтальных сдвижений были выбраны метод конечных элементов [1, 14] и модель локально-однородной деформации конечного элемента [1], современные компьютерные программы визуализации полей деформаций

и напряжений [1, 5, 10, 11], в частности Elcut.

Для плоскости это треугольник. Вся территория разбивается на конечные элементы – треугольники (рис. 5).

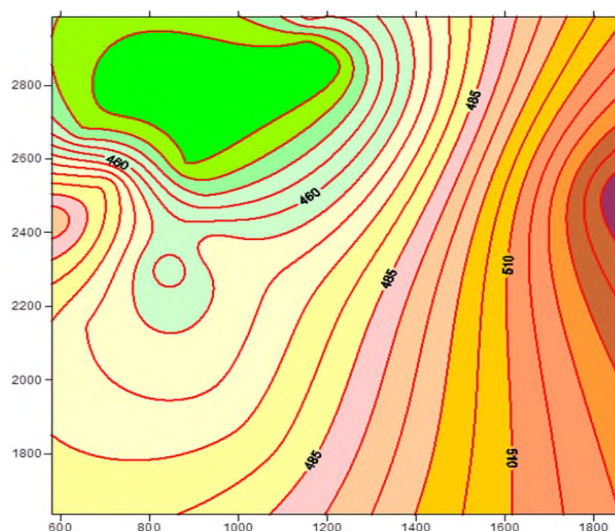


Рис. 2. Представление рельефа горизонталями с цветовой отливкой

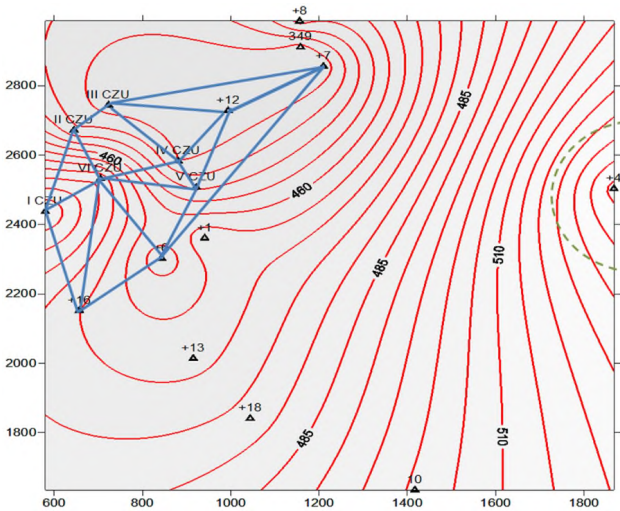


Рис. 3. Рельеф, представленный горизонталями, показом пунктов ГНСС-сети и контура северо-западной части провала

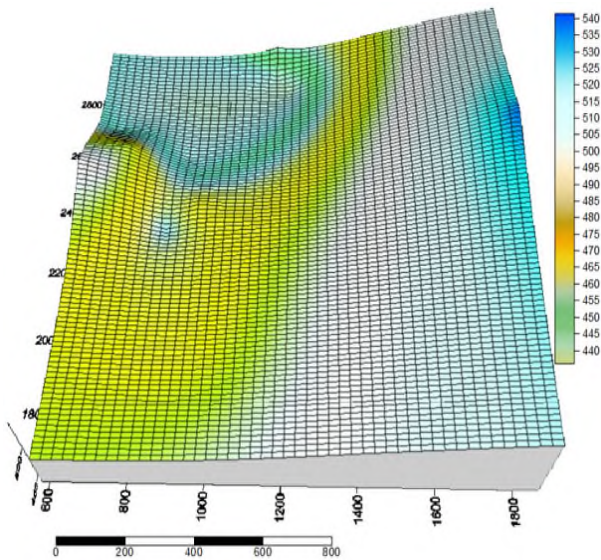


Рис. 4. Объемная визуализация территории

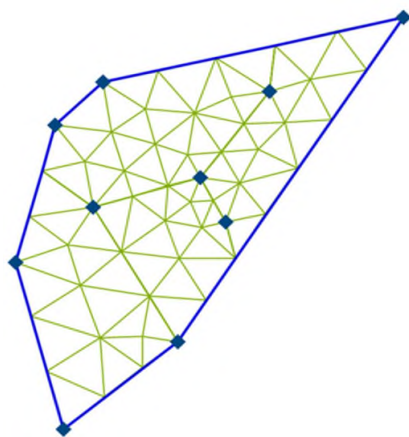


Рис. 5. Разбиение наблюдаемой территории на конечные элементы

При вычислении использовались известные формулы для оценки параметров модели локально-однородной деформации для плоскости [1, 10]. В вычислении для каждого треугольного конечного элемента исходными данными были плоские координаты x, y и величины смещений вершин треугольника u_x, u_y :

