



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

ГЕОДЕЗИЯ
ГЕОДЕЗИЯ
GEODESY

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_52
MPHTI 36.23.31

В.В. Казанцева¹, Д.С. Ожигин², В.Н. Долгоносков³

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
г. Караганда, Казахстан

¹E-mail: kazantseva.v@kstu.kz*

²E-mail: ozhigin.dima@kstu.kz

³E-mail: vnd070765@mail.ru

ПРОЕКТ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БАС

ҰҒА ҚОЛДАНА ОТЫРЫП АЭРОФОТОТҮСІРІЛІМ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША КАРЬЕР БОРТТАРЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫНЫҢ ЖАЙ КҮЙІН БАҚЫЛАУ СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ЖОБАСЫ

THE PROJECT OF OBSERVATION STATIONS FOR THE STATE OF STABILITY OF THE SIDES OF THE QUARRY ACCORDING TO AERIAL PHOTOGRAPHY USING UAS

Аннотация. Данная статья представляет исследование и разработку системы наблюдательных станций, предназначенных для мониторинга состояния устойчивости бортов карьера в горнодобывающей промышленности. Методика геодезического мониторинга основана на использовании беспилотных авиационных систем (БАС) и аэрофотосъемки для сбора данных и анализа состояния карьера. В статье подробно описываются этапы разработки и внедрения данной методики, включая выбор аппаратуры, разработку программного обеспечения, маршрутизацию полетов, обработку данных, визуализацию результатов и меры по обеспечению безопасности. Целью данной работы является повышение безопасности и устойчивости в горнодобывающей индустрии, а также содействие экологической устойчивости природной среды.

Ключевые слова: карьер, борт, аэрофотосъемка, наблюдательная станция, деформация.

Аңдатпа. Бұл мақала тау-кен өнеркәсібіндегі Карьер борттарының тұрақтылығының жай-күйін бақылауға арналған бақылау станциялары жүйесін зерттеу мен әзірлеуді ұсынады. Геодезиялық мониторинг әдістемесі мәліметтерді жинау және карьер жағдайды талдау үшін ұшқышсыз ұшу жүйелерін (ҰҰЖ) және аэрофототүсірілімдерді пайдалануға негізделген. Мақалада аппаратураны таңдау, бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу, ұшуды бағыттау, деректерді өңдеу, Нәтижелерді визуализациялау және қауіпсіздікті қамтамасыз ету шараларын қоса алғанда, осы әдісті әзірлеу және енгізу кезеңдері егжей-тегжейлі сипатталған. Бұл жұмыстың мақсаты тау-кен өнеркәсібіндегі қауіпсіздік пен тұрақтылықты арттыру, сондай-ақ табиғи ортаның экологиялық тұрақтылығына жәрдемдесу болып табылады.

Түйін сөздер: карьер, борт, аэрофототүсірілім, бақылау станциясы, деформация.

Abstract. This article presents the research and development of a system of observation stations designed to monitor the stability of the sides of a quarry in the mining industry. The geodetic monitoring

methodology is based on the use of unmanned aircraft systems (UAVs) and aerial photography to collect data and analyze the state of the quarry. The article describes in detail the stages of development and implementation of this methodology, including the selection of equipment, software development, flight routing, data processing, visualization of results and security measures. The purpose of this work is to increase safety and sustainability in the mining industry, as well as to promote environmental sustainability of the natural environment.

Keywords: quarry, board, aerial photography, observation station, deformation.

Введение. Горнодобывающая отрасль занимает ключевую позицию в мировой экономике, обеспечивая сырьем такие важные сферы, как строительство, энергетика и промышленность. Однако обеспечение безопасной и устойчивой работы карьеров требует постоянного контроля их состояния, особенно устойчивости бортов. Нарушения в устойчивости могут привести к авариям, экономическим потерям и экологическим проблемам.

Предлагается усовершенствовать методику маркшейдерско-геодезического мониторинга за состоянием устойчивости горного массива (Калашник А.И., Максимов Д.А., 2022) с использованием аэрофотосъемки при создании проекта наблюдательных станций на угольном разрезе «Шерубай Комир», участок отработки пласта К₂ и К₃, расположенный на Центральном участке Черубайнуринского угленосного района Карагандинского угольного бассейна. По административному делению он относится к г. Абаю Карагандинской области (рис. 1). Использование беспилотных авиационных систем (БАС) может позволить эффективно обнаружить и проанализировать нарушения устойчивости откосов разреза, что будет способствовать повышению безопасности работников и стабильности горнодобывающей деятельности, соблюдению экологических стандартов и оптимизации операций на разрезе.



