

Геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния карьерных откосов по данным комплексного геодезического мониторинга

Г. С. Мадимарова[✉], С. М. Алекпаев, А. М. Жумахан, Ш. А. Жантуева

*Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан*

✉ madimarovagulmira69@gmail.com

Резюме. Представлены результаты комплексного исследования геотехнического состояния бортов карьера Шиилибулак Каратауского фосфоритоносного бассейна на основе геодезического мониторинга, дистанционного зондирования Земли и численного моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива. Целью исследования является выявление потенциально неустойчивых участков карьерных откосов и оценка их устойчивости для принятия инженерных решений по повышению безопасности открытых горных работ. Методика включает создание локальной геодезической сети, выполнение высокоточных GNSS-наблюдений, аэрофотосъемку с использованием беспилотного летательного аппарата, наземное лазерное сканирование, построение трехмерной цифровой модели карьера и моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в программном комплексе Geostab. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем комплексного геомеханического мониторинга и прогнозировании деформационных процессов на карьерах со сложными горно-геологическими условиями.

Ключевые слова: геомеханика, устойчивость, горный массив, моделирование, откос, напряженно-деформированное состояние, БПЛА

Финансирование. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования РК в рамках грантового финансирования ИРН № AP23489372.

Для цитирования: Мадимарова Г.С., Алекпаев С.М., Жумахан А.М., Жантуева Ш.А. Геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния карьерных откосов по данным комплексного геодезического мониторинга. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (4): 49-53. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-49-53>.

Geomechanical modeling of the stress-strain state of open-pit slopes based on integrated geodetic monitoring data

G. S. Madimarova[✉], S. M. Alekpayev, A. M. Zhumakhan, Sh. A. Zhantuyeva

*Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev
(Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan*

✉ madimarovagulmira69@gmail.com

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive investigation of the geotechnical condition of the slopes of the Shiilibulak open-pit mine in the Karatau phosphorite basin, based on geodetic monitoring, remote sensing, and numerical modeling of the stress-strain state of the rock mass. The aim of the study is to identify potentially unstable slope sections and assess their stability to support engineering decisions aimed at improving the safety of open-pit mining operations. The proposed methodology includes the establishment of a local geodetic control network, high-precision GNSS observations, UAV-based aerial photogrammetry, terrestrial laser scanning, the development of a three-dimensional digital model of the open pit, and finite element modeling of the stress-strain state using the GeoStab software package.

The obtained results can be applied to the development of integrated geomechanical monitoring systems and to the prediction of deformation processes in open-pit mines under complex mining and geological conditions.

Keywords: geomechanics, slope stability, rock mass, numerical modeling, open-pit slope, stress-strain state, UAV

Funding. This study was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant funding from the Institute of Scientific Research No. AP23489372.

For citation: Madimarova G.S., Alekpayev S.M., Zhumakhan A.M., Zhantuyeva Sh.A. Geomechanical modeling of the stress-strain state of open-pit slopes based on integrated geodetic monitoring data. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (4): 49-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-49-53>.

Введение

Многочисленные исследования, посвященные обеспечению устойчивости карьерных откосов, требуют дальнейшего совершенствования в связи с развитием современных технологий геомониторинга. Несмотря на широкое применение геомеханических и геодинамических исследований на горнодобывающих предприятиях Казахстана, полностью исключить возникновение техногенных аварий пока не удастся.

Разработка месторождений сопровождается изменением естественного напряженно-деформированного состояния горного массива, поэтому важное значение имеет исследование его трещиноватости до начала и в процессе эксплуатации, особенно с увеличением глубины открытых горных работ и усложнением горно-геологических условий. Для обеспечения промышленной безопасности необходима достоверная информация о состоянии массива и факторах, определяющих развитие геомеханических процессов [1–3].

Эффективный контроль устойчивости карьерных откосов возможен на основе комплексного геомониторинга, объединяющего геологические, геофизические и геодезические данные с последующим моделированием напряженно-деформированного состояния массива. Полученные результаты используются для прогнозирования опасных зон и принятия решений по укреплению ослабленных участков.

