

УДК 004.42 © А.О. Рада¹, К.И. Петерс², А.Д. Кузнецов¹, 2024UDC 004.42 © A.O. Rada¹, K.I. Peters², A.D. Kuznetsov¹, 2024¹ ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия¹ Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation² ООО «ВЗРЫВ ГРУПП», 650000, г. Кемерово, Россия² VZRYV GRUPP LLC, Kemerovo, 650000, Russian Federation

✉ e-mail: radaartem@mail.ru

✉ e-mail: radaartem@mail.ru

Проектирование буровзрывных работ на основе 3D-модели выемочного блока*

Design of drilling and blasting operations based on a 3D model of the excavation block

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-87-91>

В статье рассмотрена актуальность использования цифровых технологий для автоматизации буровзрывных работ (БВР) на предприятиях, осуществляющих добычу полезных ископаемых открытым способом. Рассмотрены существующие российские цифровые решения в области проектирования и мониторинга буровзрывных работ. С целью определения эффективности применения высокоточных координатных данных для решения задач БВР продемонстрирован опыт использования материалов аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования участка угледобычи на территории Кемеровской области – Кузбасса. Применение специального программного обеспечения позволяет сравнивать данные маркшейдерской съемки с трехмерной моделью блока, определять коллизии и ошибки проектирования. Использование цифровых решений в проектировании и контроле результатов проводимых буровзрывных работ позволит снизить долю ручного труда, повысить производительность специалистов, что будет влиять на улучшение качества взрыва с одновременным уменьшением его стоимости.

Ключевые слова: угольная промышленность, трехмерное моделирование, буровзрывные работы, маркшейдерское сопровождение, лазерное сканирование, аэрофотосъемка, программное обеспечение, БВС, ГИС.

Для цитирования: Рада А.О., Петерс К.И., Кузнецов А.Д. Проектирование буровзрывных работ на основе 3D-модели выемочного блока // Уголь. 2024;(6):87-91. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-87-91.

Abstract

The article considers the relevance of the use of digital technologies for automation of drilling and blasting operations at enterprises engaged in open-pit mining, examines existing Russian digital solutions in the field of design and monitoring of drilling and blasting operations. In order to determine the effectiveness of using high-precision coordinate data to solve DBO problems, the experience of using aerial photography

РАДА А.О.

Канд. экон. наук,
директор Института цифры
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: radaartem@mail.ru

ПЕТЕРС К.И.

Заместитель директора
по перспективному развитию
технологий БВР ООО «ВЗРЫВ ГРУПП»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: k.peters@vgroup.one

КУЗНЕЦОВ А.Д.

Директор Центра аэрофотосъемки,
геодезии и кадастровых работ
Института цифры
ФГБОУ ВО «Кемеровский
государственный университет»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: adkuz@inbox.ru



Научно-образовательный
центр «Кузбасс»

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий от 30 сентября 2022 г. № 075-15-2022-1195.

materials and aerial laser scanning of a coal mining site in the territory of the Kemerovo region – Kuzbass is demonstrated. The use of special software allows you to compare the data of the surveying survey with a three-dimensional model of the exploded block, identify collisions and design errors. The use of digital solutions in the design and control of the results of drilling and blasting operations will reduce the proportion of manual labor, increase the productivity of specialists, which will affect the improvement of the quality of the explosion while reducing its cost.

Keywords

Coal industry, three-dimensional modeling, drilling and blasting operations, surveying, laser scanning, aerial photography, software, UAV, GIS

For citation

Rada A.O., Peters K.I., Kuznetsov A.D. Design of drilling and blasting operations based on a 3D model of a excavation block. *Ugol'*. 2024;(6):87-91. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-87-91.

Acknowledgements

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the agreement on the provision of grants from the federal budget in the form of subsidies dated September 30, 2022 No. 075-15-2022-1195.

