Применение исходных данных постоянно действующих станций для геодинамического районирования

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 исследованию современных геодинамических движений с целью геодинамического районирования территорий. При этом геодинамический мониторинг может быть как региональным, например Российской Федерации, Уральского региона, геологического массива, так и локальным, охватывающим месторождение и вмещающий массив. В качестве источника данных для деформационного мониторинга используются постоянно действующие станции Global Navigation Satellite System (GNSS).

Методология. Приведена методика визуализации геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений, которая позволяет обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы.

Результаты. Показано, что в качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений наблюдательных пунктов, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Обозначено, что важной характеристикой векторного поля геодинамических движений является дивергенция, которая характеризует степень сходимости или расходимости векторного потока.

Выводы. Обозначены основные положения методики мониторинга и визуализации современных геодинамических движений в виде векторного поля по результатам цикловых геодезических измерений. На основании экспериментальных данных установлен вихревой характер современных геодинамических движений как индикатор активных тектонических нарушений.

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

Автор выражает глубокую признательность коллективам компаний «Эффективные технологии» (www.eftgroup.ru), HIVE (www.hive.geosystems.aero), «ГеоСтройИзыскания» (www.gsi.ru) за предоставленные исходные данные и содействие при выполнении исследований. Статья подготовлена в рамках государственного задания № 075-00581-19-00 по теме № 0405-2019-0007.

Введение. Вопрос возможности исследования современных геодинамических движений и геодинамического районирования территорий по риску возникновения техноприродных катастроф неоднократно рассматривался в связи с исследованием современной геодинамики Уральского региона, вызванной как естественными, так и техногенными факторами [1, 2]. Для исследований были использованы данные деформационного мониторинга, проводимого как в дискретном режиме на специально оборудованных наблюдательных пунктах, так и на постоянно действующих станциях Global Navigation Satellite System (GNSS).

В спутниковой геодезии определение цикловых пространственных координат наблюдательных пунктов и их изменений во времени осуществляется в зависи-

мости от размеров сетей: методами Precise Point Positioning (PPP) [3, 4] для больших сетей и классическими методами Double Difference (DD) для локальных сетей. Также методы PPP и DD могут использоваться в комбинации, при этом методами DD производится расчет и уравнивание геодезической сети, а методом PPP – привязка локальных и региональных геодезических построений к международной сети IGS [5, 6].

Рис. 1. Общая характеристика сетей постоянно действующих GNSS-станций.

Составил: А. А. Панжин, ИГД УрО РАН, 2019 г.

Fig. 1. General characteristic of networks at permanent GNSS stations. Prepared by A. A. Panzhin, IM UB RAS, 2019

Важным аспектом при исследовании и визуализации результатов современных геодезических движений является моделирование природных, техногенных и экологических систем, которое позволяет выявить многие необходимые для их анализа свойства и характеристики, в том числе скрытые закономерности их пространственно-временного распределения. При этом многое зависит от исследования, адекватного объекту и его компонентам: идентификации и визуализации как количественной, так и качественной пространственно-временной информации [7].

Также визуализация геодезических движений по результатам цикловых геодезических измерений позволяет более обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и принятия профилактических мер для обеспечения безопасности населения, промышленных объектов и др.

Методология. В настоящее время на территории России и в приграничных с ней областях Казахстана, Украины и Беларуси работают несколько сотен постоянно действующих GNSS-станций, которые производят накопление данных, что позволяет выполнить их высокоточную геодезическую привязку к общемировой мониторинговой сети International GNSS Service (IGS) в режиме цикловых мониторинговых измерений. Характеристика основных сетей, включающих как международные научные проекты, так и корпоративные сети, приведена на рис. 1.

Как показано в работе [8], в качестве ключевого источника информации о геодинимических движениях, по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Приведение скоростей к годовому циклу необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.