Основой моделирования является высокоточная трехмерная модель карьера, формируемая по данным съемки беспилотными летательными аппаратами. Такие модели обеспечивают детальную информацию о пространственной структуре откосов и степени их нарушенности. Координаты, полученные традиционными геодезическими методами, применяются в качестве контрольных точек для оценки и повышения точности данных дистанционного зондирования [4–6].

Группа месторождений фосфоритоносного бассейна Каратау занимает обширную площадь, в ее состав входит месторождения Аксай, Шиилибулак, Баба-ата, Ушбас, Герес, Архарлы, Коксу, Акжар, Жанатас, Коныртасс, Северный Буркитти, Кокжон, Батырбай, Дегерес, Беркуты, Карашат, Жылан, Актас, Жетимтал, Алажар, Кыршабакты, Туйсейай, Тесиктас, Тамды, Арбатас, Чулактау, Жетимшоки.

На рисунке 1 представлено расположение наблюдательных пунктов геодезического мониторинга, созданных для контроля деформационных процессов на карьере Шиилибулак.

На космическом снимке представлена территория карьера Шиилибулак, расположенного в пределах Каратауского фосфоритового бассейна. Красным цветом обозначен исследуемый карьер, а зеленым – показаны четыре наблюдательных пункта геодезического мониторинга (ПП1 – ПП4), размещенные по периметру карьера. Пункты установлены с учетом геометрии горных выработок, конфигурации карьерных бортов и потенциально неустойчивых участков массива. Такое расположение обеспечивает создание локальной опорной геодезической сети для выполнения повторных высокоточных GNSS-наблюдений, определения пространственных

смещений, оценки устойчивости откосов и контроля развития деформационных процессов на всех этапах эксплуатации месторождения.

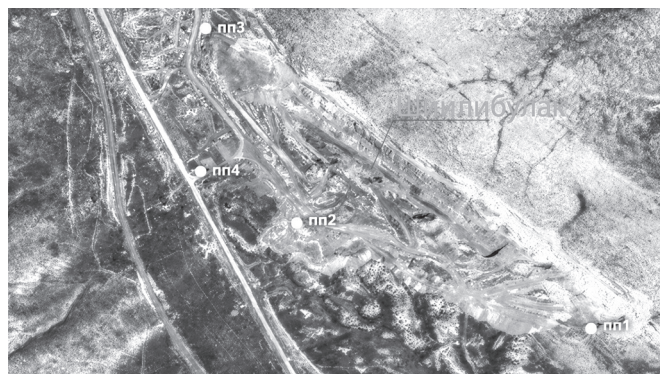


Рис. 1. Схема расположения наблюдательных пунктов геодезического мониторинга на космическом снимке карьера Шиилибулак / **Fig. 1.** Layout of geodetic monitoring observation points on a satellite image of the Shiilibulak quarry

Методы исследований

В данной работе авторами предложен способ моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива при открытой разработке карьера Шиилибулак фосфоритоносных месторождений бассейна Каратау с целью принятия управленческих решений по укреплению неустойчивых участков карьерных откосов, поставленных в предельное положение, который состоит из пяти этапов.

На первом этапе выполнялось исследование геолого-структурной характеристики фосфоритоносных месторождений бассейна Каратау путем изучения отчетов республиканского геологического фонда для создания базы геофизической и геологической информации исследуемого объекта по выявлению внутренней структуры и геометризации пространственного положения плоскостей тектонических нарушений, геологических дислокаций, зон неоднородностей и структурной нарушенности горного массива. На основании выполненного анализа определялись потенциальные зоны горного массива, склонные к обрушению из-за перераспределения напряжений в прибортовых массивах горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых, а также изучались физико-механические свойства горного массива карьера Шиилибулак фосфоритоносных месторождений бассейна Каратау [7, 8].