ВВЕДЕНИЕ

Современные буровзрывные работы (БВР) обеспечивают наиболее реалистичные решения двух важных проблем добычи, а именно, ее стоимости и эффективности производства [1]. По сравнению с механическим способом дробления горной массы с помощью породоразрушающего инструмента, затраты на который могут составлять до 60% общих затрат на добычу полезных ископаемых, использование энергии взрыва является более экономически предпочтительным вариантом разрушения горных пород [2]. А в случаях с большим объемом вскрышных пород и их высокой прочностью – единственным методом добычи ресурсов.

Однако, несмотря на видимые преимущества данного варианта добычи, организация БВР на участке месторождения ведет к временным задержкам производства: при подготовке взрыва в соответствии с обязательными федеральными нормами и правилами промышленной безопасности оборудование необходимо переместить на безопасное расстояние от зоны взрыва. В связи с этим на предприятии возникает проблема простоя горнотранспортного оборудования, соответственно, снижение его производительности. Специалисты отмечают, что в данном случае развитие взрывных работ заключается в создании условий для сокращения количества проводимых взрывов путем их укрупнения [3]. В таком контексте требования к организации БВР возрастут.

Именно буровзрывные работы предопределяют следующие операции в производственном цикле добычи полезных ископаемых и являются основным инструментом сбора информации о прочности и трещиноватости массива [4]. Некачественная буровзрывная работа может привести к увеличению затрат на вторичные взрывы

и выборочную экскавацию, а также к таким неблагоприятным последствиям, как высокий процент негабаритных кусков породы, разброс ее отдельных фракций, повышенное ударно-волновое (акустическое) и сейсмическое воздействие, тектонические разломы [5].

Принимая во внимание указанные риски, осложняющиеся условиями необходимости увеличения объемов одновременно взрывающейся горной массы, важным становится поиск методов автоматизации организации и проведения БВР. Учитывая современные тенденции цифровизации производства и применения комплексных технологических решений получения, передачи, обработки и интерпретации больших объемов данных, на основе которых могут быть улучшены и оптимизированы параметры производства буровзрывных работ или решена контрольная функция выполнения плановых показателей, в качестве инструмента оптимизации БВР следует рассмотреть использование цифровых технологий.

В данной работе рассмотрены существующие решения в области автоматизации буровзрывных работ. В качестве перспективного метода оптимизации организации и проектирования БВР продемонстрирован опыт использования трехмерной закоординированной модели, полученной на основе данных аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования с БВС.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Впервые подход к автоматизации буровзрывных работ предложен в 1976 г. В.А. Коваленко. В целях оптимизации факторов, влияющих на производительность труда и затраты на разработку месторождений, он предложил «создание системы автоматизированного проектирования буровзрывных работ на карьерах (САПР БВР)» [6]. Под руководством В.А. Коваленко в 1997-2000 гг. в Институте коммуникаций и информационных технологий Кыргызско-Российского Славянского университета разработан программно-аппаратный комплекс Blast Maker, предназначенный исключительно для автоматизации процесса проектирования БВР. Функционал «Blast Maker» включает возможности контроля данных каждого бурового станка в режиме реального времени, что позволяет оценить прочностные свойства массива горных пород и отследить динамику их изменения в пределах карьерного поля [7]. Система содержит трехмерные цифровые модели месторождения и поверхности карьера, на основе которых осуществляются проектирование и имитационное моделирование БВР.

В.А. Коваленко отмечает положительные эффекты от внедрения Blast Maker на производстве: «подготовка сводных отчетов, снижение доли ручного труда, повышение производительности труда специалистов при проектировании, снижение времени подготовки проекта БВР, оперативная подготовка выходных документов на массовый взрыв и др.» [8].

«Blast Maker» на сегодняшний день является единственным узкоспециализированным программным обеспечением в области буровзрывных работ. Другие программные решения являются многофункциональными горно-геологическими системами, имеющими в своем составе модуль для проектирования БВР.

