

## ГЕОМОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРНЫХ ОТКОСОВ

### *Фарит Камалович Низаметдинов*

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56/2, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: niz36@mail.ru

### *Мурат Газизович Мустафин*

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии, тел. (812)328-8486, e-mail: mustafin@spmi.ru

### *Сергей Георгиевич Ожигин*

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56/2, доктор технических наук, профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: s.ozhigin@kstu.kz

### *Асем Сериккызы Туякбай*

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, докторант, тел. (7212)56-26-27, e-mail: assem\_jan@mail.ru

Разработка геомеханического мониторинга состояния прибортовых массивов карьеров является актуальной задачей по прогнозу и обеспечению устойчивости карьерных откосов. Этому предшествует детальное изучение горно-геологической ситуации прибортовых массивов, закладка опорных и рабочих реперов, методика производства измерений и анализ полученных величин смещений прибортовых массивов. Особое внимание уделено анализу точности инструментальных наблюдений с помощью электронного тахеометра и оптического отражателя, а также выявлению оптимальных схем наблюдений на карьере, позволяющих установить рациональные параметры производства измерений. Установлено расстояние между отражателем и тахеометром, равное 500 м, которое позволяет вести измерения в пределах  $\pm 3$  мм. Предлагаемая методика измерений апробирована на карьере Казахстана.

**Ключевые слова:** деформация, устойчивости, карьер, откос, массив, геомеханика.

## GEOMONITORING OF STABILITY STATE OF CAREER SLOPES

### *Farit K. Nizametdinov*

Karaganda State Technical University, 56/2, N.Nazarbayev Ave., Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, D. Sc., Professor, Department of Mine Surveying and Geodesy, phone: (7212)56-26-27, e-mail: niz36@mail.ru

### *Murat G. Mustafin*

Saint-Petersburg Mining University, 21 line, d.2, Vasilyevsky Island, 199106, Russia, St. Petersburg, D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy, phone: (812)328-8486, e-mail: mustafin@spmi.ru

***Sergey G. Ozhigin***

Karaganda State Technical University, 56/2, N.Nazarbayev Ave., Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, D. Sc., Professor, Department of Mine Surveying and Geodesy, phone: (7212)56-26-27, e-mail: s.ozhigin@kstu.kz

***Asem Serikkyzy Tuyakbai***

Karaganda State Technical University, 56. Peace Boulevard, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, Doctoral Student of the Department of Development of mineral deposits, phone: (7212)56-26-27, e-mail: assem\_jan@mail.ru

The development of geomechanical monitoring of the state of near-surface arrays of quarries is an urgent task for predicting and ensuring the stability of quarry slopes. This is preceded by a detailed study of the geological and geological situation of instrument massifs, the laying of reference and working benchmarks, the methodology for measuring and analyzing the obtained displacements of instrument massifs. Particular attention is paid to the analysis of the accuracy of instrumental observations with the help of an electronic total station and an optical reflector, as well as to the identification of optimal observation schemes at the quarry, which make it possible to establish rational parameters for making measurements. The distance between the reflector and the total station is set to 500m, which allows measurements to be made within  $\pm 3$  mm. The proposed measurement technique was tested in the quarries of Kazakhstan.

**Key words:** deformation, stability, quarry, slope, massif, geomechanics.

***Введение***

Своевременная разработка мероприятий по управлению устойчивостью прибортовыми массивами во многом зависит от достоверности знаний прочностных свойств горных пород, условий залегания пород и причин, вызывающих возникновение нарушений в карьерных откосах [1, 2]. Прогнозирование и обеспечение устойчивости откосов является одной из главных задач при ведении открытых горных работ [3–7]. При учете факторов, влияющих на устойчивость карьерных откосов, необходимо знать:

- вид и активность процесса разрушения;
- периодичность нарушения;
- параметры деформирования откоса;
- характер разрушения объекта;
- характеристику и условия залегания пород;
- характер и конфигурацию поверхности разрушения.

Необходимую информацию возможно получить на основе систематических инструментальных наблюдений, которые служат для прогноза устойчивости откосов уступов и бортов карьеров.

Требования к производству маркшейдерских наблюдений за состоянием откосов на карьерах изложены в методических указаниях [8, 9]. Инструментальные наблюдения на проектных контурах бортов карьеров проводятся с целью изучения закономерностей развития деформаций бортов с самого начала их образования. По результатам наблюдений можно выявить характер и оценить степень опасности деформирования, дать прогноз относительно его дальнейшего развития. Точность инструментальных наблюдений должна быть максимально высокой.

