

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ УСТУПОВ И БОРТОВ КАРЬЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ*

И. Б. Агарков^{1✉}, М. В. Рыльникова², И. Л. Никифорова²

¹Открытое акционерное общество "ВЮГЕМ", г. Белгород, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ agarkov_ib@viogem-sp.ru

Аннотация: Исследован вопрос использования беспилотных летательных аппаратов для геомеханического мониторинга состояния массива горных пород вблизи выработанного карьерного пространства. Приведен пример реализации методики оценки смещений горных пород в условиях глубокого карьера с использованием беспилотных летательных аппаратов, выполнена обработка серий поверхностей в программе АСНИ «Облако 3D», дана количественная и качественная характеристика смещения горных пород в районе крупного обрушения восточного борта карьера. Исходя из результатов исследований, сделан вывод об экономической перспективности использования беспилотных летательных аппаратов совместно с программой АСНИ «Облако 3D» для оперативного мониторинга смещений массива горных пород, что позволит ускорить и упростить процедуру создания цифровых моделей с необходимой степенью детализации для проектирования вариантов плана развития горных работ.

Ключевые слова: геомеханический мониторинг, беспилотные летательные аппараты, анализ состояния бортов, смещения горных пород, обрушения, опорные знаки, точность позиционирования

***Благодарность, финансирование:** Работа выполнена в рамках базового бюджетного финансирования ИПКОН РАН, тема № 1023040100029-8-2.7.5.

Для цитирования: Агарков И. Б., Рыльникова М. В., Никифорова И. Л. Разработка методики мониторинга деформаций уступов и бортов карьеров с применением беспилотных летательных аппаратов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):33-39. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_33_39.

METHODS OF INSPECTION OF DEFORMATIONS OF LEDGES AND SIDES OF QUARRIES USING UNMANNED AERIAL VEHICLES*

I. B. Agarkov^{1✉}, M. V. Rylnikova², I. L. Nikiforova²

¹Open Joint Stock Company "VIOGEM", Belgorod, Russian Federation

²Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ agarkov_ib@viogem-sp.ru

Abstract: The issue of using unmanned aerial vehicles for geomechanical monitoring of the state of a rock mass near a developed quarry space is investigated. An example of the implementation of a methodology for assessing rock displacements in a deep quarry using unmanned aerial vehicles is given, a series of surfaces are processed in the ASNI Cloud 3D program, quantitative and qualitative characteristics of rock displacement in the area of a large collapse of the eastern side of the quarry are given. Based on the research results, it is concluded that the use of unmanned aerial vehicles in conjunction with the ASNI Cloud 3D program for operational monitoring of rock mass displacements is economically promising, which will speed up and simplify the procedure for creating digital models with the necessary degree of detail for designing variants of the mining development plan.

Keywords: geomechanical monitoring, unmanned aerial vehicles, analysis of the condition of the sides, displacement of rocks, collapses, support signs, positioning accuracy

***Acknowledgement, funding:** This work was carried out within the framework of the basic budget financing of IPCON RAS, topic No. 1023040100029-8-2.7.5.

For citation: Agarkov I. B., Rylnikova M. V., Nikiforova I. L. Methods of inspection of deformations of ledges and sides of quarries using unmanned aerial vehicles. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):33-39. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_33_39.

Введение

В современных условиях существенные изменения горнотехнических, геомеханических и природно-климатических условий открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых с одновременным увеличением сроков эксплуатации карьеров, непрерывным расширением масштабов открытых горных работ, интенсификацией производственных процессов, ужесточением требований промышленной и экологической безопасности горных работ при сохранении приемлемого уровня экономической эффективности производства предопределяют необходимость изыскания новых геотехнологических решений, оптимизации параметров горных работ, техники и технологий [1-7].

В тоже время, вопросы повышения экономической эффективности, промышленной безопасности и экологичности горных работ закономерно связаны с обеспечением долговременной устойчивости бортов и уступов карьеров и отвалов в течение всего жизненного цикла освоения месторождений твердых полезных ископаемых [8-10].