Среди отечественных программных решений задачу автоматизации проектирования буровзрывных работ возможно решить с помощью модуля «БВР» в горно-геологической системе «Геомикс» (разработчик – ОАО «Виогем», г. Белгород). В основе модуля цифровые реалистичные модели месторождений и горных выработок, позволяющие создавать точные чертежи, схемы, а также моделировать реальный взрыв, оценивать взрывное разрушение горных пород и прогнозировать качество дробления горной массы [9]. Использование модуля «БВР» повышает качество подготовки проведения взрыва, посредством работы в модуле возможно формировать конструкции зарядов с учетом энергоемкости бурения и прогнозировать особенности и последствия проводимых взрывных работ [10].

Другим программным продуктом в сфере автоматизации буровзрывных работ является система «Mine Frame» (разработчик – КНЦ РАН, г. Апатиты). «Mine Frame» позволяет создавать 3D-модели взорванного блока по данным маркшейдерских съемок, в автоматическом режиме проектировать модели взрывных скважин, прогнозировать зоны разрушения, рассчитывать время взрыва блока или каждой скважины по отдельности. Также в подсистеме реализована поддержка сторонних форматов, включающих форматы приборов маркшейдерской съемки и буровых установок [11, 12].

В автоматизированной системе управления горнотранспортным комплексом «Карьер» (разработчик – группа компаний «Цифра») также включен функционал, предназначенный для проектирования и мониторинга БВР. Другой продукт разработчика «VG Drill» имеет возможности интеграции данных сторонних систем для проектирования буровзрывных работ, с помощью программы специалист может отслеживать основные параметры бурения в реальном времени (давление воздуха, угол, осевое давление, длительность бурения, скорость и глубина бурения и т.п.), контролировать показатели эффективности и вести учет расходных материалов. Функционал программы влияет на сокращение издержек буровзрывных работ, обеспечивает точную навигацию и контроль параметров бурения, что снижает риски необходимости повторного бурения [13].

Зарубежный рынок представлен решениями компаний Orica (США), Hexagon (Швеция), MineExcellence (Австралия), GEOVIA (Франция), Techbase (США), Mincom, Minemap, Maptek (США), DATAMINE (Франция), Gemcom (Канада), Vulcan (Австралия) и др. [14]. Но вопрос их применения в условиях российского производства спорен. В работе [15] отмечаются сложности внедрения зарубежного программного обеспечения (ПО), отражающиеся в отличии зарубежных методик ведения БВР от отечественных, в основном это связано с различием подходов к расчету оптимальных параметров БВР и отличиями в законодательстве. Проблемой использования зарубежного программного обеспечения также является его высокая стоимость [16]. Данные факторы значительно затрудняют использование зарубежного ПО российскими горнодобывающими компаниями. Поэтому в данной связи рассматривать их не представляется целесообразным.

В основе рассмотренных программных решений для проектирования буровзрывных работ – построенная по результатам маркшейдерской съемки цифровая модель месторождения. Традиционный метод наземной съемки блока с помощью GNSS-приемника подразумевает получение около 125 точек с шагом 20 м. При таком методе получения геоданных отклонение фактической высотной отметки устья скважины может составлять более двух метров. Отклонения координатных данных расположения скважин при передаче на специализированное ПО бурового станка приводят к сверхнормативному использованию оборудования, неверному расчету массы заряда взрывчатого вещества, нарушениям безопасности производства работ и др.

В этой связи крайне важным становится разработка программного обеспечения с единой высокоточной координатной привязкой данных при проектировании и проведении буровзрывных работ. Целесообразным представляется использование результатов воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БВС для проектирования буровзрывных работ и верификации данных. Трехмерная модель рельефа, построенная по данным съемки с БВС, содержит закоординированное плотное облако точек (до 3 млн точек) с шагом 20 см. Такая точность снижает риски ошибок при проектировании и контроле результатов проводимых работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 2022-2023 гг. в ходе исполнения проекта «Геоинформационная система цифрового регионального управления» КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс» было разработано веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу». Функционал данной программы предполагает работу с трехмерными моделями участков и дополнительными векторными слоями, включая возможность сопоставления проектных и фактических данных, проведения измерений, поиска коллизий и пр.