Для выполнения пространственной координатной привязки к пунктам маркшейдерской опорной сети карьера Шиилибулак осуществлялась съемка с помощью БПЛА. Исследование выполнялось по сохраненным координатам ГТС во время интенсивной разработки карьера Шиилибулак методом спутникового позиционирования. Измерения были проведены статическим способом с интервалом записи данных в 2 секунды, при этом приемники находились на каждой из точек, ограничивающих каждую сторону геодезической

сети. На основе полученных разниц координат в пространстве были рассчитаны изменения длин линий и высот между точками геодезической сети. Затем были построены полные векторы смещений точек, отражающие трендовые движения, произошедшие в течение этого времени, а также деформации, вызванные ими.

Для уточнения координат маркшейдерской опорной сети карьера Шиилибулак выполнены геодезические измерения методом спутникового позиционирования. В качестве исходных пунктов использованы пункты триангуляции Государственной геодезической сети, предоставленные филиалом Национального центра геодезии и пространственной информации. В качестве базовой точки и пересчета на WGS 84 использован пункт государственной геодезической сети Высота 813 ($X = 4800940.052$, $Y = 599146.703$, $Z = 812.735$).

Референционные базы были установлены на пунктах Государственной геодезической сети Высота 813. В качестве исходных данных приняты уравниваемые координаты пунктов по определенным параметрам перехода с WGS84 в местную систему координат и высот, которые явились геодезической основой при выполнении наземного лазерного сканирования, результаты которого легли в основу моделирования напряженно-деформированного состояния карьерных откосов карьера Шиилибулак.

Для выравнивания геодезических измерений были применены два метода. Первый метод включал центрирование и ориентирование сети относительно условно неподвижной точки. Второй метод заключался в свободном выравнивании сети с последующим центрированием и ориентированием по методу наименьших квадратов с учетом минимизации суммы квадратов значений векторов смещений [9, 10].

Основными полезными ископаемыми являются фосфатные и кремнистые руды, использующиеся для производства желтого фосфора и концентрированных удобрений.

Мощность рудных тел (при нормальном залегании) колеблется от 5,74 до 21,2 м, суммарная мощность фосфоритных слоев достигает 45 м. Четкой закономерности в изменчивости мощности по падению и простиранию не наблюдается. Рудные тела представляют собой моноклинально падающий пласт фосфоритов с опрокинутым залеганием на юго-запад под углами 60–80°.

Основные физико-механические свойства разрабатываемых пород представлены в таблице.

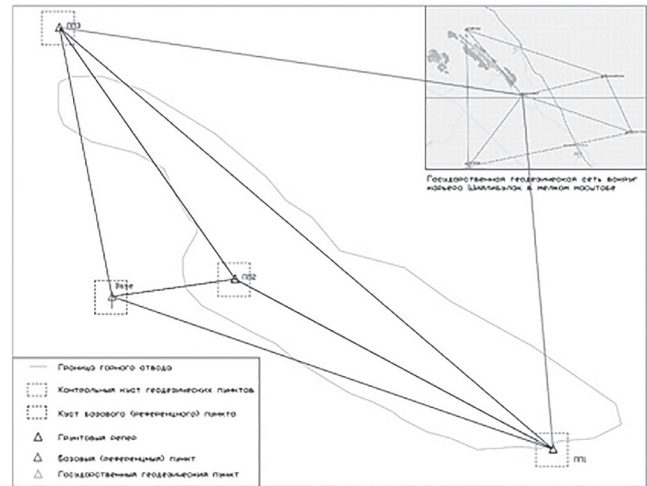
Таблица / Table

**Физико-механические свойства пород /
Physical and mechanical properties of rocks**

Порода	Коэффициент крепости по шкале профессора Протодяконова	Объемный вес, т/м³	Коэффициент разрыхления	Влажность, %
Фосфоритная руда	11	2,75	1,5	до 1
Доломиты	8–10	2,77	1,5	—/—
Известняки	8–10	2,8	1,5	—/—
Глинистые сланцы	5–8	2,71	1,5	—/—
Кремнистые сланцы	5–8	2,68	1,5	—/—
Кремни	12–15	2,7	1,3	—/—
Наносы	0,6–0,8	1,8	1,2	—/—

В качестве исходного пункта для установки базовой референционной станции выбран пункт Государственной геодезической сети Высота 813. Все статические измерения выполнены по базовой линии на данный пункт. Продолжительность наблюдения – 80 минут.

