

УДК 622.83:622.271

**Мельник Виталий Вячеславович**

кандидат технических наук,  
заведующий отделом геомеханики,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58,  
e-mail: [melnik@igduran.ru](mailto:melnik@igduran.ru)

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ\*

*Аннотация:*

Приведенный в статье пример Джетыгаринского карьера в Республике Казахстан отчетливо показывает возможность с помощью геофизических методов прогнозировать развитие деформационных процессов, принимать меры по укреплению прибортового массива на опасных участках с помощью их осушения и пригрузки, как это было сделано на данном объекте, внутренним отвалом. Построенная с помощью геофизических методов геомеханическая модель карьера позволяет проводить более детальный мониторинг состояния нарушенных участков при минимальных наблюдениях за устойчивым массивом. Сущность мониторинга заключается в исследовании структурного строения прибортового массива карьера методом спектрального сейсмопрофилирования, выявлении опасных по оползневым процессам участков и наблюдении за изменением структуры во времени. Метод спектрального сейсмопрофилирования является оптимальным с точки зрения изучения прибортового массива за счет высокой мобильности производства измерений и хорошей информативности получаемых результатов.

При получении информации об увеличении нарушенного участка по площади и в глубину можно предположить, что в ближайшее время на них может сформироваться деформационный участок, и принять меры для предотвращения аварийной ситуации либо свести к минимуму последствия деформации уступов или борта в целом. Снижение риска аварий при ведении горных работ остается актуальным на протяжении всего периода эксплуатации месторождений, следовательно, и геомеханический мониторинг, позволяющий их предсказать, никогда не потеряет актуальности.

Зная площадь распространения нарушенного массива, можно с достаточной долей уверенности судить о возможном охвате количества уступов при начале деформации и своевременно изменить схему движения транспорта, перенести коммуникации и т.п.

*Ключевые слова:* геомеханический мониторинг, структурно-тектоническое строение, аномалии, обводненность, карьер, устойчивость бортов карьера, оползни, деформации уступов, геофизические методы, спектральное сейсмопрофилирование.

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.036

**Melnik Vitaly V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of department of geomechanics,  
Institute of Mining Ural Branch of RAS  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [melnik@igduran.ru](mailto:melnik@igduran.ru)

### GEOMECHANICAL MONITORING BY GEOPHYSICAL METHODS IN THE DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS BY THE OPEN METHOD

*Abstract:*

The article shows the principle of geomechanical monitoring using ground-based geophysics on the example of the Dzhetysgarinsky quarry in the Republic of Kazakhstan. The essence of the monitoring is to study the structural formation of the quarry array by spectral seismic profiling, identifying areas dangerous for landslide processes, and observing changes of the structure in time. The method of spectral seismic profiling is optimal from the point of view of studying the adjacent rock mass array due to the high mobility of measurement production and good information content of the results obtained.

When receiving information about the increase in the disturbed zone areally and in depth, it can be assumed that in the near future, a deformation zone may form on them, and we should take measures to prevent an emergency situation or to reduce to the minimum consequences of deformation of the ledges as well as the side as a whole. Reducing the risk of accidents during mining operations remains relevant throughout the entire period of field operation, therefore, geomechanical monitoring, which allows them to be predicted, will never lose relevance.

Knowing the area of distribution of the disturbed array, it is possible to learn with a sufficient degree of confidence about the possible coverage of the number of ledges at the beginning of deformation and timely change the traffic pattern, transfer communications, etc.

The example of the Dzhetysgarinsky quarry given in the article clearly shows the possibility of predicting the development of deformation processes using geophysical method, and taking measures to strengthen the instrument array in hazardous areas by draining them and priming them with an internal dump, as it was done at the mentioned facility. The geomechanical model of the quarry constructed using geophysical methods allows more detailed monitoring of the state of disturbed areas, with minimal observations of a stable array.

*Key words:* geomechanical monitoring, structural and tectonic structure, anomalies, waterlogging, quarry, stability of quarry sides, landslides, deformations of ledges, geophysical methods, spectral seismic profiling.

\* Работа выполнена в рамках Госзадания 007-00293-18-00, тема № 0405-2019-0007.