В целях апробации применения разработанного веб-приложения в задачах проектирования буровзрывных работ произведено информационное наполнение системы новыми геопространственными материалами, полученными по итогам проведения работ по аэрофотосъемке и воздушному лазерному сканированию выемочного блока участка угольного месторождения в Кемеровской области – Кузбассе.

Аэрофотосъемка и воздушное лазерное сканирование участка осуществлялись в три этапа:

- 1) до момента подготовки буровзрывных работ;
- 2) в момент подготовительных мероприятий буровзрывных работ;
- 3) после проведения массового взрыва.

Данная этапность обусловлена необходимостью контроля данных по каждому процессу буровзрывных работ от проектирования до подсчета объема взорванной массы.

Геопространственные материалы включали: детализированный ортофотоплан местности, плотное облако точек по результатам фотограмметрической обработки данных аэрофотосъемки, облако точек лазерных отражений (3D-модель).

Для выполнения задач по проектированию и мониторингу проведения буровзрывных работ в веб-приложении реализован следующий функционал:

- отображение двумерной и трехмерной пространственной информации об участке месторождения;
- вывод картографической информации на любой принтер/плоттер с автоматизированной разбивкой на страницы;
- хранение одновременно нескольких карт с неограниченным количеством картографических слоев;
- подсчет объема насыпи;
- выгрузка измерений (длины, периметра, площади, координат);
- наложение на имеющуюся 3D-модель объекта векторных данных;
- загрузка проекта бурения;
- отображение проекта и факта бурения на имеющуюся 3D-модель объекта;
- координатная привязка данных модели;
- верификация данных (сравнение проекта с фактически проведенными буровыми и взрывными работами).

Для формирования дополнительных слоев в систему включены: линии высот до и после проведения взрывных работ, топографический план блока, проектное расположение скважин, итоговое расположение скважин после проведения буровых работ. Все полученные векторные данные были загружены в разработанную «Систему управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу».

Каждый слой может быть перекрыт другим слоем для поиска коллизий и неточностей маркшейдерской съемки. В частности, по итогам наложения слоя «Топографический план блока» и «Линии высот участка» возможно обнаружить неточности съемки, проводимой методом ГНСС. При сравнении планового расположения скважин и фактического рельефа местности выявляются коллизии расположения части скважин над поверхностью земли (см. рисунок), их выход за пределы блока проводимых ра-

бот (иногда даже за борт карьера, что может привести к падению бурового станка).

Использование данного функционала в разработанном программном обеспечении направлено на создание единой сверхточной навигации при проектировании и проведении буровзрывных работ, на создание инструмента высокоточного определения координат для исключения ошибок при проектировании и бурении, снижения влияния человеческого фактора при проведении работ.