Схема проведения наблюдений приведена на рисунке 2.



**Рис. 2. Схема проведения наблюдений /
Fig. 2. Observation scheme**

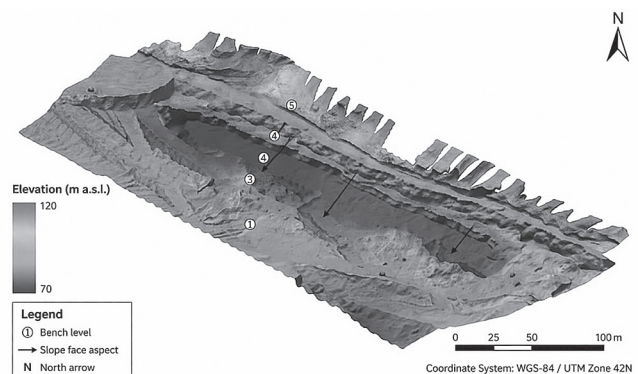
Измерения выполнялись ГНСС-оборудованием в режиме статики, методом сетевого позиционирования.

В процессе работы соблюдены следующие необходимые условия наблюдений:

- максимальное расстояние между приемниками – 5,0 км;
- минимальное количество наблюдаемых спутников для обработки – 8;
- интервал записи – 5 секунд;
- маска по углу возвышения – 10 градусов;
- точность получения координат: в плане – 0,002 м; по высоте – 0,002 м;
- GDOP (геометрия спутников) – менее 5;
- длительность наблюдений на точке – 80 минут.

Параметры трансформации с WGS-84 в местную систему координат и высот приведены на рисунке 3 [11–13].

Съемка БПЛА была обработана в Agisoft Metashape. Съемка со сканера обработана в Reconstructor. Обе съемки соединены в одно ПО Cloud Compare. Облако точек и 3D-модель созданы на основе двух средств измерений (сканер + БПЛА) и представлены на рисунке 3.



**Рис. 3. 3D-модель карьера Шиилибулак /
Fig. 3. 3D model of the Shiilibulak quarry**

На рисунке 3 показана цифровая модель рельефа с цветовой визуализацией высотных отметок. Цветовая шкала отражает распределение абсолютных высот поверхности исследуемого участка. Повышенные элементы рельефа отображаются теплыми цветами, тогда как пониженные участки выделены холодными оттенками. Такая модель позволяет количественно анализировать перепады высот, уклоны откосов и пространственное положение элементов карьерного рельефа.

Для построения геомеханической модели использованы оцифрованные контуры карьера Шиилибулак. Путем совмещения этих контуров в привязке к системе координат создана однородная конечно-элементная 3D-модель месторождения.

При моделировании трехмерной области массива граничные условия определяются закреплением перемещений модели:

- плоскость XY (дно модели) закреплена по осям X , Y и Z ;
- плоскость YZ закреплена по осям X и Y ;
- плоскость XZ закреплена по оси Y .

Эта модель включает в себя цифровую трехмерную модель поверхности борта, полученную на основе фотограмметрической обработки данных БПЛА, опорные геодезические пункты (станции наблюдений), показанные синими условными знаками, размещенные за пределами зоны активных деформаций, измерительные направления (лучи визирования), обозначенные красными линиями, направленные от станций к контролируемым участкам борта, связи между опорными пунктами, выполненные синими линиями, формирующие пространственную геодезическую сеть и обеспечивающие избыточность и контроль точности измерений, профильные линии и характерные элементы рельефа, используемые для

анализа направлений возможных смещений и оценки устойчивости [14, 15].

