



## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КАЗАХСТАНЕ



**А.Х. СЫЗДЫКОВ<sup>1</sup>**,  
директор Института геологии и  
нефтегазового дела им. К.Турысова,  
профессор кафедры  
«Нефтяная инженерия», к.т.н.,  
доцент, академик,  
[a.syzdykov@satbayev.university](mailto:a.syzdykov@satbayev.university)



**Г.Ж. МОЛДАБАЕВА<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук,  
профессор,  
[g.moldabayeva@satbayev.university](mailto:g.moldabayeva@satbayev.university)



**Г.А. БУКАЕВА<sup>1</sup>**,  
старший преподаватель  
кафедры «Иностранных  
языков»



**Д. АГАПИТОВ<sup>2</sup>**,  
к.г.-м.н., исполняющий партнер



**М. КУНАЕВ<sup>2</sup>**,  
управляющий партнёр

<sup>1</sup>САТПАЕВ УНИВЕРСИТЕТ,  
Республика Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

<sup>2</sup>ТОО «DIGITAL GEOLOGY»  
Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Сагадат Нурмагамбетов, д. 91



*Решение задачи ускоренного восполнения и развития ресурсной базы в области полезных ископаемых в настоящее время можно решить за счет развития и применения искусственного интеллекта (ИИ) и глубокого машинного обучения на примере цифрового аналитического комплекса геологических исследований при поиске и освоении месторождений полезных ископаемых Digital Geology Kz.*

*Изучая относительно небольшой, но уже приносящий первые высокие дивиденды, мировой опыт применения технологий ИИ можно отметить значительное повышение эффективности геологоразведочных работ за счет автоматизации и прежде всего возможности выполнения анализа больших объемов данных. Одной из ключевых задач является обязательное вовлечение в процессы геологического прогнозирования накопленных предшественниками знаний и данных. Информационная ценность этих данных крайне высока и может значительно повысить эффективность работы современных алгоритмов ИИ. С этой целью ТОО «Digital Geology» была начата разработка и тестирование алгоритмов одноименного комплекса программного обеспечения (ПО), состоящего из нескольких самостоятельных модулей цифровой обработки данных, модулей специализированных баз данных и модуля-агрегатора, с инновационной технологией возможности предиктивного выявления потенциальных месторождений рудных полезных ископаемых за счет идентификации и систематизирования комплекса геологических признаков и данных, полученных при выполнении дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием кластерного и нейронного анализов, и механизмов глубокого машинного обучения (ГМО).*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** искусственный интеллект, машинное обучение, Digital Geology, алгоритм, геологическое прогнозирование, полезные ископаемые.

## ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ АЛГОРИТМДЕРІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ГЕОЛОГИЯЛЫҚ БАРЛАУДА ИННОВАЦИЯЛЫҚ ШЕШІМДЕРДІ ЕНГІЗУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

**А.Х. СЫЗДЫҚОВ**<sup>1</sup>, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ институтының директоры, «Мұнай инженериясы» кафедрасының профессоры, т. ф. к., доцент, академик, a.syzdykov@satbayev.university

**Ғ.Ж. МОЛДАБАЕВА**<sup>1</sup>, техника ғылымдарының докторы, профессор, g.moldabayeva@satbayev.university

**Г.А. БУКАЕВА**<sup>1</sup>, «Шет тілдері» кафедрасының аға оқытушысы

**Д. АГАПИТОВ**<sup>2</sup>, г.-м. ф. к., атқарушы серіктес

**М. ҚОНАЕВ**<sup>2</sup>, басқарушы серіктес

<sup>1</sup>СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТИ,  
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22

<sup>2</sup>«DIGITAL GEOLOGY» ЖШС,  
Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Сағадат Нұрмағамбетов к-сі, 91

*Мақалада Digital Geology KZ пайдалы қазбалар кен орындарын іздеу және игеру кезінде геологиялық зерттеулердің цифрлық талдамалық кешені мысалында жасанды интеллектті (ЖИ) және терең машиналық оқытуды дамыту және қолдану мәселелері талдана-*



ды. ЖИ технологияларын қолданудың салыстырмалы түрде алғанда әлі аз, бірақ жоғары дивидендтер әкелетін әлемдік тәжірибесін зерттей отырып, автоматтандыру және ең алдымен үлкен көлемдегі деректерді талдау мүмкіндігі арқылы геологиялық барлау жұмыстарының тиімділігінің айтарлықтай артқанын атап өтуге болады. Негізгі міндеттердің бірі – алдын-ала жинақталған білім мен деректерді геологиялық болжау процестеріне міндетті түрде тарту. Бұл деректердің ақпараттық мәні өте жоғары және қазіргі заманғы ЖИ алгоритмдерінің тиімділігін едәуір арттыра алады.