Существующие способы маркшейдерского контроля за состоянием прибортовых массивов на карьерах основаны на определении относительных смещений контрольных пунктов автоматически измерительными приборами с дистанционной передачей информации, геометрическим нивелированием, трилатерацией, измерением расстояний по профильным линиям электронными тахеометрами, специальной наземной фототеодолитной съемкой или лазерным сканированием [10].

Первый из приоритетных способов является наиболее перспективным, хотя в настоящее время этот способ используется в основном для контроля конструкций уникальных сооружений (плотины, дамбы и т. д.), в остальных приведенных способах присутствует трудоемкая работа, которая связана с большим объемом закладки рабочих реперов на бермах и установкой на них маркшейдерских приборов.

Критерием правильности ранее принятых технологических решений по параметрам карьерных откосов является высокоточный инструментальный контроль за состоянием бортов карьеров и отвалов, поэтому его также необходимо включить в единую систему маркшейдерских и инженерно-геологических исследований. В результате комплексных исследований можно проводить оценку и прогноз геомеханических процессов, происходящих в прибортовых массивах карьера и разработку рекомендаций по параметрам карьерных откосов с целью повышения эффективности и безопасности ведения горных работ [6, 12].

Целью геомониторинга на карьерах является надежный контроль состояния устойчивости уступов и бортов при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом, сложенных скальными, полускальными, глинистыми и песчано-глинистыми породами.

В соответствии с этим определением, геомеханический мониторинг – это комплексная система, включающая:

- периодические высокоточные, маркшейдерские и инженерно-геологические наблюдения за состоянием откосов прибортовых массивов на карьерах;
- исследования инженерно-геологических характеристик состава и свойств горных пород, а также изучение структурных особенностей прибортовых массивов;
- оценку и прогноз геомеханических процессов, происходящих в массиве;
- определение параметров устойчивых откосов на основе создания адекватной геомеханической модели массива;
- разработку рекомендаций по оперативному изменению параметров бортов карьера и отвалов с целью повышения эффективности и безопасности ведения открытых горных работ.

### *Проведение наблюдений*

Использование электронного тахеометра при инструментальных наблюдениях позволяет определять положение рабочих реперов в пространстве и построить картину векторного смещения реперов с учетом времени. Точность передачи

высотной отметки электронным тахеометром определяется погрешностью вычисления превышения тригонометрическим нивелированием по формуле [11]:

$$m_h^2 = L^2 \cos^2 \delta \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_L^2 \sin^2 \delta + 2m_v^2, \text{ мм}, \quad (1)$$

где  $m_\delta$ ,  $m_L$ ,  $m_v$  – средние квадратические погрешности вертикального угла, расстояния и высоты инструмента и отражателя.

Для электронного тахеометра Leica TC1201 среднеквадратические ошибки данных величин составляют  $m_\delta = 1''$ ;  $m_L = 2 \text{ мм} \pm 0,5L \text{ мм/км}$ ;  $m_v = 1 \text{ мм}$ .

Первое слагаемое правой части является погрешностью превышения, обусловленной погрешностью измерения вертикального угла  $\delta$  не превышающего величины более  $45^\circ$ . По результатам проведенных исследований составлен график влияния вертикального угла на точность определения высотной отметки репера (рис. 1). Из графика видно, что погрешности определения превышений при вертикальных углах в  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  имеют практически одинаковое значение на расстоянии до 500 м, поэтому при измерениях необходимо выдерживать эту величину.

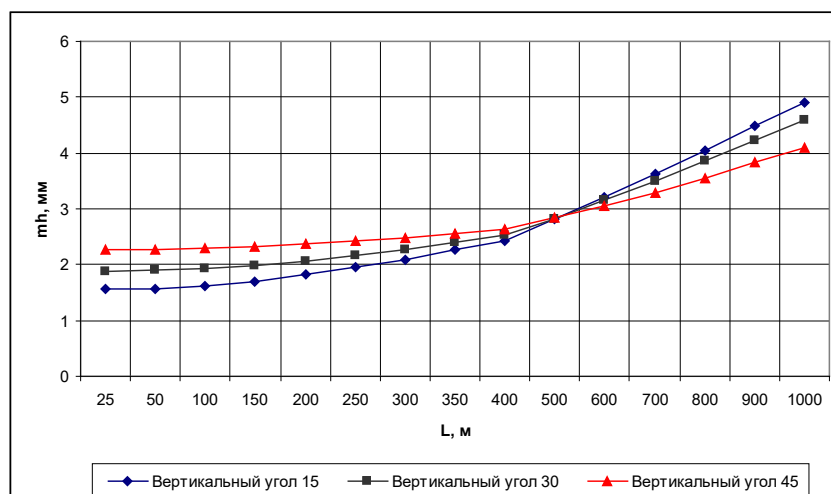


Рис. 1. Влияние вертикального угла на точность определения высотной отметки репера