В этой связи, крайне важно своевременно прогнозировать и фиксировать обрушения различного масштаба, обследовать параметры уступов на соответствие проектным решениям, выявлять признаки начинающихся деформаций уступов и участков бортов карьеров, геометризовать и локализовывать эти области, обеспечивая предотвращение сдвижений массива, либо принудительное обрушение горных пород для разгрузки массива борта. Частично с поставленными задачами могут справляться геотехнические радары, которые позволяют спрогнозировать развитие деформаций, однако, несмотря на достаточно высокую точность и универсальность, они имеют ряд недостатков, которые затрудняют их применение на горных предприятиях. Они могут прогнозно определять области смещения горных пород и их величину, но построить по этим данным объемную модель массива весьма затруднительно. В свою очередь такие модели необходимы для геомеханических расчетов коэффициентов запаса устойчивости уступов и бортов карьера. К еще одному недостатку георадаров относится их дороговизна и сложность технического обслуживания. По этой причине малые предприятия не всегда могут себе позволить закупку подобного оборудования. Помимо этого, радары имеют ограниченный радиус действия, как в вертикальной плоскости, так и по горизонтали, а для охвата всего месторождения требуется несколько систем. Таким образом, выбор оптимального метода геомеханического мониторинга состояния горного массива вблизи выработанного карьерного пространства с последующими оценкой интенсивности и характера разрушения массива горных пород, моделированием формы и объема обрушения является актуальной задачей [11-13].

Цель исследований: разработка методики мониторинга деформаций уступов и бортов карьеров с применением беспилотных летательных аппаратов.

Методы и материалы исследований

В работе применялся комплексный метод исследований, включающий натурные наблюдения, маркшейдерские съемки уступов и бортов карьера портативными беспилотными летательными аппаратами при изучении структурно-тектонических особенностей породных массивов Ковдорского месторождения магнетит-апатитовых

руд, оценке степени их нарушенности, выявлении характера и установлении закономерностей деформирования породных массивов; аналитические, графо-аналитические, графические и численные методы при обосновании геомеханических моделей и решении задач устойчивости откосов в структурно-нарушенных массивах.

Результаты исследований

Для решения указанной задачи авторами предложен метод мониторинга состояния массивов скальных пород, базирующийся на съемке уступов и бортов карьера портативными беспилотными летательными аппаратами (далее — БПЛА).

В общем виде процедура мониторинга состояния массивов скальных пород приведена на схеме (рис. 1).

На начальном этапе выбирается объект исследования и оценивается сложность его съемки с применением БПЛА. Она, в первую очередь, зависит от рельефа поверхности съемки и наличия факторов, осложняющих работу GPS приемника и магнитного компаса, который в настоящее время применяется в большинстве БПЛА для позиционирования себя на местности [14-17].

Съемка местности, как правило, производится либо по созданным в специализированных программах (Litchi, Drone Deploy, Pix4D и пр.) полетным заданиям, либо в ручном режиме. Первый способ применяется в случае, когда глубина карьеров небольшая, и требуется оценить степень соответствия положения фактических бровок проектным. Это связано с тем, что при автоматизированном полете дрон, как правило, ведет съемку с одной, заранее заданной высоты, повторяя рельеф поверхности в направлении сверху-вниз по заранее созданной сетке съемки (рис. 2).

Преимущество автоматизированной съемки — в минимальном влиянии оператора БПЛА на результат процесса полевых работ и отсутствии пробелов при фотографировании. К недостаткам относится невозможность качественного фотографирования вертикальных стенок откосов, так как съемка ведется в горизонтальной плоскости, при которой вертикальные объекты снимаются под крутым углом к горизонту. Что приводит к искажению картинки на поверхности откосов и снижению точности построения моделей. Поэтому съемка по полетному заданию, сформированному в автоматическом режиме, предпочтительна при мониторинге горизонтальных смещений и мало пригодна для мониторинга вертикальных смещений и вывалов горной породы с поверхности уступов и бортов карьеров.

Для съемки в вертикальной плоскости имеющийся на рынке софт не подходит, так как эта задача является довольно узкоспециализированной и не востребована у массового пользователя. Решение этой проблемы достигается путем облета обследуемого участка в ручном режиме.

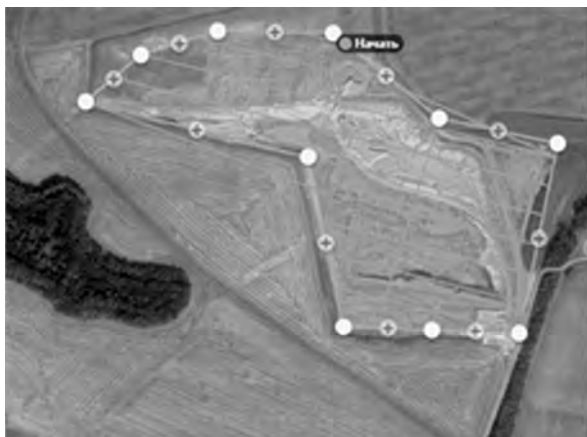
Неотъемлемой частью съемки является наиболее приемлемый в условиях съемки способ повышения ее точности, так как точность позиционирования БПЛА составляет порядка 1,5-3,0 м.