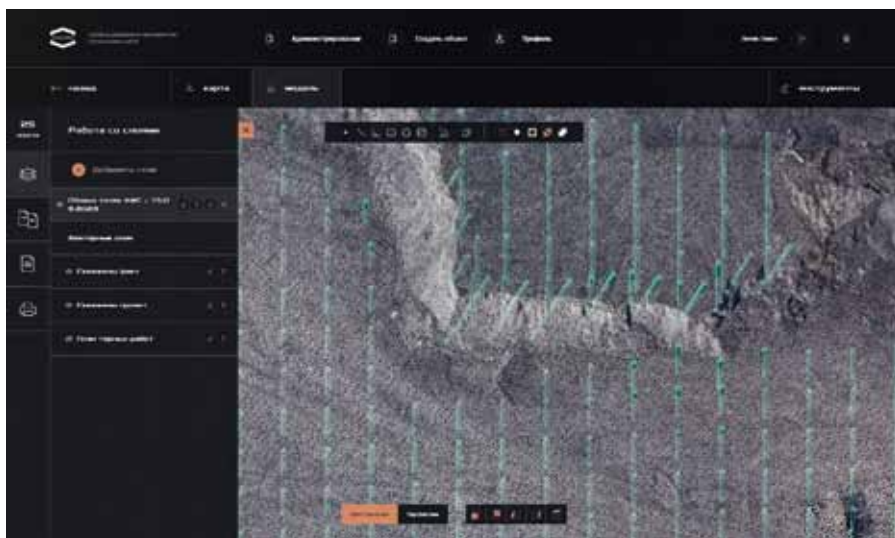
Следующим крайне важным этапом доработки ПО будет являться интеграция в веб-приложение данных с бурового оборудования, внедрение научно и практически подтвержденных математических алгоритмов по расчету энергоемкости бурения и оптимальных параметров для проектирования буровых и взрывных работ в 3D-формате, исходя из геологических особенностей участка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт внедрения автоматизированных информационных систем в области буровзрывных работ доказывает эффективность применения цифровых технологий в задачах БВР. Рассмотренные отечественные разработки имеют схожий функционал для проектирования буровзрывных работ, в основе решений создание цифровой модели месторождения на основе данных маркшейдерской съемки. Главным отличием рассмотренных многофункциональных систем в разрезе задач буровзрывных работ от решения «Blast Maker» является отсутствие связанных решений по автоматизации буровых работ. Но в то же время в ГИС «Геомикс» и ГИС «Mine Frame» возможен обмен данными со сторонними системами, применяемыми в БВР, в том числе программным обеспечением буровых установок. При этом использование в расчетах данных нескольких систем может привести к возникновению коллизий, некорректной передаче данных, что может создавать риски сверхнормативного использования оборудования, неверных расчетов параметров буровзрывных работ, ошибок в работе буровых станков (вплоть до их падения). Приме-

нение цифровых технологий позволяет оптимизировать затраты на проведение буровзрывных работ за счет безошибочности в расчетах ввиду отсутствия человеческого фактора, снижения времени на подготовительные работы и выбора наиболее оптимальных параметров взрыва. Популяризация и совершенствование программных решений в области проектирования и производства массового взрыва для предприятий горнодобывающей и строительной отраслей должны стать актуальной и значимой задачей, позволяющей повысить эффективность производственных процессов БВР.

Применение продемонстрированного программного обеспечения при проведении БВР на горнодобывающем предприятии позволит оптими-



Обнаруженные коллизии планирования буровых работ
Identified conflicts in planning of drilling operations

зировать затраты и сократить влияние человеческого фактора на проектирование и производство БВР. За счет использования высокоточной закоординированной трехмерной модели рельефа, полученной посредством обработки данных аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования с БВС, и благодаря возможности оперативного выявления ошибок маркшейдерской съемки веб-приложение позволит снизить риск ошибок специалистов буровзрывных работ и затраты на их проведение. Кроме того, трехмерная цифровая модель блока может служить инструментом для проведения различных измерений участка и сравнения планируемых и фактически полученных результатов.