Погрешность планового положения рабочих реперов определяется формулой:

$$m_P^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 + m_L^2 + m_{Ц}^2 + m_\Phi^2 + m_{ИСХ}^2, \text{ мм}, \quad (2)$$

где  $m_\beta$  – ошибка измерения горизонтального угла;  
 $m_L$  – ошибка определения расстояния;

$M_{Ц}$  – ошибка центрирования;

$M_{Ф}$  – ошибка фиксирования отражателя;

$M_{исх}$  – ошибка исходных данных.

Погрешность фиксации отражателя на рабочих реперах зависит от исполнителя, что вызывает необходимость использования жестких отвесов для центрирования отражателя над репером. В этом случае установку отражателя можно выполнить с точностью  $\pm 0,5$  мм. Ошибка лазерного центрирования тахеометра составляет  $\pm 0,5$  мм. Влияние ошибок исходных данных  $m_{исх}$  для способа полярных координат и линейно-угловых засечек разные, поэтому они определены для каждого случая отдельно. Так, по способу полярных координат она составляет  $m_{исх} = \pm 2,86$  мм, а для линейно-угловой засечки  $m_{исх} = \pm 2,46$  мм.

Анализ способов определения положения реперов показал, что при использовании способа двукратной полярной засечки и линейно-угловой засечки результаты практически одинаковы, и можно использовать как первый, так и второй способ. Ошибка определения положения рабочего репера способом полярных координат с учетом влияния всех составляющих будет равна  $m_p = \pm 4,1$  мм.

Расчет ожидаемой ошибки произведен для рабочего репера, удаленного от опорного на расстояние 500 м, а измерение углов выполнено при трех приемах.

Зная ошибки определения превышения и планового положения рабочих реперов, можно вычислить общую ошибку положения репера при измерении электронным тахеометром, которая составит  $M_{общ} = \pm 4,9$  мм.

Соблюдение этого условия при определении положения исходных реперов в текущих и перспективных систематических наблюдениях позволяет иметь единый подход и одинаковую точность измерения.

Для высокоточных инструментальных наблюдений с использованием электронного тахеометра разработаны схемы ведения наблюдений по профильной линии за рабочими реперами с опорных и связующих точек, которые позволяют обеспечить требуемую точность при различных горно-технических условиях разработки месторождений (рисунки 2, 3 и 4).

При проведении систематических инструментальных наблюдений на карьерах одним из важных условий для быстрой, точной и безошибочной работы является разработка единой схемы привязки и ориентирования опорных и связующих реперов профильных линий для оператора электронного тахеометра и схемы расположения рабочих реперов относительно опорных точек для маркшейдерских рабочих с отражателями.

Предложен новый способ наблюдения за состоянием прибортового массива путем заложения в откосе уступа репера с отражающей пластиной, использующий технологию импульсных измерений на основе безотражательной функции электронного тахеометра.

Для этого способа разработана схема ведения наблюдения, где рабочие репера располагаются по всей длине профильной линии, а опорный репер в основании карьера или на противоположном борту карьера в створе рабочих реперов с учетом угла визирования на пластины не более  $30^0$ .