В настоящее время широко применяются три основные технологии. Первая и наиболее простая заключается в повышении точности съемки по опознавательным знакам и маркам, распределенным перед съемкой по всему обследуемому участку (рис. 3).

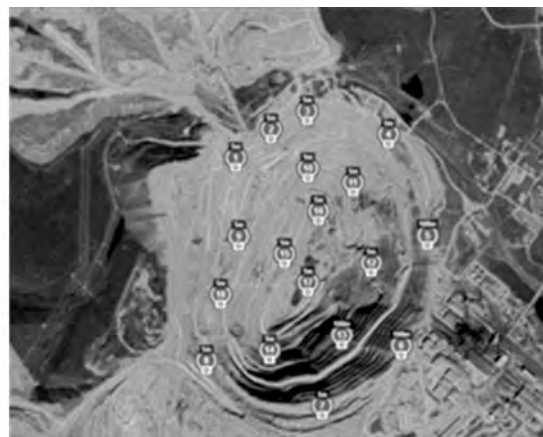
Размер марки зависит от предполагаемой высоты съем-



Рис. 1. Алгоритм мониторинга состояния массивов скальных пород /
Fig. 1. Algorithm for monitoring the condition of rock formations



а (a)



б (b)

Рис. 2. Сетка съемки в программном обеспечении: а - Drone Deploy; б - Litchi /
Fig. 2. Shooting grid software: а - in Drone Deploy; б - Litchi



Рис. 3. Опознавательный знак для БПЛА /
Fig. 3. Identification mark for an unmanned aerial vehicle

ки — чем выше высота съемки, тем больше по размерам должна быть марка. Положение марок и знаков предварительно определяется при помощи маркшейдерских замеров, а затем по знакам привязывается объемная модель исследуемого объекта. Плюсы такого способа заключаются в том, что для его реализации не требуются дорогостоящие дроны, оснащенные системами кинематики в реальном времени (RTK) и в режиме постобработки (РРК), при этом он является достаточно надежным и точным. К недостаткам относится высокая трудоемкость расстановки и сбора марок после съемки на больших площадях и невозможность их заложения на непроходимых участках. Этот способ хорошо подходит для изучения группы уступов, расположенных ближе ко дну карьера на участках с нестабильным спутниковым сиг-

налом, где риски потери БПЛА являются самыми высокими. Экономический эффект от потери менее дорогостоящего БПЛА будет выше, чем утрата высокотехнологичного аппарата, оснащенного системами RTK и PPK.

Технологии RTK и PPK относятся к методам дифференциальной коррекции ошибок сигнала GNSS. Обе технологии направлены на повышение точности позиционирования за счет применения базовых станций GNSS и сетей CORS/VRS с разницей лишь в том, что в первом случае коррекция положения БПЛА происходит непосредственно в процессе съемки, а во втором – после завершения съемки.

Принцип коррекции системы RTK заключается в следующем. На точку с известными координатами устанавливается базовая станция, которая в режиме реального времени связывается со спутниками и находит поправку между своим известным местоположением и позицией, определенной по сигналу со спутников. Полученная поправка отправляется на ровер, установленный на корпусе БПЛА, что повышает точность позиционирования аппарата.

При коррекции PPK базовая станция и ровер накапливают информацию о своем местоположении отдельно друг от друга, а затем в процессе обработки данные объединяются по времени приема сигнала, и соответствующие поправки вносятся в данные съемки (рис. 4).

Преимуществом первого способа является возможность получения непосредственно после завершения съемки готовых данных, с которыми можно сразу работать, а во втором случае данные требуют постобработки. К недостаткам метода RTK также относят требование к постоянному качественному соединению между спутником, БПЛА с ровером и базовой станцией. Потеря сигнала приводит к потере отснятых данных. В режиме PPK база и БПЛА работают со спутниками параллельно, и это делает такую систему более надежной при потере связи. Кроме того, дальность полетов от базовой станции в режиме PPK составляет 30–50 км, а RTK – только до 6 км. Оба метода дают достаточно высокую точность (до 1 см) при съемке в верхних частях карьера, где присутствует стабильный сигнал от спутников. Съемка на нижних горизонтах возможна в комбинации с опознавательными знаками, чтобы в случае потери сигнала данные могли быть увязаны.