Выводы

В результате выполненных исследований разработана комплексная методика оценки устойчивости карьерных откосов, основанная на совместном использовании высокоточных геодезических измерений, беспилотной аэрофотосъемки, наземного лазерного сканирования и численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Создана локальная геодезическая сеть, обеспечивающая высокоточную пространственную привязку результатов мониторинга и возможность выполнения повторных циклов наблюдений за деформационными процессами.

Построенная трехмерная цифровая модель карьера Шиилибулак позволила детально воспроизвести геометрию карьерных откосов и использовать ее в качестве основы для геомеханического моделирования методом конечных элементов.

Практическая значимость выполненной работы заключается в создании научно обоснованной методики комплексного геомеханического мониторинга, позволяющей своевременно выявлять потенциально опасные зоны, прогнозировать развитие деформационных процессов и разрабатывать инженерные мероприятия по повышению устойчивости карьерных откосов. Предложенный подход может быть рекомендован для применения на других карьерах Каратауского фосфоритового бассейна и аналогичных объектах открытой разработки полезных ископаемых, где требуется обеспечение промышленной безопасности и повышение эффективности геомеханического контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Табылдиев К.Т., Киперман Ю.А., Тимченко А.И. Каратауский фосфоритный бассейн. Алма-Ата, 1970: 210. Tabylidiev K.T., Kiperman Yu.A., Timchenko A.I. Karatau phosphorite basin. Alma-Ata, 1970: 210. (In Russ.).
2. Кривошеина М.И., Нурпеисова М.Б. Свойства горных пород Каратауского фосфоритового бассейна. *Свойства пород месторождений горнохимического сырья*. Под ред. М. Е. Певзнера. Москва, 1971: 87-104. Krivosheina M.I., Nurpeisova M.B. Properties of rocks. Karatau phosphorite-bearing basin. In the book. *Properties of rocks of deposits of mining and chemical raw materials*. Edited by M.E. Pevzner Moscow, 1971: 87-104. (In Russ.).
3. Нурпеисова М.Б., Бекбасаров Ш.С. Учет трещиноватости при исследовании деформации и сдвижения горных пород. Горное дело: Сборник МВнССО КазССР. Алма-Ата, 1975; II: 134-137. Nurpeisova M.B., Bekbasarov Sh.S. Accounting for fracturing in the study of deformation and displacement of rocks. Sb. MViSSO KazSSR. Mining. Alma-Ata, 1975; II: 134-137. (In Russ.).
4. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений. *ФТПРПИ*. 2018. № 5. С. 33-44. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180504>. Kozyrev, A.A., Panin, V.I., Semenova, I.E. On the geodynamic safety of mining operations under rockburst-hazard conditions: The case of the Khibiny apatite deposits. *Journal of Mining Science*. 2018; 5: 33-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180504>.
5. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. Москва, 1975: 378. Fisenko G.L. Stability of quarry and waste dump sides. Moscow, 1975: 378. (In Russ.).
6. Машанов А.Ж., Певзнер М.Е., Бекбасаров Ш.Ш. Устойчивость бортов карьеров Каратауского бассейна. Алма-Ата, 1981: 120. Mashanov A.Zh., Pevzner M.E., Bekbasarov Sh.S. Stability of the sides of quarries of the Karatau basin. Alma-Ata, 1981: 120. (In Russ.).
7. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика. Москва, 2005: 347. Pevzner M.E., Iofis M.A., Popov V.N. Geomechanics. Moscow, 2005: 347. (In Russ.).
8. Рахимов В.Р. и др. Прогнозирование трещиноватости массива горных пород с глубиной в шахтах Средней Азии. Ташкент, 1983: 158. Rakhimov V.R. et al. Prediction of fracturing of rock mass by depth in the mines of Central Asia. Tashkent, 1983: 158. (In Russ.).
9. Методические указания по постановке исследований сдвижения горных пород на моделях. Ленинград, 1974: 65. Methodological guidelines for setting up studies of rock movement on models. Leningrad, 1974: 65. (In Russ.).
10. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на рудных месторождениях с недостаточно изученным процессом сдвижения горных пород. Ленинград, 1988: 48. Temporary rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in ore deposits with an unexplored process of rock movement. Leningrad, 1988: 48. (In Russ.).
11. Черный А.Д., Терентьев В.И. Комплексная открыто-подземная разработка приповерхностных и подбурьерных запасов рудных месторождений. Москва, 1988: 244.