Рис. 2. Схема расположения станций Фундаментальной астрономо-геодезической сети
Fig. 2. Layout of the stations of the Fundamental AstroGeodetic Network

При геодинимическом районировании территорий целесообразно использовать устоявшийся геодезический принцип развития сетей «от общего к частному» с построением многоуровневой мониторинговой системы, при этом на первых этапах исследований необходимо опираться на международные сети станций IGS, EUREF и, в большей мере, на Фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС), схема расположения станций которой приведена на рис. 2.

Пространственные координаты станций международных геодезических сетей регулярно переопределяются, при этом для ряда станций доступны не только параметры временных рядов современных геодинимических движений, но и скорости станций в трехмерном пространстве [9].

Поскольку расстояния между соседними пунктами ФАГС зачастую превышают 1000–2000 км, для конкретизации параметров современных геодинимических движений необходимо произвести сгущение сети мониторинговых станций.

Это достигается включением в геодезические построения пунктов межрегиональных и региональных постоянно действующих станций Continuously Operating Reference Station (CORS). Данные станции, принадлежащие, как правило, геодезическим корпорациям (EFT, «Геостройизыскания» и др.) или являющиеся интеграторами (HIVE, RTKNet), производят суточные GNSS-наблюдения, результаты которых в дальнейшем доступны пользователям в виде RINEX-файлов. При этом необходимо отметить, что станции CORS сконцентрированы в основном в западной части России, в районах Урала, Сибири и Дальнего Востока их сеть разрежена, поэтому для их концентрации необходимо использовать данные из сетей, принадлежащих различным организациям, что в ряде случаев приводит к проблемам их совместимости. Также при использовании CORS возникает проблема получения архивных (более 2–3 месяцев) исходных RINEX-данных, поскольку для них не предусмотрено длительное хранение на серверах.

Рис. 3. Ситуационная карта расположения станций GNSS, по которым определялись современные геодинамические движения

Fig. 3. Planimetric map of GNSS stations aimed at determining the present-day geodynamic motions

Результаты. Исследования современных геодинамических движений в представленной работе осуществлялись на Воронежском кристаллическом массиве (ВКМ) с использованием данных деформационного мониторинга, проводимого постоянно действующими станциями GNSS на территории региона (рис. 3). Чтобы иметь возможность проследить и оценить вероятную связь современных геодинамических движений с тектоническим строением региона, на рис. 3 совмещено размещение пунктов GNSS с основными разломами региона, отмечаемыми фондовыми геологическими материалами [10].

Также на исследуемом участке, по данным многолетних сейсмических наблюдений, зафиксирован ряд сейсмических событий небольшой балльности. Круп-

нейшее из них, отнесенное к природным землетрясениям, находится в пределах 30 км от района Еланского и Елkinsкого месторождений, что для сейсмических событий характеризуется как непосредственная близость (рис. 3). Магнитуда данного землетрясения, произошедшего 31.03.2000, составила 3,9, глубина очага – 10 км. По последствиям землетрясения такой магнитуды не представляют серьезной опасности, но они, являясь динамической реализацией предшествующих деформационных процессов, в определенной мере характеризуют современную геодинамическую активность района. Всего на исследуемой территории, на площади размерами 200 × 300 км, расположено 18 пунктов GNSS, которые производят накопление данных, что позволяет выполнить их высокоточную геодезическую привязку к общемировой сети IGS в режиме цикловых мониторинговых измерений.

В цикловых измерениях определение абсолютных пространственных координат наблюдательных пунктов осуществлялось периодически, четыре раза в год, для этого использовались накопленные станциями GNSS исходные файлы данных спутниковых навигационных приемников в формате RINEX (Receiver Independent Exchange Format).

По каждой серии цикловых измерений проводилось 3–5 суточных наблюдений на каждом пункте GNSS, что позволяло определить их пространственные координаты с погрешностью 2σ , не превышающей ± 5 мм в горизонтальной и ± 7 мм в вертикальной плоскости.

Камеральная обработка с получением пространственных координат наблюдательных пунктов в Международной наземной опорной системе отсчета ITRF-2014 производилась в пакетах программного обеспечения Bernese Software (методом Precise Point Positioning PPP) и Waypoint GrafNet (методом Double Difference DD) с определением пространственных координат пунктов по каждой суточной серии наблюдений с последующей статистической обработкой массива данных.