После выбора объекта съемки и способа привязки модели в требуемую систему координат с необходимой точностью приступают к облету объекта обследования.

Облет объекта обследования в режиме PPK выполняется

интервальной фотосъемкой с периодичностью 5–7 секунд. Положение БПЛА выбирается вручную таким образом, чтобы точка съемки была расположена примерно перпендикулярно к поверхности откоса, а расстояние от откоса позволяло одновременно снимать два откоса уступов высотой по 12–15 м или один сдвоенный уступ, высотой 30–40 м. Перекрытие снимков должно составлять около 50 %, что позволяет более точно выровнять снимки при обработке. При меньшем перекрытии качество и точности модели падает. Сначала БПЛА движется вдоль откоса от нулевой точки съемки к конечной, затем в обратном направлении, а на завершающем этапе выполняют съемку вертикально вниз для детальной прорисовки бровок уступов. В процессе съемки оператор меняет угол поворота камеры. При облете поверхности откоса камера поворачивается к откосу под углом около 45–50° в направлении движения. При появлении на экране объекта, который вызывает интерес с точки зрения устойчивости, оператор перемещает БПЛА ближе и снимает объект с разных ракурсов, чтобы получить детализированную модель проблемного участка. Если устройство оснащено лидаром, то выполняют дополнительно сканирование уступов.

Основной задачей съемки является получение плотного облака точек при помощи лидара. Принцип съемки заключается в постоянном излучении лазерных лучей и фиксации времени, за которое луч достигает объекта, отражается и возвращается обратно. Также возможно построение плотного облака методами фотограмметрии по снимкам уступов, сделанным под разными ракурсами. В первом случае не требуется длительной обработки результатов съемки, однако, отсутствует возможность окрашивания модели в естественные цвета. Во втором случае обработка результатов занимает более длительное время, но позволяет получить модель карьера, окрашенную в естественные цвета. Точность обоих методов примерно совпадает при правильном выполнении и соблюдении режима съемки.

В рамках настоящего исследования построение плотного облака точек производилось в программе Metashape путем обработки координатно привязанных фотоснимков уступов и бортов карьера алгоритмами в специализированном программном обеспечении. В итоговом виде получают объемную точечную модель карьера, с которой в дальнейшем работают (рис. 5).

Далее приступают к обработке серий поверхностей в программе АСНИ «Облако 3D». Мониторинг в этом программном обеспечении заключается в измерении длин векторов смеще-

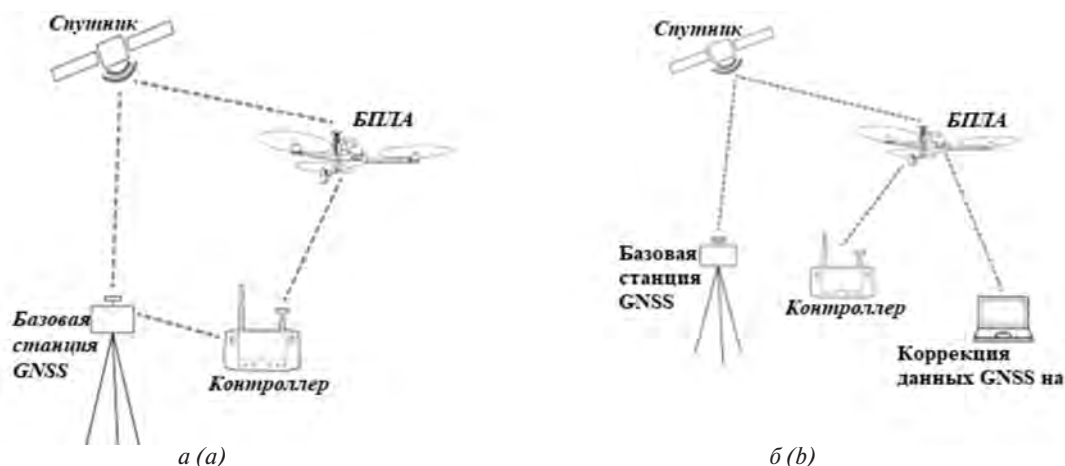


Рис. 4. Принцип коррекции данных GNSS технологий: а – RTK; б – PPK /
Fig. 4. The principle of GNSS data correction with technology: а – RTK; б – PPK