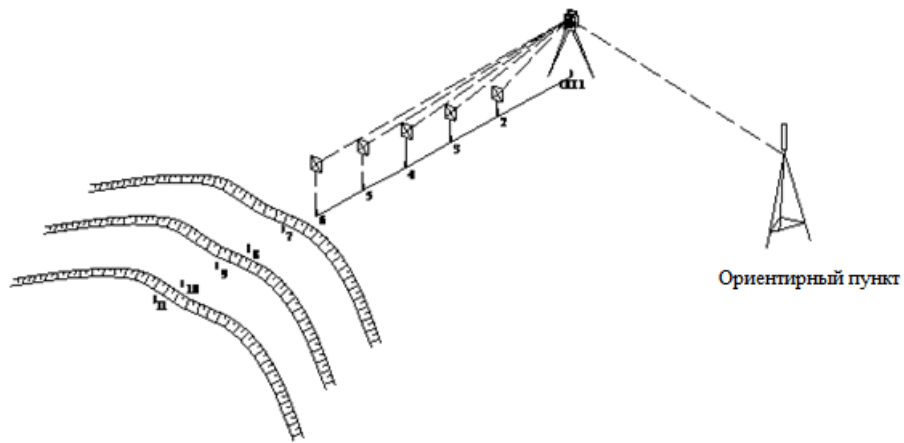


Рис. 2. Схема наблюдения по створу

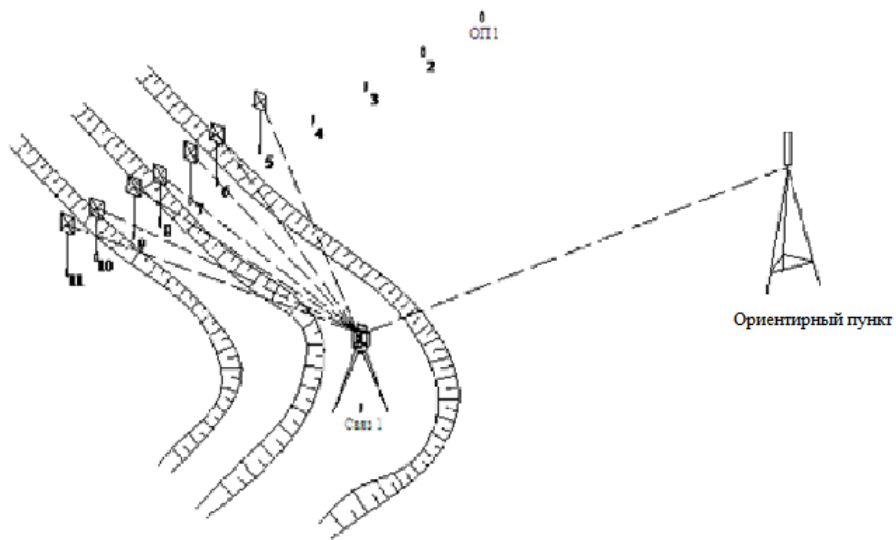


Рис. 3. Схема наблюдения со связующих точек

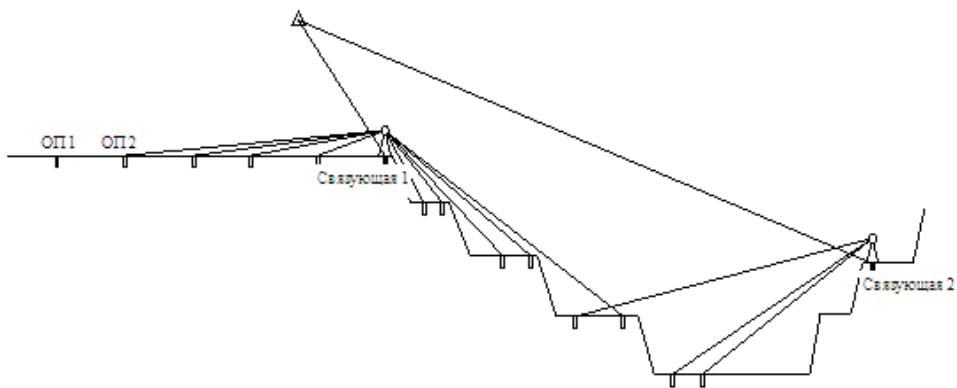


Рис. 4. Схема наблюдения с противоположного борта карьера

Предложен новый способ наблюдения за состоянием приборного массива путем заложения в откосе уступа репера с отражающей пластиной, использующий технологию импульсных измерений на основе безотражательной функции электронного тахеометра.

Для этого способа разработана схема ведения наблюдения, где рабочие репера располагаются по всей длине профильной линии, а опорный репер в основании карьера или на противоположном борту карьера в створе рабочих реперов с учетом угла визирования на пластины не более  $30^{\circ}$ .

Для интерпретации достоверных и точных результатов измерения выполнено исследование точности измерения безотражательным электронным тахеометром при наведении на отражающую поверхность пластины. Угол наклона пластины колебался от вертикали до  $60^{\circ}$ , а расстояние между прибором и пластиной до 400 м.