12. Cherny A.D., Terentyev V.I. Complex open-underground development of instrument and sub-barrier reserves of ore deposits. Moscow, 1988: 244. (In Russ.).
13. Экологическая и промышленная безопасность недропользования. Под общей редакцией М.Б. Нурпеисовой. Алматы, 2013: 434. Ecological and industrial safety of subsoil development/under the general editorship of M.B.Nurpeisova. Almaty, 2013: 434. (In Russ.).
14. Безруков П.Л. Геологическое строение фосфоритового бассейна Каратауского бассейна и основные результаты геологоразведочных работ. *Фосфориты Каратау*. Алма-Ата, 1954: 3-66. Bezrukov P.L. Geological structure of the phosphorite-bearing Karatau basin and the main results of geological prospecting works. *Phosphorites of Karatau*. Alma-Ata, 1954: 3-66. (In Russ.).
15. Мурсалимова Е.А., Шаймерденова А.А., Мадимарова Г.С. и др. Использование индекса NDVI при мониторинге земель фосфоритных месторождений. *Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева*. 2023; 3: 8896. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2023_3_80. Mursalimova E.A., Shaimerdenova A.A., Madimarova G.S., et al. Using the NDVI index in monitoring the lands of phosphorite deposits. *Bulletin of the East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbayev*. 2023; 3: 88-96. (In Russ.). https://doi.org/10.51885/1561-4212_2023_3_80.
16. Мадимарова Г.С., Жантуева Ш.А., Танкаман Ж.А. Геодезические методы мониторинга техногенных систем месторождения Акбакай. *Материалы II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых»*. Алчевск, 2021: 95-97. Madimarova G.S., Zhantueva Sh.A., Tankaman Zh.A. Geodetic methods of monitoring technogenic systems of the Akbakai deposit. *II International Scientific and Practical Conference "Actual problems of modern science: the view of young scientists"*. Alchevsk, 2021: 95-97. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гулмира Сурабалдиевна Мадимарова –

канд. техн. наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0000-0002-9155-6332>;
 e-mail: madimarovagulmira69@gmail.com

Султан Муратулы Алекпаев –

магистрант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0009-0007-1542-055X>;
 e-mail: asel.zhumaxan@mail.ru

Асел Мусакызы Жумахан –

магистрант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан;
<https://orcid.org/0009-0007-1542-055X>;
 e-mail: asel.zhumaxan@mail.ru

Шинаркуль Абековна Жантуева –

старший преподаватель, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (Satbayev University), г. Алматы, Республика Казахстан; <https://orcid.org/0009-0009-9630-4204>;
 e-mail: shnar19610408@gmail.com

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.07.2026
 Поступила после рецензирования: 11.08.2026
 Принята к публикации: 13.08.2026

ABOUT THE AUTHORS

Gulmira S. Madimarova –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0000-0002-9155-6332>;
 e-mail: madimarovagulmira69@gmail.com

Sultan M. Alekpayev –

master's student, Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0009-0007-1542-055X>;
 e-mail: asel.zhumaxan@mail.ru

Asel M. Zhumakhan –

master's student, Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan;
<https://orcid.org/0009-0007-1542-055X>;
 e-mail: asel.zhumaxan@mail.ru

Shinarkyl A. Zhantueva –

senior lecturer, Kazakh National Research Technical University K. I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Republic of Kazakhstan; <https://orcid.org/0009-0009-9630-4204>;
 e-mail: shnar19610408@gmail.com

Contribution:

The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 27.07.2026
 Revised: 11.08.2026
 Accepted: 13.08.2026