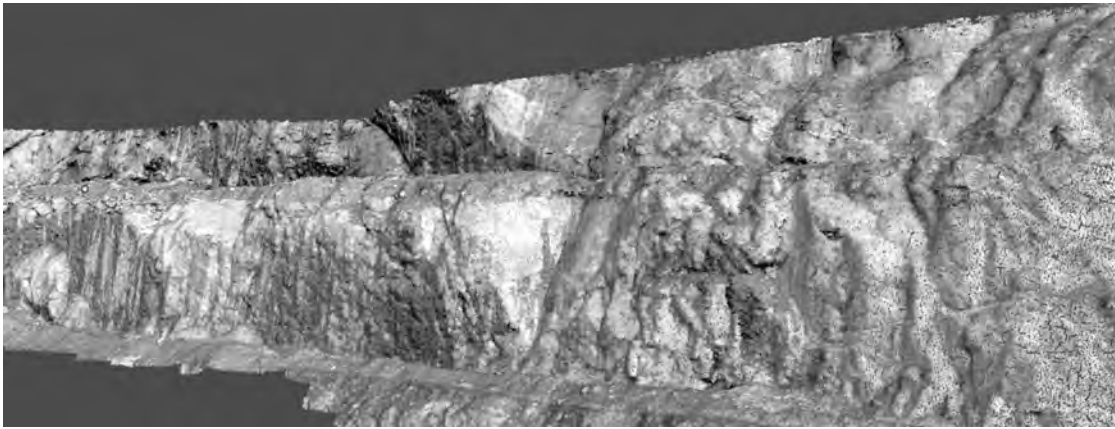


Рис. 5. Группа уступов, представленная плотным облаком точек в программе Metashape /
Fig. 5. A group of ledges represented by a dense point cloud in the Metashape program

ния между облаками точек, ограниченными границами ячеек и точкой наблюдения, которая задается пользователем, исходя из целей мониторинга. Суть оценки смещений заключается в том, что программа по заданным параметрам разбивает плотное облако на ячейки и находит средневзвешенное положение ее центра путем анализа позиции всех точек, попавших в эту ячейку. После этого в программе в автоматическом режиме находится расстояние от точки измерения до центра ячейки и фиксируется это расстояние. Затем загружается вторая серия съемки, для которой необходимо оценить смещения относительно базового облака. С аналогичными параметрами ее разбивают на ячейки и проделывают ту же самую процедуру, что и для базового облака. Далее находят разность между длиной базового вектора и вектора смещений и отображают ее в ячейках и визуализируют на плане по цветовой шкале.

Выбор размера ячейки зависит от цели мониторинга и производительности устройства, на котором делаются расчеты. Ее размер задается через угол поворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях и определяет удаленность точки съемки по принципу лазерного сканера. При высоте откоса 24–30 м, ячейка, размером 2х2 м, позволяет визуализировать обрушения, объемом от 200 м³, но без большой детализации. Если необходимо выделить только мощные обрушения (свыше 1000 м³), то размер ячейки можно увеличить в 2–3 раза. Для обследования мелких обрушений размер ячейки, напротив, уменьшают в 2–3 раза. Чем меньше размер ячейки, тем детальнее прорисовка смещений и тем больше требуется вычислительных мощностей для стабильной работы программы. Высоту или длину стороны ячейки определяют по формуле:

$$h = l \cdot \operatorname{tg}(\alpha) , \quad (1)$$

где h — высота (или длина) ячейки, м; l — удаление точки измерения от поверхности карьера, м; α — угловое разрешение съемки (горизонтальное и вертикальное), град.

Пропорции ячейки измерения зависят от типа месторождения и подбираются исходя из соотношения длины и высоты элементарного блока в массиве горных пород.

Обсуждение результатов исследований

Представленная методика наблюдений разработана эмпирическим путем, что позволяет эффективно и точно выявлять очаги обрушений и следить за их дальнейшим развитием.

Рассмотрим пример реализации методики оценки смещений горных пород в условиях глубокого карьера. На начальном этапе точку измерения выставляют в центре карьера

в горизонтальной плоскости и на уровне верхней части карьера в вертикальной плоскости, а далее производят расчет смещений. Затем настраивают шкалу смещений таким образом, чтобы на поверхности карьера отображались смещения с шагом в 1 м (рис. 6) (см. цв. вклейку на стр. 79).