Годовые скорости векторов трендовых движений пунктов были определены на основе анализа изменений их пространственных приращений координат ΔX , ΔY , ΔZ , происшедших в промежутках между повторными циклами измерений. Направления и величины векторов достаточно однородны, что отражает общее, преимущественно восточное, трендовое направление литосферной плиты, включающей ВКМ.

Также анализ скоростей геодинамических движений, а не их абсолютных значений, целесообразно использовать при исследовании процесса сдвигения при подземной и открытой разработках месторождений полезных ископаемых, поскольку в условиях действующего горнодобывающего предприятия возникает проблема утраты реперов наблюдательной станции. Это приводит к частичной ротации реперов вследствие восстановления уничтоженных и добавления новых в геодезические построения. При этом сопоставление абсолютных величин сдвижений и деформаций, полученных в различные периоды времени, будет некорректным при использовании традиционных алгоритмов оценки и анализа деформационного состояния массива.

В результате для каждой серии цикловых измерений определяются изменения пространственных приращений координат ΔX , ΔY , ΔZ пунктов, которые, для случая ВКМ, имеют преимущественно восточное направление за счет трендовой составляющей. При этом векторное поле деформаций визуализируется практически однородным, что не позволяет качественно идентифицировать пространственно-временную информацию о геодинамических движениях. Для числовой фильтрации трендовой составляющей применялся метод наименьших квадратов

с наложением условия математического минимума квадратов векторов сдвижений по каждой оси координат X, Y, Z :

$$\sum \delta_x \delta_x \rightarrow \min; \sum \delta_y \delta_y \rightarrow \min; \sum \delta_z \delta_z \rightarrow \min.$$

В результате определено и графически построено освобожденное от трендовой составляющей поле векторов геодинамических движений исследуемой территории ВКМ, в котором визуально определяются вихревые сдвиги (рис. 4). Важность визуализации вихревых (ротационных) геодинамических движений объясняется тем, что границы вихрей формируются по границам крупных подвижных структурных нарушений, что позволяет идентифицировать активные тектонические структуры района [11].

Рис. 4. Вихревые движения на исследуемой территории
Fig. 4. Vortical motions in the territory under consideration

Полученные в результате измерений геодинамические движения с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразуются также в векторное и тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций. Это позволяет выделить и идентифицировать зоны с максимальными значениями главных деформаций как растяжения, так и сжатия, а также зон с повышенными значениями сдвиговых деформаций, приводящих к разрушениям объектов инфраструктуры.

Другой важной характеристикой векторного поля геодинамических движений является дивергенция, которая характеризует степень сходимости или расходимости векторного потока [12], знание закономерностей распределения ее характеристик позволяет идентифицировать источники формирования и стока дефор-

мационных процессов и определить их пространственное положение. Разработан и алгоритмически реализуется математический аппарат [13, 14], позволяющий определять дивергенцию по результатам исходных данных, представленных как в виде равномерной Крайгинг-модели, так и в виде данных, представленных в вершинах единичных элементов триангуляции Делоне.

На основе экспериментальных данных определения скоростей современных геодинамических движений ВКМ в Международной земной системе координат ITRF2014 создана «База данных современных геодинамических движений Воронежского кристаллического массива» [15]. В базе данных представлена информация о скоростях современных геодинамических движений, по которым выявляются области высокоградиентных движений и концентрации деформаций ВКМ. База данных может использоваться для получения информации о геодинамической активности массива горных пород, предназначенного для расположения сложных и ответственных объектов промышленной инфраструктуры с целью обеспечения их устойчивости и безопасности. Информация, представленная в базе данных, может быть использована для выявления и идентификации активных тектонических структур региона и геодинамического районирования ВКМ. Аналогичные базы данных в настоящее время создаются для Уральского региона и территории Курской магнитной аномалии.

Выводы. Таким образом, на основании сказанного, показана целесообразность применения исходных данных сетей постоянно действующих станций GNSS для районирования территории России по уровню величин и направлений геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений.