## Введение

Вопрос, в каком состоянии находится в настоящее время борт и уступы карьера, всегда является актуальным при ведении открытых горных работ. В настоящее время разработаны и используются на горных предприятиях новые «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» в редакции № 439 [1], где затрагивается вопрос обязательного ведения геомеханического мониторинга с созданием рабочей группы на самих предприятиях либо с привлечением научно-исследовательских организаций.

В принципе ничего при этом не изменилось, однако появились новые требования к организации работ внутри самого предприятия, т.е. функции, которые всегда возлагались на маркшейдерский отдел, должны представляться в виде отчета рабочей группы по проведению геомеханического мониторинга.

Вскоре должны быть выпущены методические рекомендации по использованию этих правил, где будут подробно изложены все нюансы нового документа, поэтому в настоящей статье речь пойдет об одном из вариантов ведения геомеханического мониторинга, а именно о проведении геофизических исследований по определению структурно-тектонических параметров уступов бортов карьеров и изменения их во времени с возможностью выявления участков, где наиболее вероятны процессы сползания и обрушения горной массы.

Несмотря на то что обязательных требований к данному виду мониторинга нет в новом документе, получаемые с его помощью результаты можно использовать для организации маркшейдерских наблюдений на проблемных участках и своевременно принимать решения по предотвращению или минимизации последствий аварийных ситуаций, связанных с нарушением целостности уступов и бортов.

Опыт использования в качестве инструмента геомеханического мониторинга геофизического метода спектрального сейсмопрофилирования (ССП) [2, 3] показал, что с его помощью хорошо прослеживаются структурные особенности прибортового массива и при должной привязке профильных линий с высокой точностью можно проводить повторные наблюдения и тем самым контролировать изменения, происходящие во времени.

### *Описание объекта исследований*

Объектом исследований выступает карьерное пространство Джетыгаринского месторождения хризотил-асбеста, расположенное в Костанайской области Республики Казахстан.

Специфика Джетыгаринского месторождения определяется его генезисом и сложившимися горно-геологическими и геомеханическими условиями разработки. Месторождение приурочено к глубинному меридиональному разлому шириной около 3 км. Протяженность самого месторождения, находящегося в этом разломе, составляет около 18 км, промышленная концентрация полезного ископаемого прослеживается на глубину 500 – 800 м.

Разрабатываемый в настоящее время Джетыгаринским карьером участок имеет протяженность около 4-х км в общей протяженности месторождения. Мощность рудоносной зоны на севере разрабатываемого участка находится в пределах 80 – 100 м, а на южном фланге достигает 450 – 500 м. Проектом первой очереди, по которому работает предприятие, предусматривается предельная глубина горных работ 390 м (абсолютная отметка -100 м) при современных глубинах горных работ около 280 – 290 м. Перспективными планами глубина разработок предусматривается до 550 м.

Месторождение приурочено к скальному трещиноватому комплексу пород, требующих при разработке применение буровзрывных работ. Асбестовые руды и вмещающие породы месторождения представлены перидотитами, серпентинитами с ядрами

перидотитов и серпентинитами. Породы и руды в тектонических зонах прорваны дайками диоритовых порфиритов и плагиогранит-порфиров.

#### *Проведенные исследования*

Исследования структурно-тектонического строения Джетыгаринского карьера проводились в течение трех лет (2014 – 2016 гг.), профильные линии в основном дублировали друг друга с изменением очертаний в связи с развитием горных работ на карьере. На рис. 1 представлен пример получаемой при проведении спектрального сейсмопрофилирования информации о структурном строении, вынесенной на фото борта карьера.

На рис. 2 представлена полученная в процессе трехлетнего цикла наблюдений структурно-тектоническая модель карьера. На ней разными цветами выделены тектонически нарушенные зоны, выявленные в различные периоды времени.

Геофизические исследования, проведенные на участке, показали, что борта карьера разбиты серией структурных нарушений и часть карьерного поля находится в дезинтегрированном состоянии.