На представленной карте (рис. 6) отчетливо выделяются три области. Красным цветом в верхней и нижней части карьера отражаются области интенсивного ведения горных работ. От обрушений их отличает четко выдержанная зональность. На этих участках борта карьера ушли в сторону породного массива. Синим цветом окрашены области сдвижения горной породы в сторону точки измерения, которые локализуются преимущественно под областями ведения горных работ. Это говорит о том, что на этих откосах сформировались осыпи. Зеленым цветом показаны участки карьера, где существенных изменений не произошло. Локализации красных пятен на зеленом фоне говорит о наличии локальных смещений, представленных различными типами обрушений. На карте выделено наиболее крупное из них.

Затем детализируют участки смещения и по ним изучают характер и тип смещений, их количественные и качественные характеристики.

На рис. 7 (см. цв. вклейку на стр. 79) представлена количественная и качественная характеристика смещения в районе крупного обрушения восточного борта карьера.

Аналогичным образом может быть выполнена оценка шероховатости откосов, размеров — увеличения (уменьшения) объемов складов руды, отвалов и пр. Программа является универсальной и может найти широкое применение в горной промышленности.

Следует также отметить, что на точность мониторинга, в первую очередь, влияет качество съемки объекта и правильный выбор методики повышения точности позиционирования БПЛА в момент съемки.

Заключение

1. В статье приведен разработанный алгоритм геомеханического мониторинга смещений горного массива вблизи выработанного карьерного пространства с использованием беспилотных летательных аппаратов, который может иметь широкое применение в соответствии с решаемыми задачами.

2. Установлено, что в условиях глубоких карьеров облет изучаемой области целесообразно проводить в ручном режиме, а для повышения точности позиционирования БПЛА в

процессе съемки рекомендуется использовать опорные знаки в сочетании с технологией РРК.

3. Применение программы АСНИ «Облако 3D» для мониторинга смещений массива позволяет оперативно выделять участки смещений горной породы путем сравнения двух облаков точек и давать количественную и качественную характеристику смещения горных пород. Программа позволяет получить площадную карту смещений по аналогии с

данными радарного мониторинга, но с минимальными финансовыми затратами, так как стоимость компактных БПЛА в десятки раз ниже стоимость радаров.