Рисунок 1. Схема расположения участка отработки пласта К₂ и К₃

Примечание – составлено автором

Целью данного проекта является создание системы наблюдательных станций для мониторинга устойчивости горных массивов на основе данных аэрофотосъемки.

Использование современных технологий, таких как GNSS-платы и специализированное программное обеспечение, позволяет создавать высокоточные цифровые модели местности, способствуя более эффективному управлению горнодобывающими объектами.

Данное исследование направлено на повышение безопасности, устойчивости и эффективности деятельности в горнодобывающей индустрии и содействие соблюдению экологических норм и стандартов.

Литературный обзор. Геопространственный мониторинг бортов карьеров и отвалов является важной задачей, регламентированной рядом нормативно-правовых документов. Для выполнения маркшейдерско-геодезического контроля устойчивости откосов карьеров создается сеть наблюдательных станций, представленных профильными реперами.

Выбор мест для закладки реперов осуществляется с учетом инженерно-геологических условий месторождения, текущего состояния и перспектив развития горных работ. При этом учитываются следующие косвенные признаки возможных деформаций:

- а) наличие слабых пластичных, обводненных или сильно трещиноватых пород, формирующих борт или уступ;
- б) вероятность подрезки слабых контактов, тектонических нарушений и обводненных пород, наклоненных в сторону выработанного пространства;
- в) несоответствие фактических параметров уступов и отвалов проектным данным;
- г) нарушения технологии проведения массовых взрывов;
- д) присутствие на откосах карьера непредусмотренных проектом отвалов пород и тяжелого горнотранспортного оборудования (М. Belova, E. Iakovleva, 2019; А. Панжин, Б. Мазуров, 2021).

Традиционные методы выбора мест для закладки реперов наблюдательных станций требуют значительных временных затрат – от нескольких дней до нескольких месяцев, в зависимости от размеров карьера, геомеханической обстановки и доступности участков. Применение аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем значительно ускоряет этот процесс, позволяя оперативно определить оптимальные места для установки станций и сократить общее время работы (А. Павлович, А. Шепель, 2020).

Материалы и методы исследования. Для анализа нарушений устойчивости откосов угольного разреза «Шерубай Комир» использовался БАС с вертикальным взлетом DJI Mavic 2 Pro PPK, оснащенный GNSS-платой. Установленная GNSS-плата представляет собой компактный спутниковый приемник, обеспечивающий определение положения дрона в момент съемки с сантиметровой точностью. Она поддерживает работу с несколькими спутниковыми системами и частотами (рис. 2).



Рисунок 2. Геодезический апгрейд от компании TOPODRONE

Примечание – составлено автором

Процесс выполнения аэрофотосъемки с использованием БАС был разделен на три этапа: подготовительный, полевой и камеральный.

Подготовительный этап включает в себя: создание полетной миссии с помощью программного обеспечения DJI GS Pro; проектирование расположения опорных маркеров (рис. 3) и подготовку необходимого геодезического оборудования. На общей площади объекта было запланировано равномерное размещение 10 опорных маркеров, что позволило повысить точность привязки моделей по всему периметру территории.



Рисунок 3. Тайловая модель угольного разреза

Примечание – составлено автором

Полевой этап. На объекте было выбрано место для установки базовой станции на отметке +487,0 м. Станция выполняла сессию измерений в статическом режиме в течение 17 часов. Полученные данные были обработаны с использованием точных эфемерид,

предоставленных сервером канадской компании «Natural Resources Canada».

В режиме PPP (Precise Point Positioning) координаты базовой станции определялись на основе GNSS-наблюдений и дополнительной информации, включая эфемериды спутников, коррекции и параметры атмосферы (Xiangdong An, Ralf Ziebold, 2023). Полученные координаты в системе WGS-84 имеют точность порядка 1 см:

- широта: точность 0.0029 м;
- долгота: точность 0.0026 м;
- высота: точность 0.0103 м.