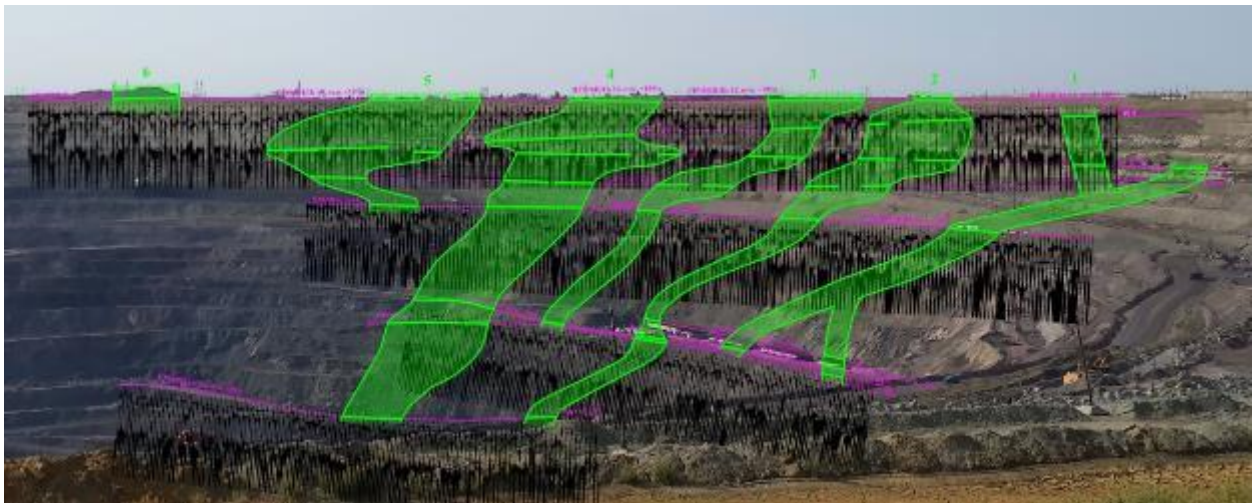


Рис. 1. Структурная схема массива горных пород по результатам исследования с земной поверхности (зеленым цветом выделены выявленные структурные нарушения прибортового массива)

По результатам геофизических исследований 2016 г. была уточнена структурная модель прибортового массива. Подтверждено, что в структурном строении массива горных пород также имеет место неоднородность. В бортах карьера присутствуют зоны с повышенной трещиноватостью пород, в подавляющем большинстве согласующиеся с тектоническими нарушениями.

При этом измерениями не выявлено тектонических нарушений, которые могут непосредственно привести к катастрофическим процессам в прибортовом массиве, однако неоднородность массива и его трещиноватость могут привести к возникновению на локальных участках, выделенных на рис. 2, деформационных процессов и повышенной обводненности массива.

Наибольший интерес в 2017 г. был проявлен к восточному борту карьера, где удалось в 2016 г. по ежегодному приросту нарушений участка спрогнозировать проявление оползневого процесса. На рис. 2 этот участок показан.

Из рис. 2 видно, что выделенная по результатам исследований 2016 г. область совпадает с тектоническим нарушением субмеридионального простирания, что является дополнительным негативным фактором к выявленной структурной нарушенности прибортового массива.