4. Предложенный алгоритм мониторинга может применяться как в горной промышленности, так и за ее пределами, что делает его универсальным инструментом для решения ряда прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы / Р. В. Ключев, И. И. Босиков, А. В. Майер, О. А. Гаврина // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 283–290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.
2. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем / В. Н. Захаров, А. Д. Гвишиани, Л. А. Вайсберг, Б. В. Дзеранов // Горный журнал. — 2021. — № 11. — С. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.
3. Рыльникова, М. В. Развитие горных наук, образования и технологического уклада производства — основа устойчивого развития и снижения рисков при комплексном освоении недр комбинированными геотехнологиями / М. В. Рыльникова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021 — № 3 — С. 10–25.
4. Особенности и перспективы реализации проекта федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов» / М. В. Рыльникова, А. И. Перепелицын, О. В. Зотеев, И. Л. Никифорова // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 132–139. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-132-139.
5. Gilani, S. O. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty / S. O. Gilani, J. Sattarvand, M. Hajihassani, S. S. Abdullah // Resources Policy. 2020, vol. 68, article 3101738. DOI: 10.1016/j.resourpol. 2020.101738.
6. Наговицын, О. В. Влияние роботизированных технологий на безопасность ведения открытых горных работ / О. В. Наговицын, М. Г. Возняк // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-1. — С. 52–62. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_52.
7. Копылов, А. С. Комплексный подход к освоению сырьевой базы горнодобывающего региона с применением ресурсовоспроизводящих технологий / А. С. Копылов, А. К. Джигоева, Ю. И. Кондратьев // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 228–239. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-228-239.
8. Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных / М. В. Рыльникова, Д. А. Клебанов, В. В. Рыбин, И. Ю. Розанов // Горная промышленность. — 2024. — № 4. — С. 121–128. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-121-128.
9. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов, 2020. [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140211> (дата обращения 11.09.2024).
10. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения / С. В. Усанов, Ю. П. Коновалова, Е. Ю. Ефремов, О. Д. Харисова, А. В. Усанова // Горная Промышленность. — 2022. — № 1S. — С. 111–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118.
11. Резниченко, С. С. Организация комплексной системы мониторинга устойчивости бортов и уступов глубоких карьеров с использованием современного геодезического оборудования / С. С. Резниченко, В. Н. Сытенков, Р. Ш. Наимова // Рациональное освоение недр. — 2017. — № 2. — С. 56–67.
12. Клебанов, А. Ф. Современная система контроля устойчивости бортов карьеров на основе использования радаров MSR / А. Ф. Клебанов, М. А. Макеев, Н. В. Монахов // Горная промышленность. — 2015. — № 1(119). — С. 75–76.
13. Мустафин, М. Г. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров / М. Г. Мустафин, Е. О. Валькова, В. А. Вальков // Маркшейдерский вестник. — 2022. — № 3 (148). — С. 13–18.
14. Анализ данных аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов для изучения состояния бортов угольного разреза / Д. А. Кириков, В. С. Фёдоров, Д. И. Калимуллина, Ш. Р. Охунوف // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2023, Вып. 2, С. 236–249.
15. Изучение структурных особенностей прибортового массива по 3D-модели откоса, построенной с применением мультикоптера / И. Ю. Боос, Ю. Л. Юнаков, И. В. Патачаков, А. А. Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 12. — С. 19–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_19.
16. Zhou, H. Trajectory planning algorithm of UAV based on system positioning accuracy constraints / H. Zhou, H. L. Xiong, Y. Liu, N. D. Tan, L. Chen // Electronics. 2020, 9, 250.
17. Lian, X. G. Rapid identification of landslide, collapse and crack based on low-altitude remote sensing image of UAV / X. G. Lian, Z. J. Li, H. Y. Yuan, J. B. Liu, Y. J. Zhang, X. Y. Liu, Y. R. Wu // J. Mt. Sci. 2020, 17, 2915–2928.
18. Гуца, Д. И. Качественная оценка геомеханических рисков по результатам долгосрочного мониторинга и 3d модели месторождения, построенной с применением мультикоптера / Д. И. Гуца, Е. В. Коврижных, Н. В. Еретнов, А. А. Абдуллаева, Д. В. Редькин // Московский экономический журнал. — 2022. — № 2. [Электронный ресурс]. — URL: <https://qje.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2022-7/> (дата обращения 13.08.2024).
19. Низаметдинов, Н. Ф. Лазерно-цифровые технологии измерений при наблюдениях за состоянием прибортовых массивов карьера / Н. Ф. Низаметдинов, Р. Ф. Низаметдинов, Е. А. Олейникова, А. З. Капасова, А. Оралбай // Маркшейдерский вестник. — 2020. — № 4(137). — С. 43–48.
20. Зотеев, В. Г. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению / В. Г. Зотеев, О. В. Зотеев // Горный журнал. — 2007. — № 1. — С. 40–45.

REFERENCES

1. Klyuev RV, Bosikov II, Mayer AV, et al. A comprehensive analysis of the use of effective technologies to enhance the sustainable development of the natural and technical system. *Sustainable development of mining territories*. 2020;12(2):283–290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290 (In Russ.).
2. Zakharov VN, Gvishiani AD, Vaisberg LA, et al. Big Data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(11):45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06 (In Russ.).
3. Rylnikova MV. Development of mining sciences, education and technological way of production — the basis for sustainable development and risk