Следующим этапом выполнялась выноска в натуру опорных маркеров с использованием GNSS-технологий. Для маркировки на аэрофотоснимках предпочтительно использовать белые материалы, если фон окружающего ландшафта темный, зеленый или серый. При светлом фоне следует выбирать черные материалы. Размеры маркировочных знаков подбираются так, чтобы их изображения на фотографиях были не менее 0,10 мм, с учетом масштаба съемки. Это обеспечивает четкое различие маркеров на фотографиях и ускоряет обработку данных при создании цифровой модели местности. Все маркеры устанавливаются и координируются с помощью GNSS-оборудования с погрешностью 10-15 мм (Будникова П., Алпатов А., 2019).

После подготовки наземного обоснования начинается подготовка дрона для выполнения полета по запланированной миссии. Для безопасной работы дрона выбирается и обустраивается площадка для взлета. Она должна быть жесткой и располагаться на открытой местности: в радиусе 15 метров не должно быть объектов. Калибровка компаса проводится в определенной последовательности, указанной в источнике (Sebastián Granados-Volaños, 2021). После выполнения полетной миссии дрон возвращается на место посадки, после чего начинается этап камеральной обработки.

Камеральный этап включает в себя обработку полевых измерений в специализированных программных средствах:

1. Уравнивание маршрута дрона по технологии PPK (Nakata, Yasutaka, Iwasaki, Kenta, 2023): перед созданием плотного облака и ЦММ необходимо выполнить постобработку GNSS-данных, которая выполняется согласно определенному алгоритму, указанному в руководстве пользователя (ТОПОДРОНЕ, 2020), и геотегинг изображений в ПО TOPOSETTER 2.0. В результате обработки данных полета на угольном разрезе можно прийти к выводу, что и траектория движения дрона, и момент срабатывания затвора имеют фиксированные решения от 0 мм до 10 мм.

2. Создание цифровой модели местности в ПО Agisoft Metashape включает (Steffi Vassallo, 2024) в себя несколько этапов: импорт фотографий, выравнивание, построение 3D-модели, текстурирование и генерацию цифровой модели местности. Выравнивание фотографий представляет собой ключевой этап обработки данных аэрофотосъемки. Этот процесс выполняется исключительно на основе исходных изображений, без изменения их размеров или геометрии. Плотное облако точек формируется путем расчета карт глубины для каждого изображения. Оно служит исходным материалом для построения трехмерной модели, в то время как текстуры тайлов создаются непосредственно из исходных фотографий. В результате проведенных расчетов была построена тайловая модель угольного разреза (Д. Кириков, В. Федоров и др., 2023) «Шерубай Комир» с высоким качеством детализации и разрешением 5,8 см/пиксель (рис. 3).

3. Геодезическая привязка модели по координатам опорных маркеров. При определении местоположения маркеров в трехмерном пространстве важно выровнять их положение, перемещая указатель (флажок) к центру маркера (рис. 4) как минимум на двух изображениях. Если доступно большее количество снимков с этим маркером, то рекомендуется указать его местоположение на всех доступных изображениях.

Использование большого количества фотографий для определения проекций маркера повышает точность позиционирования.

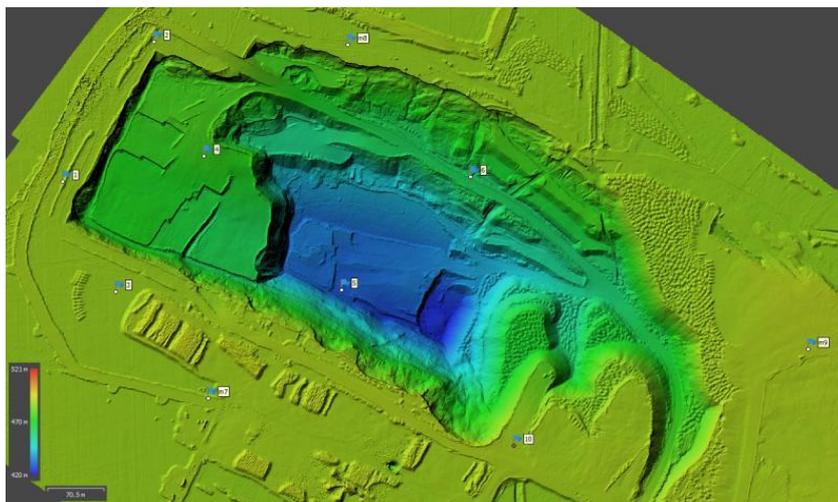


Рисунок 4. Месторасположение опорных маркеров на ЦММ

Примечание – составлено автором

В результате обработки полученных данных аэрофотосъемки при помощи БАС DJI Mavic 2 Pro PPK была получена цифровая модель местности, являющаяся источником необходимой информации в краткие сроки.