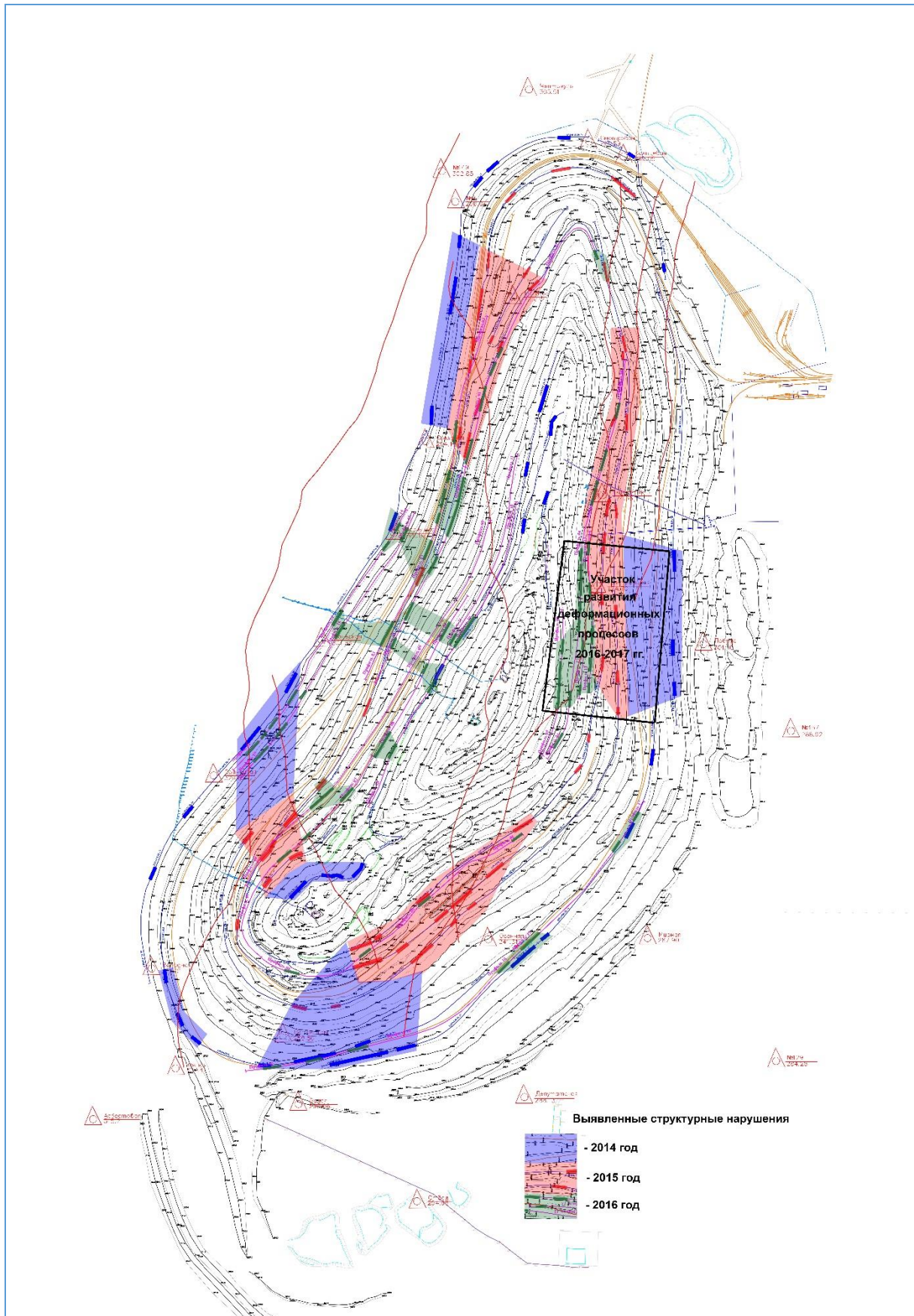


Рис. 2. Тектонически нарушенные области прибортового массива Джетыгаринского карьера

Во второй половине 2016 г. на этом участке начала развиваться трещиноватость, повлекшая за собой образование трещины. Раскрытие основной трещины сдвига происходило постоянно с момента ее обнаружения в 2016 г., когда ее ширина была в пределах 0,5 – 0,6 м (рис. 3), а в 2017 г. ширина ее достигала 5 – 6 м (рис. 4).

Характер деформирования на этом участке имеет свою специфику, связанную со свойствами пород, со структурными особенностями. Для Джетыгаринского карьера специфика процесса деформирования связана с параметрами залегания серии тектонических нарушений, к одному из которых приурочено образование сдвигового разрушения массива горных пород. Простирание их близко к борту карьера, а падение – вглубь прибортового массива.



Рис. 3. Раскрытие трещины в 2016 г.



Рис. 4. Раскрытие трещины в 2017 г.

### *Результаты исследований*

Как показал опыт проведения геомеханического мониторинга карьерного пространства Джетыгаринского месторождения, своевременное выполнение структурной диагностики, особенно при сопоставлении результатов измерений в различные периоды времени, позволяет прогнозировать возможность деформирования уступов и принимать меры для минимизации последствий аварийных ситуаций.