- reduction in the complex development of the subsoil by combined geotechnologies. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2021;(3):10-25 (In Russ.).
4. Ryl'nikova MV, Perepelitsyn AI, Zoteev OV, et al. Features and prospects of the implementation of the draft federal norms and rules in the field of industrial safety "Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, cuts and dumps". *Russian Mining Industry*. 2020;(1):132-139 (In Russ.).
5. Gilani SO, Sattarvand J, Hajihassani M, Abdullah SS. A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty. *Resources Policy*. 2020;68(3101738). DOI: 10.1016/j.resourpol. 2020.101738.
6. Nagovitsyn OV, Wozniak MG. The influence of robotic technologies on the safety of open-pit mining operations. *Mining information and analytical bulletin*. 2022;(12-1):52-62. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_52 (In Russ.).
7. Kopylov AS, Dzhiyeva AK, Kondratiev YuI. An integrated approach to the development of the raw material base of a mining region using resource-reproducing technologies. *Sustainable development of mountain territories*. 2022;14(2):228-239. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-228-239 (In Russ.).
8. Ryl'nikova MV, Klebanov DA, Rybin VV, et al. Control and management of geomechanical state and stability of structural elements of mining engineering elements in open-pit mines based on big data collection and analysis. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):121-128. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-121-128 (In Russ.).
9. Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps, 2020. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/573140211> (In Russ.).
10. Usanov SV, Konovalova YuP, Efremov EYu, et al. Unexpected deformation processes in the rock mass in surface mining: emergence factors and prevention capabilities. *Russian Mining Industry*. 2022;(1S):111-118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118. (In Russ.).
11. Reznichenko SS, Sytenkov VN, Naimova RS. Organization of an integrated system for monitoring the stability of sides and ledges of deep quarries using modern geodetic equipment // *Rational development of the subsoil*. 2017;(2):56-67 (In Russ.).
12. Klebanov AF, Makeev MA, Monakhov NV. Modern stability control system of quarry sides based on the use of MSR radars. *Russian Mining Industry*. 2015;1(119):75-76 (In Russ.).
13. Mustafin MG, Valkova EO, Valkov VA. Ways of development of surveying and geodetic observations for the stability of quarry sides. *Mine Surveying bulletin*. 2022;3(148):13-18 (In Russ.).
14. Kirikov DA, Fedorov VS, Kalimullina DI, et al. Analysis of aerial photography data from unmanned aerial vehicles to study the condition of the sides of a coal mine. *Proceedings of Tula State University. Earth sciences*. 2023;2:236-249 (In Russ.).
15. Boos IYu, Yunakov YuL, Patachakov IV, et al. Studying the structural features of the instrument array using a 3D slope model constructed using a multicopter. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;(12):19-30. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_19 (In Russ.).
16. Zhou H, Xiong HL, Liu Y, et al. Trajectory planning algorithm of UAV based on system positioning accuracy constraints. *Electronics*. 2020;9:250.
17. Lian XG, Li ZJ, Yuan HY, et al. Rapid identification of landslide, collapse and crack based on low-altitude remote sensing image of UAV. *J. Mt. Sci*. 2020;(17):2915-2928.
18. Gushcha DI, Kovrizhnykh EV, Yeretnov NV, et al. Qualitative assessment of geomechanical risks based on the results of long-term monitoring and a 3D model of the deposit built using a multicopter. *Moscow Economic Journal*. 2022;(2). Available from: <https://qe.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2022-7/> (In Russ.).
19. Nizametdinov NF, Nizametdinov RF, Oleinikova EA, et al. Laser-digital measurement technologies for monitoring the condition of quarry instrument arrays. *Mine Surveying Bulletin*. 2020;4(137):43-48 (In Russ.).
20. Zoteev VG, Zoteev OV. Atypical deformations of the sides of deep ore pits and measures to their prevention. *Gornyi Zhurnal*. 2007;(1):40-45 (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Иван Борисович Агарков -

заведующий лабораторией горнопромышленной геологии
отдела геологии и геоинформатики, Открытое акционерное
общество «ВИОГЕМ», 308007, г. Белгород, Российская
Федерация, e-mail: agarkov_ib@viogem-sp.ru

Марина Владимировна Рыл'никова -

главный научный сотрудник, профессор, доктор технических
наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт проблем комплексного освоения недр им.
академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: ryl'nikova@mail.ru

Ирина Львовна Никифорова -

научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного освоения
недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии
наук, 111020, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: nikiforova_i@ipkonran.ru

ABOUT THE AUTHORS

Ivan B. Agarkov -

Head of the Laboratory of Mining Geology of the Department
of Geology and Geoinformatics, Open Joint Stock Company
"VIOGEM", 308007, Belgorod, Russian Federation, e-mail:
agarkov_ib@viogem-sp.ru

Marina V. Ryl'nikova -

Chief Researcher, Professor, Doctor of Technical Sciences, Institute
of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Acad-
emy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation,
e-mail: ryl'nikova@mail.ru

Irina L. Nikiforova -

Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Min-
eral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Rus-
sian Federation, e-mail: nikiforova_i@ipkonran.ru

Критерии авторства / Contribution: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.10.2024. Поступила после рецензирования: 04.12.2024. Принята к публикации: 10.12.2024

Article info

Received: 21.10.2024. Revised: 04.12.2024. Accepted: 10.12.2024