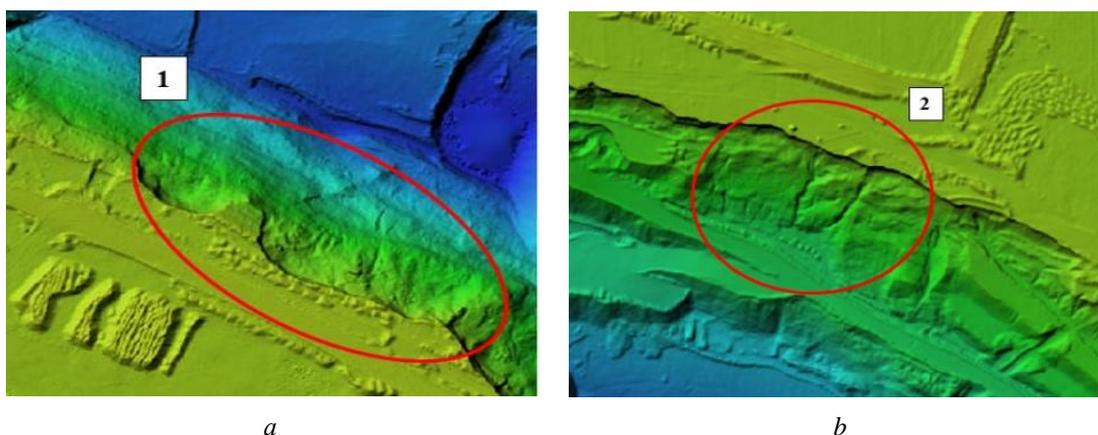
Результаты и их обсуждения. Детальное обследование бортов разреза с использованием цифровой модели выявило два участка, подверженных деформациям прибортового массива (рис. 5).

На северном борту разреза зафиксированы нарушения устойчивости, связанные с деформациями группы уступов в зоне выходов угольных пластов под наносы.

На южном борту отмечены аналогичные проблемы, вызванные деформациями группы уступов на горизонте +490 м.

Участок 1 (рис. 5, а): на данном участке сдвигению горного массива подверглась группа уступов между горизонтами +490 и +451 м, протяженностью по фронту 164 м (рис. 6).

Участок 2 (рис. 5, б): этот участок расположен между горизонтами +487 и +465 м. Протяженность фронта деформации составляет 173 м (рис. 7).



a

b

Рисунок 5: *a* – участок деформирования на южном борту; *b* – участок деформирования

на северном борту

Примечание – составлено автором



Рисунок 6. Линейные параметры южного борта разреза

Примечание – составлено автором



Рисунок 7. Линейные параметры северного борта разреза

Примечание – составлено автором

Для полного и объективного анализа механизма деформаций откосов уступов на разрезе и разработки противодеформационных мероприятий рекомендуется организовать наблюдательные станции в проблемных зонах. Эти станции позволят осуществлять мониторинг состояния устойчивости откосов уступов и бортов разреза (Дорохов Д., 2018).

На угольном разрезе «Шерубай Комир», расположенном на участке отработки пластов К₂ и К₃ Центрального участка Черубайнуринского угленосного района Карагандинского угольного бассейна, в местах наиболее вероятного возникновения деформаций (участки 1 и 2) рекомендуется заложить две наблюдательные станции (рис. 8):

– на южном борту разреза, на горизонте +490 м, в районе участка 1, где наблюдаются

деформации группы уступов;

– на северном борту разреза, на горизонте +487 м, в районе участка 2, где зафиксированы деформации группы уступов в зоне выходов угольных пластов под наносы.