$$\left. \begin{aligned} u_{x_i} &= e_{10} + e_{11}x_i + e_{12}y_i, \\ u_{y_i} &= e_{20} + e_{21}x_i + e_{22}y_i, \\ u_{x_j} &= e_{10} + e_{11}x_j + e_{12}y_j, \\ u_{y_j} &= e_{20} + e_{21}x_j + e_{22}y_j, \\ u_{x_k} &= e_{10} + e_{11}x_k + e_{12}y_k, \\ u_{y_k} &= e_{20} + e_{21}x_k + e_{22}y_k. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Система (1) состоит из шести линейных уравнений с шестью неизвестными – коэффициентами линейной модели перемещений:

$$e = [e_{10} \ e_{11} \ e_{12} \ e_{20} \ e_{21} \ e_{22}]^T. \quad (2)$$

Из решения системы (1) эти коэффициенты определяются для треугольного КЭ с вершинами 1, 2 и 3 следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} e_{11} &= \frac{(u_{x_1} - u_{x_2})(y_1 - y_3) - (u_{x_1} - u_{x_3})(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2)}, \\ e_{12} &= \frac{(u_{x_1} - u_{x_2})(x_1 - x_3) - (u_{x_1} - u_{x_3})(x_1 - x_2)}{(y_1 - y_2)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_1 - x_2)}, \\ e_{21} &= \frac{(u_{y_1} - u_{y_2})(y_1 - y_3) - (u_{y_1} - u_{y_3})(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2)}, \\ e_{22} &= \frac{(u_{y_1} - u_{y_2})(x_1 - x_3) - (u_{y_1} - u_{y_3})(x_1 - x_2)}{(y_1 - y_2)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_1 - x_2)}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} e_{10} &= u_{x_1} - e_{11}x_1 - e_{12}y_1, \\ e_{20} &= u_{y_1} - e_{21}x_1 - e_{22}y_1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Инвариантные (независящие от начала системы координат и ориентации ее осей) свойства конечного элемента отражают четыре коэффициента. Они обычно записываются в виде квадратной матрицы (5) – тензора деформации [1, 3, 10, 15]:

$$T = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

В тензоре T выделяется симметричная часть T_ε , отражающая чистую деформацию КЭ, и кососимметричная часть T_ω , отражающая вращение КЭ как абсолютно твердого тела:

$$T = T_\varepsilon + T_\omega;$$

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} e_{11} & \frac{e_{12} + e_{21}}{2} \\ \frac{e_{21} + e_{12}}{2} & e_{22} \end{pmatrix};$$

$$T_\omega = \begin{pmatrix} 0 & \frac{e_{12} - e_{21}}{2} \\ \frac{e_{21} - e_{12}}{2} & 0 \end{pmatrix}.$$

Разворот треугольного КЭ вычисляется следующим образом:

$$\omega = \frac{e_{12} - e_{21}}{2}; \quad \omega'' = \rho'' \omega.$$

По элементам тензора T_ε определяются характеристики деформации треугольного конечного элемента – дилатация (расширение/сжатие), сдвиговые компоненты и их ориентация.

Программа Elcut позволила оценить и визуализировать характеристики деформации, направления векторов сдвижений, изменение формы и границ всей территории, на которой были выполнены ГНСС-определения. Они показаны на рис. 6.

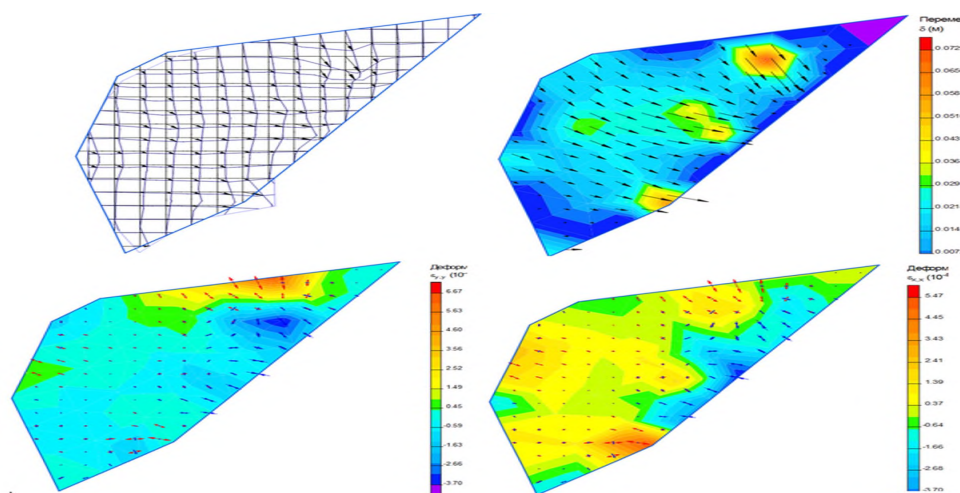


Рис. 6. Изменение формы и границы, перемещения и дилатация, поле деформаций по x и поле деформаций по y

Также мы имеем возможность в программе Elcut визуализировать поля главных деформаций ε_1 и ε_2 исследуемой территории. Отметим, что на рис. 6 имеется достаточно информации для экспертной оценки тенденций изменений координат и деформационных параметров.