В приведенном примере структурная нарушенность сопровождается повышенной обводненностью породного массива, что значительно снижает устойчивость уступов. Для минимизации влияния обводненности на прибортовой массив специалистами отдела геомеханики ИГД УрО РАН проведены работы по поиску источника поступления воды и пробурены скважины водопонижения, однако длительность оформления разрешительных документов на использование построенного водозабора не позволяет его запустить в ближайшее время. При этом эксперименты по запуску скважины показали эффективность водопонижения на всем протяжении участка поверхности, прилегающего к восточному борту.

Для поиска источников поступления воды также использовались результаты геомеханического мониторинга геофизическими методами и дополнительные работы за пределами карьерного поля. Учитывая, что вода, поступающая в карьер, оказалась приурочена к закарстованному известняковому массиву [4 – 6], метод спектрального сейсмопрофилирования в совокупности с электроразведкой позволил с высокой точностью определить пути ее движения, определить необходимую глубину бурения и скважины расположить в оптимальных условиях.

Кроме осушения, в процессе проведения исследований оползневых процессов восточного борта были даны рекомендации по созданию внутреннего отвала в нижней части оползневого участка, который помогает в настоящее время поддерживать борт в устойчивом состоянии.

### *Заключение*

Изменения напряженно-деформируемого состояния массива горных пород провоцируют подвижность геоблоков с образованием структурно нарушенных областей [7 - 10], обладающих повышенной трещиноватостью и пониженной устойчивостью. Наиболее продуктивными и информативными методами структурного анализа массива горных пород являются геофизические методы. Для использования в карьере за счет своей мобильности и высокой информативности хорошо себя зарекомендовал метод спектрального сейсмопрофилирования, прошедший большое количество промышленных экспериментов на различных горных предприятиях.

Основной задачей геомеханического мониторинга является своевременное выявление изменений в состоянии бортов и уступов карьера, в том числе и изменений его структурного строения для обеспечения безопасного ведения горных работ. Выявление происходящих изменений невозможно без точной привязки получаемых структурных аномалий к исследуемой территории, поэтому при проведении полевых работ всегда используются мобильные средства геодезической привязки с помощью средств спутниковой геодезии.

Нарушение восточного борта карьера произошло на заранее отмеченном участке, потенциально опасном по структурному фактору, являющимся одним из важных условий возможного разрушения массива горных пород в бортах карьера. Проведение геофизических исследований в мониторинговом режиме позволяет своевременно выявить развитие деформационных процессов.

Кроме карьеров, данный вид мониторинга успешно используется на территориях, подработанных подземными горными выработками [11, 12]. Особенно актуально это на участках недропользования, где планируется строительство зданий и сооруже-

ний, либо там, где деформации земной поверхности представляют опасность для уже построенных и эксплуатируемых объектов инфраструктуры.

### Список литературы

1. *Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов*, 2020. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140211> (дата обращения 11.01.2022)
2. Мельник В.В., 2005. Применение метода спектрального сейсмопрофилеирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 69 - 74.
3. Гликман А. Г., 2018. *Физика и практика спектральной сейсморазведки*. URL: <https://newgeophys.spb.ru/ru/book/> (дата обращения 11.01.2022)
4. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2018. Осушение рудных тел в условиях повышенной обводненности и закарстованности налегающей толщи. *Проблемы недропользования*, №1 (16), С. 105 - 111. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.105.
5. Шевченко М.Д., 2021. Определение закономерностей расположения тектонических нарушений для прогноза проницаемости массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 — 2, С. 174—180. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_174.
6. Мельник В.В., 2010. Диагностика карстопроявлений при проведении инженерно-геологических изысканий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 275 - 278.
7. Адигамов А.Э., Юденков А.В., 2021. Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 8, С. 93 – 103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_93.
8. Sepehri M., Apel D., Liu W., 2017. Slope stability assessment and effect of horizontal to vertical stress ratio on the yielding and relaxation zones around underground open slopes using empirical and finite element methods. *Archives of Mining Science*, Vol. 62, No 3, pp. 653 – 669.
9. Zanutta A., Negusini M., Vittuari L., Cianfarra P., Salvini F. et al., 2017. Monitoring geodynamic activity in the Victoria Land, East Antarctica: Evidence from GNSS measurements. *Journal of Geodynamics*, Vol. 110, P. 31 - 42.
10. Тагильцев С.Н., 2018. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 55 - 60.
11. Усанов С.В., Мельник В.В., Замятин А.Л., 2013. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 6, С. 83 - 89.
12. Усанов С.В., 2011. Методика оценки безопасности застройки территорий над старыми горными выработками. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S11, С. 260 - 266.