На основании тестовых экспериментальных данных, полученных на ВКМ по результатам деформационного мониторинга по постоянно действующим на территории региона станциям GNSS, установлен вихревой характер современных геодинамических движений как индикатор активных тектонических нарушений. Это позволяет выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы за счет анализа поля сдвижений и деформаций, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и обоснования профилактических мер по обеспечению безопасности населения, промышленных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Панжин А. А. Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса движения на месторождениях Уральского региона // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2015. № 1(49). С. 22–26.
3. Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M. et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). 1997. Vol. 102. No. B3. P. 5005–5017.
4. Gulal E., Erdogan H., Tiryakioglu I. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis // Digital Signal Processing: A Review Journal. Vol. 23. Issue 6. December 2013. P. 1945–1957.
5. He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering // Advances in Space Research. 2015. Vol. 55. Issue 5. March. P. 1316–1327.
6. He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources // Journal of Geodynamics. Vol. 106. 1 May 2017. P. 12–29.
7. Мазуров Б. Т., Панжин А. А., Силаева А. А. Структурное моделирование полученных по геодезическим данным сдвижений путем визуализации // Геодезия и картография. 2016. № 3. С. 35–40. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3-25-40.
8. Панжин А. А., Панжина Н. А. Оценка стабильности опорных пунктов как основы для геодинамического мониторинга // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 31–40.
9. Боярский Е. А., Витушкин Л. Ф., Герасименко М. Д., Демьянов Г. В., Кауфман М. Б., Кафтан В. И., Мазурова Е. М., Малкин З. М., Молоденский С. М., Нейман Ю. М., Певнев А. К., Савиных В. П., Стеблов Г. М., Татевян С. К., Толчельникова С. А., Шестаков Н. В. Национальный отчет

Международной ассоциации геодезии Международного геодезического и геофизического союза 2007–2010 // Науки о Земле. 2011. № 1. С. 5–36.

10. Трегуб А. И., Шевцов Д. Е. Разломы в фундаменте восточной части Воронежского кристаллического массива по морфометрическим данным // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2020. № 1. С. 30–38. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.1/2511>

11. Викулин А. В. Ротационные волны в блоковых вращающихся средах (на примере геологической среды) // Процессы в геосредах. 2016. № 7. С. 194–206.

12. Мазуров Б. Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики. Новосибирск: СГУГиТ, 2019. 360 с.

13. Колмогоров В. Г., Мазуров Б. Т., Панжин А. А. Алгоритм оценки дивергенции векторных полей движений земной поверхности по геодезическим данным // Геодезия и картография. 2018. Т. 79. № 10. С. 46–53.

14. Мазуров Б. Т., Мустафин М. Г., Панжин А. А. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых // Записки Горного института. 2019. Т. 238. № 4. С. 376–382.

15. Панжин А. А., Панжина Н. А., Сашурин А. Д. Современные геодинамические движения Воронежского кристаллического массива: база данных. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB= DB&DocNumber= 2020621723&TypeFile=html (дата обращения: 09.12.2020)

Поступила в редакцию 2 сентября 2020 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: 10.21440/0536-1028-2021-1-54-62

Applying primary data from permanent stations for geodynamic zoning

Andrei A. Panzhin¹, Nataliia A. Panzhina¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The article focuses on present-day geodynamic motion in order to carry out geodynamic zoning of territories. Geodynamic monitoring may be both regional, for instance, of the Russian Federation, Ural region, geological rock mass, and it may also be local, i.e. covering a deposit and enclosing rock mass. Permanent stations of Global Navigation Satellite System (GNSS) have been used as a source of data for deformation monitoring.

Methodology included the method of visualizing geodynamic motions according to the results of cyclic geodetic measurements which makes it possible to single out active geological structures, blocks, and tectonic faults on reasonable grounds.

Results. It has been shown that it is advisable to use not modules of observation station displacement vector values but their velocities reduced to an annual cycle as a key source of information on geodynamic motion at large spatial-temporal bases. It has been indicated that an important characteristic of geodynamic motion vector field is divergence which characterizes the degree of convergence or divergence of a vector flux.