Таким образом, решены задачи определения характера и типа движений земной поверхности, установления достоверности выявленных особенностей и закономерностей развития деформаций земной поверхности, горных пород, строительных конструкций. Полученные результаты направлены на оценку возможности безопасной эксплуатации объектов недропользования и прогнозирования ожидаемых величин деформаций.

Заключение

Внедрение методов спутниковых наблюдений в исследования процессов сдвижения на различных объектах и в различных геологических условиях позволило выявить геодинамические движения и оценить их влияние на эксплуатацию объектов. Анализ результатов инструментальных наблюдений сдвижений горных пород в районе ствола «Сибиряк» и в целом Таштагольского месторождения показал, что зафиксированные в районе ствола смещения характеризуют геодинамические движения и обусловлены природными процессами, происходящими в районе месторождения.

Предположительно основными факторами, влияющими на геодинамические движения породного массива и их активизацию в 2016–2017 гг., являлись высокая сейсмическая активность района Таштагольского месторождения и региона Горной Шории в целом, тектоническая нарушенность массива горных пород и взрывное воздействие на этот массив.

Повышение уровня геодинамической активности в районе ствола в условиях возобновления работ по его пуску в эксплуатацию свидетельствует о необходимости мониторинга геодинамических процессов в районе надшахтного комплекса ствола и, вероятно, закладки специальной наблюдательной станции с организацией инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Есиков Н. П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности. – Новосибирск : Наука, 1979. – 182 с.
2. Кафтан В. И., Серебрякова Л. И. Современные движения земной коры. – М., 1990. – Т. 28 (Геодезия и аэросъемка. Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР). – 149 с.
3. Татевян С. К., Кузин С. П., Ораевская С. П. Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований // Геодезия и картография. – 2004. – № 6. – С. 33–44.
4. Krige D. G. A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand : Master's thesis. – University of Witwaterstand, South Africa, 1951.
5. Terada T., Miyabe N. Deformation of the earth crust in Kwansai districts and its relation to the orographic feature // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1929. – No. 7. – P. 223–239.
6. Мозер Д. В., Левин Е. Л., Гей Н. И., Каранеева А. Д., Нагибин А. А. Мониторинг деформаций земной поверхности на территории Карагандинского угольного бассейна // Геодезия и картография. – 2015. – № 3. – С. 21–26.
7. Каленицкий А. И., Соловицкий А. Н. О развитии многоуровневых построений на геодинамическом полигоне при освоении недр Кузбасса // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 45–55.
8. Лобанова Т. В., Трофимова О. Л. Современные геодинамические движения в районе ствола «Сибиряк» Таштагольского рудника // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3. – С. 70–80.
9. Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Поливач В. И. Геофизический мониторинг опасных техногенных проявлений на подрабатываемых территориях // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 35–44.
10. Кузьмин Ю. О. Идентификация результатов повторных геодезических наблюдений при оценке геодинамической опасности объектов недропользования // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 46–64.
11. Берлянт А. М. Свойства визуализации как способа моделирования геоизображений // Геодезия и картография. – 2005. – № 12. – С. 43–52.
12. Елшина Т. Е., Утробина Е. С., Сысоев А. В. Визуализация модели горного рельефа для WEB-карт // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 145–155.
13. Абжапарова Д. А., Мазуров Б. Т. Картографическое обеспечение инженерно-геодезических работ в горной местности с учетом секущей плоскости // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 5–13.
14. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М. : Мир, 1976. – 464 с.
15. Акивис М. А., Гольдберг В. В. Тензорное исчисление. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1972. – 352 с.