Список литературы • References

- Al-Bakri A., Hefni M. A review of some nonexplosive alternative methods to conventional rock blasting. *Open Geosciences*. 2021;13(1):431-442. DOI: 10.1515/geo-2020-0245.
- Al-Bakri A.Y., Sazid M. Application of Artificial Neural Network (ANN) for Prediction and Optimization of Blast-Induced Impacts. *Mining*. 2021;(1):315-334. DOI: 10.3390/mining1030020.
- Дробление горных пород взрывом в карьерах: монография / Н.Н. Казаков, С.Д. Викторов, А.В. Шляпин и др. М.: РАН, 2020. 520 с.
- Taiwo B.O. Effect of charge load proportion and blast controllable factor design on blast fragment size distribution. [Electronic resource]. *Journal of Brilliant Engineering*. 2022;(3):4658. Available at: https://www.acapublishing.com/dosyalar/baski/BEN_2022_660.pdf (accessed 15.05.2024).
- Mysin A., Kovalevskiy V. Creation and Verification of Numerical Model of Explosive Charge Blast in The Ansys Software System for the Purpose of Substantiating the Optimal Parameters of Drilling and Blasting Operations. [Electronic resource]. *E3S Web of Conferences*. 2020;(74). Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/34/e3sconf_iims2020_01046/e3sconf_iims2020_01046.html (accessed 15.05.2024).
- Коваленко В.А. Автоматизированная подготовка производства на карьерах // Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета. 2009. Т. 9. № 11. С. 118-123.
Kovalenko V.A. Automated production preparation at quarries. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo Universiteta*. 2009;9(11): 118-123.
- Описание функциональных характеристик программного обеспечения «Система автоматизированного проектирования буровзрывных работ в «Blastmaker». [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://blastmaker.kg/supporting_documentation_blastmaker_software/ (дата обращения: 15.05.2024).
- Коваленко В.А. Система автоматизированной подготовки производства на карьерах «Blast Maker» // Добывающая промышленность. 2018. Т.11. № 3. С. 294-296.
Kovalenko V.A. Automated production preparation system at Blast Maker quarries. *Dobyvayuschaya promyshlennost*. 2018;11(3): 294-296.
- Программа «Геомикс». [Электронный ресурс]. URL: <https://geomix.ru/software/geomix/> (дата обращения: 15.05.2024).
- Морозова, Т.П. Перспективы применения систем цифрового проектирования и сопровождения горнопромышленных работ: ГИС «Геомикс» и «Mineframe» / Инновационные перспективы Донбаса: Материалы 8-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 24-26 мая 2022 года. Т. 6. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. С. 21-25.
- Корниенко А.В. Использование компьютерного моделирования для проектирования массовых взрывов в карьерах. [Электронный ресурс]. // Север промышленный. 2007. № 12. URL: <https://helion-ltd.ru/modelburst/> (дата обращения: 15.05.2024).
Kornienko A.V. The use of computer modeling for the design of mass explosions in quarries. [Electronic resource]. *Sever promyshlennyj*. 2007;(12). Available at: <https://helion-ltd.ru/modelburst/> (accessed 15.05.2024).
- Услуги Mine Frame. [Электронный ресурс]. URL: <http://mineframe.ru/predpriyatiam/uslugi/> (дата обращения: 15.05.2024).
- Официальный сайт группы компаний «Цифра». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zyfra.com/ru/> (дата обращения: 15.05.2024).
- Кирсанов А.К. Анализ программных продуктов для проектирования буровзрывных работ при отработке месторождений подземным способом // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. № 2. С. 249-259.
Kirsanov A.K. Analysis of software products for the design of drilling and blasting operations during underground mining. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*. 2023;(2):249-259.
- О цифровом проектировании процессов взрывания на открытых горных работах / А.Н. Гришин, В.Л. Гаврилов, Н.А. Немова и др. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2021. Т. 8. № 2.
Grishin A.N., Gavrilov V.L., Nemova N.A., Reznik A.V. On digital design of blasting processes in open-pit mining. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2021;8(2).
- Бычкова Л.А. Анализ опыта цифровой трансформации геологической отрасли / Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы XII Международной научно-практической конференции, Междуреченск, 26 апреля 2023. Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 1-116.

Authors Information

Rada A.O. – PhD (Economic), Director of the Institute of Digits of the Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: radaartem@mail.ru

Peters K.I. – Deputy Director for Advanced Development of DBO Technologies VZRYV GRUPP LLC, 650054, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: k.peters@vgroup.one

Kuznetsov A.D. – Director of the Center for Aerial Photography, Geodesy and Cadastral Works of the Institute of Digits of the Kemerovo State University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: adkuz@inbox.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 6.05.2024

Поступила после рецензирования: 16.05.2024

Принята к публикации: 26.05.2024

Paper info

Received May 6, 2024

Reviewed May 16, 2024

Accepted May 26, 2024