Summary. Basic theses have been identified of the method of present-day geodynamic motions monitoring and visualization in the form of a vector field according to the results of cyclic geodetic measurements. Based on experimental data, it has been determined that the present-day geodynamic motion is vortical being the indicator of active tectonic faulting.

Key words: geodynamic monitoring; main bases; shift vector; hierarchy block-structure; deformation.

Acknowledgements. The author would like to thank the teams of Effective Technologies (www.eftgroup.ru), HIVE (www.hive.geosystems.aero), and GeoStroilzyskania (www.gsi.ru) for the provided primary data and assistance in the research. The research has been carried out within the framework of the state assignment no. 075-00581-19-00, theme no. 0405-2019-0007.

REFERENCES

1. Utkin V. I., Belousova A. A., Tiagunov D. S., Balandin D. V. Studying the geodynamics of the North and Middle Urals according to GPS data. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2010; 431 (2): 246–251. (In Russ.)

2. 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.)

3. Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M. et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012). 1997; 102 (B3): 5005–5017.

4. Gulal E., Erdogan H., Tiryakioglu I. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. *Digital Signal Processing: A Review Journal*. Vol. 23. Issue 6. December 2013. P. 1945–1957.

5. He X., Hua X., Yu K., Xuan W., Lu T., Zhang W., Chen X. Accuracy enhancement of GPS time series using principal component analysis and block spatial filtering. *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 55. Issue 5. March. P. 1316–1327.

6. He X., Montillet J.-P., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*. Vol. 106. 1 May 2017. P. 12–29.

7. Mazurov B. T., Panzhin A. A., Silaeva A. A. Structural modeling obtained by the geodesic given nym displacement by visualizing. *Geodeziia i kartografiia = Geodesy and Cartography*. 2016; 3: 35–40. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-909-3-25-40. (In Russ.)

8. 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.)

9. Boiarskii E. A., Vitushkin L. F., Gerasimenko M. D., Demianov G. V., Kaufman M. B., Kaftan V. I., Mazurova E. M., Malkin Z. M., Molodenskii S. M., Neiman Iu. M., Pevnev A. K., Savinykh V. P., Steblov G. M., Tatevian S. K., Tolchelnikova S. A., Shestakov N. V. Russian national report of the International Association of Geodesy of the International Union of Geodesy and Geophysics of 2007–2010. *Nauki o Zemle = GeoScience*. 2011; 1: 5–36. (In Russ.)

10. Tregub A. I., Shevtsov D. E. Faults in the basement of the eastern part of the Voronezh crystalline massif according to morphometric data. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2020; 1: 30–38. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.1/2511> (In Russ.)

11. Vikulin A. V. Rotational waves in block rotating environments (the case of geomedium). *Protsessy v geosredakh = Processes in Geomedia*. 2016; 7: 194–206. (In Russ.)

12. Mazurov B. T. *Mathematical modelling in the course of geodynamics research*. Novosibirsk: SSUGT Publishing; 2019. (In Russ.)

13. Kolmogorov V. G., Mazurov B. T., Panzhin A. A. An algorithm for estimating the divergence of vector fields of the Earth's surface motion from geodetic data. *Geodeziia i kartografiia = Geodesy and Cartography*. 2018; 79 (10): 46–53. (In Russ.)

14. Mazurov B. T., Mustafin M. G., Panzhin A. A. Estimation method for vector field divergence of earth crust deformations in the process of mineral deposits development. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019; 238 (4): 376–382. (In Russ.)

15. Panzhin A. A., Panzhina N. A., Sashurin A. D. *Present-day geodynamic motions of the Voronezh crystalline massif: database*. Available from: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2020621723&TypeFile=html [Accessed 09 December 2020].

Received 2 September 2020

Information about authors:

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

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

Для цитирования: Панжин А. А., Панжина Н. А. Применение исходных данных постоянно действующих станций для геодинамического районирования // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 54–62. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-54-62

For citation: Panzhin A. A., Panzhina N. A. Applying primary data from permanent stations for geodynamic zoning. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 54–62 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-54-62