Получено 19.04.2021

© Б. Т. Мазуров, Т. В. Лобанова, Т. Е. Елшина, Д. А. Абжапарова, 2021

ASSESSMENT OF THE MODERN GEODYNAMIC SITUATION AT TASHTAGOL IRON ORE DEPOSIT

Boris T. Mazurov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)343-29-11, e-mail: btmazurov@mail.ru

Tatiana V. Lobanova

Siberian State Industrial University, 42, Kirova St., Novokuznetsk, 654007, Russia, D. Sc., e-mail: lobanova_tv@sibsiu.ru

Tatiana E. Elshina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (383)343-29-11, e-mail: dony2005@mail.ru

Dinara A. Abzhaparova

Osh State University, 331, Lenina St., Osh, 714000, Kyrgyzstan, Ph. D., Associate Professor, phone: (996-03-222)5-46-65, e-mail: ada23121970@yandex.ru

The results of GNSS observations in the area of protected objects in the mining influence zone are presented. For research, the Northwest section of the Tashtagol iron ore deposit was selected. This is the largest field in the Mountain Shoria. Directly in the area of the mine there is a sinkhole. This makes monitoring difficult. An analysis of the displacements of the earth's surface under anthropogenic impact is carried out. The finite element method and the model of locally uniform deformation of a triangular finite element were used. Surfer and Elcut software packages were used to determine the parameters of the deformation fields and their visualization. The article shows the change in shape and boundary, displacement and dilatation fields, deformation field along the x axis and deformation field along the y axis. The research results will help to substantiate an expert assessment of the geodynamic situation of the Tashtagol iron ore deposit at present and to make a reasonable forecast of the deformation situation of the deposit territory. This justifies the relevance of regularly conducted geodetic observations, which are also of environmental importance and industrial safety.

Keywords: iron ore deposit, GNSS observations, finite elements, visualization, deformation fields, dilatation, shear, rotation

REFERENCES

1. Esikov, N. P. (1979). *Tektonofizicheskie aspekty analiza sovremennykh dvizheniy zemnoy poverkhnosti [Tectonophysical aspects of the analysis of modern movements of the earth's surface]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 182 p. [in Russian].
2. Kaftan, V. I., Serebryakova, L. I. (1990). *Sovremennye dvizheniya zemnoy kory: T. 28, Geodeziya i aeros"emka. Itogi nauki i tekhniki [Modern movements of the earth's crust: T. 28, Geodesy and aerial photography. Results of science and technology. VINITI AN USSR]*. Moscow, 149 p. [in Russian].
3. Tatevyan, S. K., Kuzin, S. P., & Oraevskaya, S. P. (2004). Using satellite positioning systems for geodynamic research. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 33–44 [in Russian].
4. Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand. *Master's thesis*. University of Witwaterstand, South Africa, 1951.
5. Terada, T., & Miyabe, N. (1929). Deformation of the earth crust in Kwansai districts and its relation to the orographic feature. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 7, 223–239.
6. Moser, D. V., Levin, E. L., Gey, N. I., Karaneyeva, A. D., & Nagibin, A. A. (2015). Monitoring of deformations of the earth's surface on the territory of the Karaganda coal basin. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 3, 21–26 [in Russian].
7. Kalenitskiy, A. I., & Solovitskiy, A. N. (2019). On the development of multilevel structures on the geodynamic test site during the development of the Kuzbass subsoil. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 45–55 [in Russian].

8. Lobanova, T. V., & Trofimova, O. L. (2018). Modern geodynamic movements in the area of the Sibiryak shaft of the Tashtagol mine. *Problemy nedropol'zovaniya [Problems of Subsurface Use]*, 3, 70–80 [in Russian].
9. Gordeev, V. F., Malyshkov, S. Yu., & Polivach, V. I. (2019). Geophysical monitoring of dangerous technogenic manifestations in undermined areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 35–44 [in Russian].
10. Kuzmin, Yu. O. (2018). Identification of the results of repeated geodetic observations when assessing the geodynamic hazard of subsoil use objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 46–64 [in Russian].
11. Berlyant, A. M. (2005). Visualization properties as a method for modeling geoimages. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 12, 43–52 [in Russian].
12. Elshina, T.E., Utrobina, E. S., & Sysoev, A. V. (2020). Visualization of the mountain relief model for WEB-maps. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 145–155 [in Russian].
13. Abzhaparova, D. A., & Mazurov, B. T. (2017). Cartographic support of engineering and geodetic works in mountainous areas, taking into account the secant plane. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 5–13 [in Russian].
14. Auden, J. (1976). *Konechnye elementy v nelineynoy mekhanike sploshnykh sred [Finite elements in nonlinear mechanics of continuous media]*. Moscow: Mir Publ., 464 p. [in Russian].
15. Akivis, M. A., Goldberg, V. V. *Tenzornoe ischislenie [Tensor calculus]*. Moscow: "Science" Publ., Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 352 p. [in Russian].

Получено 19.04.2021

© B. T. Mazurov, T. V. Lobanova, T. E. Elshina, D. A. Abzhaparova, 2021