Размещение наблюдательных станций в указанных зонах, где проявились процессы деформации карьерных откосов и существует наибольший риск возникновения новых деформаций, позволит провести комплексные геомеханические исследования и повысить эффективность мониторинга (Низаметдинов Ф.К., 2020).

Перенос проекта наблюдательных станций в натуру осуществляется путем построения на местности необходимых углов и длин. Разбивка реперов профильных линий выполняется инструментально с использованием электронного тахеометра.

Процедура закладки реперов в горнодобывающем разрезе предусматривает, что каждая профильная линия должна включать 2-3 опорных репера и серию рабочих реперов. Количество рабочих реперов определяется такими факторами, как глубина разреза, а также горно-геологические и гидрогеологические условия.

В пределах зоны возможных обрушений расстояние между рабочими реперами должно составлять 10 метров. По мере удаления от этой зоны расстояние может увеличиваться до 20-30 метров. Между опорными реперами расстояние должно составлять от 40 до 50 метров. На каждой площадке (берме), уступе или ярусе отвала рекомендуется устанавливать не менее двух реперов: один вблизи верхнего края уступа и другой ближе к нижней части верхнего уступа. Расстояние между рабочими реперами на уступах определяется шириной бермы.



Рисунок 8. Район расположения наблюдательных станций I и II

Примечание – составлено автором

Опорные реперы должны располагаться за пределами зоны деформаций, на верхней площадке разреза или у основания отвала. Длина одной профильной линии по поверхности земли от крайнего опорного репера до верхней бровки откоса борта разреза должна составлять 1,5 ширины разреза (обозначается как 1,5 Н) (Ситникова Е., Ожигин С., 2019).

Заключение. Использование современных технологий, включая беспилотные авиационные системы с GNSS-платой, предоставляет возможность эффективно анализировать и контролировать устойчивость откосов в горнодобывающей промышленности (Литвиненко Н.В., Маврин И.Д., 2024). В данной работе были успешно выполнены все этапы проведения аэрофотосъемки и создания цифровой модели местности для угольного разреза «Шерубай Комир». Результаты анализа позволили выявить участки с