Исследуем точность передачи высотной отметки, которая определяется по формуле (1) тригонометрического нивелирования с корректировкой для безотражательного электронного тахеометра, обусловленной погрешностью измерения вертикального угла  $\delta$ , который при измерениях должен достигать величины не более  $30^{\circ}$  на расстоянии до 400 м. При этом ошибка составляет  $m_h = 2,79$  мм.

Погрешности определения положения рабочих реперов по способам полярных координат и линейно-угловых засечек на расстоянии 400 м составляют соответственно  $m_{исх} = \pm 4,15$  мм и  $m_{исх} = \pm 2,58$  мм. Ошибка определения положения рабочего репера способом полярных координат с учетом влияния всех составляющих, выраженная формулой (2), будет равна  $m_p = \pm 5,8$  мм. В этом случае общая ошибка измерения электронным тахеометром составит  $M_{общ} = \pm 6,4$  мм.

Создание автоматизированной системы маркшейдерских наблюдений на карьере позволяет по постоянно обновляемым параметрам приборного массива производить прогнозы его состояния с высокой степенью достоверности, тем самым возникает возможность постановки бортов карьеров под максимально крутыми углами наклона со значительным сокращением объемов вскрышных работ [13–16].

Основой этой системы является программное обеспечение, состоящее из двух основных сегментов, – модуля сбора данных о происходящих на наблюдаемом объекте деформациях при собственно автоматизированных наблюдениях и модуля анализа полученных данных. Реализация разработанного методического подхода к производству инструментальных наблюдений за состоянием приборных массивов карьера осуществлена на ряде месторождений полезных ископаемых: железорудные Соколовско-Сарбайское (рис. 5), Куржункульское, Качарское, Кентобе и Атансор; марганцевые Жайремское (Ушкатын-III), Тур, Богач и Восточный Камыс и меднорудные Жезказганские рудники Нурказган, Акбастау, Абыз.

На карьерах произведен выбор участков закладки реперов наблюдательных станций на основе анализа геомеханической обстановки бортов карьера. Определена конструкция и длина профильных линий. Разработана конструкция наблюдательных и контрольных пунктов, опорных и рабочих реперов

профильных линий. Общее количество профильных линий системы геомониторинга карьеров АО «ССГПО» – 41, в том числе по карьерам: Сарбайский – 10 профилей, Соколовский – 15 профилей, Качарский – 16 профилей. Общее количество реперов – 1728 шт., из них опорных реперов – 50 шт., в том числе по карьерам: Сарбайский – 575 реперов, из них опорных – 14, Соколовский – 397, из них опорных – 16, Качарский – 756 реперов, из них – опорных – 20.

По заложенным реперам профильных линий наблюдательных станций сотрудниками кафедры маркшейдерского дела и геодезии КарГТУ при непосредственном участии специалистов АО «ССГПО» выполнена первая серия инструментальных маркшейдерско-геодезических наблюдений за состоянием устойчивости бортов карьеров и отвалов с использованием роботизированного электронного тахеометра TCA 1202 (Leica Geosystems, Швейцария). Применение данного электронного тахеометра позволило автоматизировать процесс измерений и исключить погрешность наведения электронного геодезического прибора на отражательные призмы (рис. 6).

Наблюдения за состоянием прибортовых и отвальных массивов необходимо проводить не реже 2-х раз в год, соответственно требованиям инструкций. В период между сериями инструментальных измерений должны производиться систематические натурные, визуальные наблюдения за состоянием прибортовых и отвальных массивов геомеханической службой предприятия АО «ССГПО».



Рис. 5. Деформации западного борта Соколовского карьера



Рис. 6. Инструментальный контроль западного борта Соколовского карьера

### *Анализ результатов*

Создание системы геомониторинга за состоянием устойчивости прибортовых и отвальных массивов Сарбайского, Соколовского и Качарского карьеров позволяет повысить эффективность разработки железорудных месторождений открытым способом, обеспечить безопасные условия труда и бесперебойный режим работы горнодобывающих предприятий АО «ССГПО».