### References

1. Pravila obespecheniya ustoichivosti bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov [Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps], 2020. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140211> (data obrashcheniya 11.01.2022)
2. Mel'nik V.V., 2005. Primenenie metoda spektral'nogo seismoprofilirovaniya dlya otsenki geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornykh porod vokrug shakhtnykh vyrobotok [Application of the spectral seismic profiling method to assess the geomechanical

state of rock mass around the mine workings]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 10, P. 69 - 74.

3. Glikman A. G., 2018. Fizika i praktika spektral'noi seismorazvedki [Physics and practice of spectral seismography]. URL: <https://newgeophys.spb.ru/ru/book/> (data obrashcheniya 11.01.2022)

4. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2018. Osushenie rudnykh tel v usloviyakh povyshennoi obvodnennosti i zakarstovannosti nalegayushchei tolshchi [Drainage of ore bodies in conditions of increased waterlogging and karstification of the overlying strata.] . Problemy nedropol'zovaniya, №1 (16), P. 105 - 111. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.105.

5. Shevchenko M.D., 2021. Opredelenie zakonomernosti raspolozheniya tektonicheskikh narushenii dlya prognoza pronitsaemosti massiva gornykh porod [Determination of regularities of the location of tectonic disturbances for prediction of the permeability of rock mass]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5 — 2, P. 174—180. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_174.

6. Mel'nik V.V., 2010. Diagnostika karstoproiavlenii pri provedenii inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy [Diagnostics of karst phenomena during engineering and geological surveys]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 7, P. 275 - 278.

7. Adigamov A.E., Yudenkov A.V., 2021. Model' napriazhenno-deformirovannogo sostoianiya narushennogo porodnogo massiva s uchetom anizotropii i neodnorodnosti [A model of the stress-strain state of a disturbed rock mass, taking into account anisotropy and inhomogeneities]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 8, P. 93 – 103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_8\_0\_93.

8. Sepehri M., Apel D., Liu W., 2017. Slope stability assessment and effect of horizontal to vertical stress ratio on the yielding and relaxation zones around underground open slopes using empirical and finite element methods. Archives of Mining Science, Vol. 62, No 3, pp. 653 – 669.

9. Zanutta A., Negusini M., Vittuari L., Cianfarra P., Salvini F. et al., 2017. Monitoring geodynamic activity in the Victoria Land, East Antarctica: Evidence from GNSS measurements. Journal of Geodynamics, Vol. 110, P. 31 - 42.

10. Tagil'tsev S.N., 2018. Zakonomernosti prostranstvennogo raspolozheniya tektonicheskikh narushenii v pole sovremennogo napryazhennogo sostoyaniya zemnoi kory. Izvestiya vuzov [Regularities of spatial distribution of tectonic disturbances in the field of the present stress state of the earth's crust]. Gornyi zhurnal, № 7, P. 55 - 60.

11. Usanov S.V., Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2013. Monitoring transformatsii struktury gornogo massiva pod vliyaniem protsessa sdvizheniya [Monitoring of structure transformation of the mountain range under the influence of the process of displacement]. Fiziko-tekhnicheckie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 6, P. 83 - 89.

12. Usanov S.V., 2011. Metodika otsenki bezopasnosti zastroiki territorii nad starymi gornymi vyrabotkami [Methodology for assessing the safety of the development of territories over old mine workings]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S11, P. 260 - 266.