нарушениями устойчивости, что является важной информацией для дальнейших мероприятий по обеспечению безопасности и стабильности горных работ. Рекомендуется провести наблюдательные станции для геомеханических исследований в областях, где выявлены деформации и наибольший риск новых нарушений устойчивости откосов. Это поможет принимать своевременные меры для предотвращения потенциальных аварийных ситуаций и обеспечения безопасности работы в угольном разрезе.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». При подготовке данной работы авторы не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Kalashnik A.I., D.A. Maksimov, N.A. Kalashnik, A.Yu. Dyakov. Multilevel complex studies and monitoring of tailings storage facilities of mining enterprises in the northwestern part of the Russian sector of the Arctic. Monograph, published by the Kola Science Center, Apatity, 2022. DOI: 10.37614/978.5.91137.465.5.
- Margarita Belova, Emilia Iakovleva, Anton Popov. Mining and Environmental Monitoring at Open-Pit Mineral Deposits. Journal of Ecological Engineering. – 2019. – Vol. 20. – P. 172-178, DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/105438>.
- Nakata, Yasutaka, Iwasaki, Kenta, Shimoda, Seiji. Understanding microtopography changes in agricultural landscapes through precision assessments of digital surface models by the UAV-RTK-PPK method without ground control points. Smart Agricultural Technology. – 2023. – Т. 5. – № 100269.
- Pavlovich A., Shepel A. Implementation of unmanned aerial vehicles for the prompt solution of scientific and production problems in the conditions of the Mikhailovsky Mining and Processing Plant named after A.V. Varichev. Journal "Mining Industry" No. 3 / 2020, p. 26. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-26-30>.
- Sebastián Granados-Bolaños, Adolfo Quesada-Román, Guillermo E. Alvarado. Low-cost UAV applications in dynamic tropical volcanic landforms. Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2021. – 7 p.
- Steffi Vassallo. Instructions manual for creating 3D models in Agisoft Metashape: Professional Edition. Lisbon User Manual., 2024. DOI:10.5281/zenodo.13870098.
- TOPODRONE DJI Mavic Mini PPK – the most affordable tool for cadastral and topographic surveying // Geodetic unmanned aerial vehicles. 2020 [Electronic resource]: <https://geodesist.ru/threads/statja-topodrone-dji-mavic-mini-ppk-samyj-dostupnyj-instrument-dlja-kadastra-i-toposemki.84724/>
- Xiangdong An, Ralf Ziebold, Christoph Lass. From RTK to PPP-RTK: towards real-time kinematic precise point positioning to support autonomous driving of inland waterway vessels. GPS Solutions. – 2023. 27:26.
- Будников П.А., Алпатов В.В., Васильев А.Е., Обзор современного состояния методов высокоточной навигации по ГНСС и их перспективы развития на территории РФ. Гелиогеофизические исследования. – № 23, 16-22, 2019 // Budnikov P.A., Alpatov V.V., Vasiliev A.E., Review of the current state of high-precision GNSS navigation methods and their development prospects in the Russian Federation. Heliogeophysical research. – № 23, 16-22, 2019.
- Дорохов Д.В., Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г. Методика исследования деформаций поверхности грунта в шахтном поле. Журнал горного дела. – 2018. – Т. 54. – № 5 // Dorokhov D.V., Nizametdinov F.K., Ozhigin S.G. A Technique for Surveying of Ground Surface Deformations in Mine Field. Journal of Mining Science. – 2018. – Т. 54. – № 5.
- Кириков Д.А., Федоров В.С., Калимуллина Д.И., Охунов Ш.Р. Анализ данных аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов для изучения состояния бортов угольного разреза // Известия ТулГУ. Науки о Земле, 2023. – Выпуск 2. – С. 236-248 // D.A. Kirikov, V.S. Fedorov, D.I. Kalimullina, Sh.R. Okhunov. Analysis of aerial photography data from unmanned aerial vehicles to study the state of the sides of a coal mine // Izvestiya Tula State University. Earth Sciences, 2023, issue 2, pp. 236-248.
- Литвиненко Н.В., Маврин И.Д., Идрисов А.Ф. О выборе методики детальной съемки бортов карьеров при помощи БПЛА для оценки их трещиноватости // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2024. – Т. 15. – № 1 // Litvinenko N.V., Mavrin I.D., Idrisov A.F. On the choice of a method for detailed survey of quarry sides using UAVs to assess their fracturing // Actual problems of modern science, technology and education. 2024. – V. – 15. – No. 1.
- Низаметдинов Ф.К., Мустафин М.Г., Ожигин С.Г. Геомониторинг состояния устойчивости карьерных откосов. Журнал ИнтерЭкспо ГЕОСИБИРЬ. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 176-185 // Nizametdinov F.K.,

- Mustafin M.G., Ozhigin S.G. Geomonitoring of the state of stability of quarry slopes. InterExpo GEOSIBIR Magazine. – 2020. – Vol. 1. – No. 1. – P. 176-185.
- Панжин А.А., Мазуров Б.Т., Панжина Н.А. Геодинамический мониторинг и моделирование поля деформаций на Коркинском угольном месторождении. Известия ТулГУ. Науки о Земле, 2021. – Выпуск 2. – С. 94-106 // A.A. Panzhin, B.T. Mazurov, N.A. Panzhina. Geodynamic Monitoring and Modeling of the Deformation Field at the Korkinskoye Coal Deposit // Bulletin of Tula State University. Earth Sciences, 2021. – Issue 2. – P. 94-106.
- Ситникова Е.В., Ожигин С.Г., Кулыгин Д.А. Анализ деформаций прибортовых массивов на разрезе «Каракомир» и разработка проекта наблюдательных станций для мониторинга их состояния. ИнтерЭкспо ГЕОСИБИРЬ. – 2019. – Т. 1. – № 1 // Sitnikova E.V., Ozhigin S.G., Kulygin D.A. Analysis of deformations of near-edge massifs at the Karakomir section and development of a design for observation stations to monitor their condition. InterExpo GEOSIBERIA. – 2019. – Т. 1. – No. 1.

Information about authors

Kazantseva Victoria – Master of Technical Sciences Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, kazantseva.v@kstu.kz

Ozhigin Dmitry – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, ozhigin.dima@kstu.kz

Dolgonosov Viktor – Doctor of Technical Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, vnd070765@mail.ru