Подобные инструментальные наблюдения за состоянием прибортовых массивов проводились в условиях Жайремского ГОК – карьеры Ушкатын-III, Жайрем и Жомарт. Анализ результатов геомониторинга состояния прибортовых массивов карьеров, проводимого на девяти наблюдательных станциях в течение четырех лет (2002–2005 г.г.) показал, что отклонения координат рабочих реперов станций от их начального положения находятся в пределах точности измерений. Деформации отдельных уступов на карьерах имеют широкое распространение, тогда как деформации бортов в целом не установлено.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М., 1965. – 378 с.
2. Попов И. И., Окатов Р. П. Борьба с оползнями на карьерах. – М., 1980. – 239 с.
3. Галустьян Э. Л. Управление геомеханическими процессами на карьерах. – М., 1980. – 237 с.
4. Ильин А. И., Гальперин А. М., Стрельцов В. И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах. – М., 1985. – 248 с.
5. Попов И. И., Низаметдинов Ф. К., Окатов Р. П., Долгоносков В. Н. Природные и техногенные основы управления устойчивостью уступов и бортов карьеров. – Алматы: Гылым, 1997. – 216 с.
6. Состояние и перспективы развития геомеханического обеспечения открытых горных работ / Ф. К. Низаметдинов, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина, Н. Ф. Низаметдинов, Е. Н. Хмырова // «Международный конгресс Маркшейдеров», 16-20 сентября 2013 г. – Аахен, Германия. – С. 338-349.
7. Низаметдинов Ф. К. и др. Устойчивость техногенных горных сооружений. – Караганда, 2013. – 670 с.
8. Правила обеспечения устойчивости бортов угольных разрезов. Санкт-Петербург, 1998г., ВНИМИ
9. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. г.Астана МЧС РК за №89 от 22.09.2008 г.
10. Ожигин С. Г. Управление устойчивостью прибортовых массивов на карьерах Казахстана. – Караганда : Санат-полиграфия, 2009. – 44 с.
11. Низаметдинов Ф. К., Портнов В. С., Низаметдинов Н. Ф. Современные способы инструментальных наблюдений за состоянием карьерных откосов. – Караганда : Санат-Полиграфия, 2007. – 77 с.
12. Попов В. Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л. Управление устойчивостью карьерных откосов. – М. : МГГУ, «Горная книга», 2008. – 683 с.
13. Низаметдинов Ф.К., Низаметдинов Н.Ф и др. Геомеханика при открытой разработке. – Караганда : КарГТУ, 2019. – 98 с.
14. Натурные методы исследования прочностных свойств горных пород и породных контактов / Ф. К. Низаметдинов, А. А. Нагибин, В. В. Левашов, Р. Ф. Низаметдинов, Н. Ф. Низаметдинов, А. Е. Касымжанова // ФГПРПИ. – 2016. – № 2. – С. 26-33.
15. Заровняев Б. Н., Шубин Г. В., Васильев И. В. Использование лазерного сканирования для исследования геомеханического состояния бортов карьеров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – №5 (5). – С. 76-77.
16. Низаметдинов Ф. К., Долгоносков В. Н., Старостина О. В. Исследование устойчивости откосов уступов и бортов карьеров при укреплении их смолами // Известие вузов. Горный журнал. – 2006. – №1. – С. 56-60.

17. Использование технологии лазерного сканирования для наблюдения за состоянием устойчивости прибортовых массивов / Ф. К. Низаметдинов, Е. Н. Хмырова, О. Г. Бесимбаева, Н. Ф. Низаметдинов, Е. А. Олейникова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 156–160.

18. Мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьеров: монография / Ф. К. Низаметдинов, С.Г. Ожигин, С.Б. Ожигина, В.Н.Долгоносков, К. Радей, Г. Станькова // Научно - исследовательский геодезический, топографический и картографический институт, пгт. Здибы. – Чешская Республика, Здибы, 2015. – 350 с.

19. Тұяқбай Ә. С., Сатбергенова А. К., Естаева А. Р. Цифровые технологии в горнодобывающей промышленности // Международная научно-практическая конференция «Рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях Индустрии 4.0», Казахстана, Алматы. – 2019. – С. 469-473.

20. Мониторинг и повышение эффективности работы карьеров / Ә. С. Тұяқбай, А. К. Сатбергенова, М. Б. Игемберлина, К. Копбаев // Труды Международного форума маркшейдеров «Цифровые технологии в геодезии, маркшейдерии и геомеханике», Казахстан, Караганда. – 2019. – С. 222- 226.

© Ф. К. Низаметдинов, М. Г. Мустафин, О. Г. Ожигин, А. С. Туякбай, 2020