Осы мақсатта «Digital Geology» ЖШС геологиялық белгілер кешенін сәйкестендіру және жүйелеу есебінен кенді пайдалы қазбалардың өлеуетті кен орындарын болжамды анықтау мүмкіндігінің инновациялық технологиясымен деректерді сандық өңдеудің бірнеше дербес модульдерінен, мамандандырылған деректер базасының модульдерінен және модуль-агрегатордан тұратын аттас бағдарламалық қамтамасыз ету кешенінің (БҚ) алгоритмдерін әзірлеу және тестілеу басталды. Кластерлік және нейрондық талдауларды және терең машиналық оқыту механизмдерін (ТМО) пайдалана отырып, жерді қашықтықтан зондтауды (ЖҚЗ) орындау кезінде алынған деректер.

**ТҮЙІН СӨЗДЕР:** жасанды интеллект, машиналық оқыту, сандық геология, алгоритм, геологиялық болжау, пайдалы қазбалар.

## PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE SOLUTIONS IN GEOLOGICAL EXPLORATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN KAZAKHSTAN

**A.H. SYZDYKOV**<sup>1</sup>, Director of the K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Professor of the 'Oil Engineering' Department, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Academician, [a.syzdykov@satbayev.university](mailto:a.syzdykov@satbayev.university)

**G.ZH. MOLDABAYEVA**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, [g.moldabayeva@satbayev.university](mailto:g.moldabayeva@satbayev.university)

**G.A. BUKAYEVA**<sup>1</sup>, Senior Lecturer of the 'Foreign Languages' Department

**D. AGAPITOV**<sup>2</sup>, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Acting Partner

**M. KUNAEV**<sup>2</sup>, Managing Partner

<sup>1</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
Republic of Kazakhstan, 050013, Almaty, Satpayev St., 22

<sup>2</sup>DIGITAL GEOLOGY LLP,  
Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, Sagadat Nurmagambetov St., 91

*The article analyzes the issues of development and application of artificial intelligence (AI) and deep machine learning using the example of the digital analytical complex of geological research in the search and development of mineral deposits Digital Geology KZ. Studying the relatively small but already yielding high dividends global experience of AI technologies application, it is possible to note a significant increase in the efficiency of geological exploration due to automation and, above all, the ability to analyze large volumes of data. One of the key tasks is the mandatory involvement in the processes of geological forecasting of the knowledge and data accumulated by predecessors. The informational value of these data is extremely high and can significantly increase the efficiency*



*of modern AI algorithms. For this purpose, Digital Geology LLP has started the development and testing of algorithms of the eponymous software complex (SW), consisting of several independent modules of digital data processing, modules of specialized databases, and an aggregator module, with innovative technology of predictive identification of potential ore mineral deposits through the identification and systematization of a complex of geological features and data obtained during remote sensing of the Earth (RSE) using cluster and neural analyses, and mechanisms of deep machine learning (DML).*

**KEYWORDS:** *artificial intelligence, machine learning, Digital Geology, algorithm, geological forecasting, minerals.*

**В**ведение. В последние годы развитие алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) привлекло внимание специалистов и предоставило новые и эффективные решения задач во многих областях, таких как оптическое распознавание изображений, языковая обработка, беспилотные технологии и т.д. Геологические науки – одна из областей, в которой также было приложено много разработок для комбинирования традиционных задач и работы искусственного интеллекта, в частности, таких как использование методов ИИ для распознавания горных пород и определения минералов.

**Материалы и методы исследования.** В настоящее время, поисково-разведочная и горнодобывающая отрасли, обеспечивающие сырьем различные отрасли промышленности, претерпевают трансформационные изменения благодаря внедрению ИИ и машинного обучения. Эти технологии революционизируют методы поиска, оценки, разведки месторождений и добычи полезных ископаемых, сохраняя стабильность сырьевого рынка и повышая экономическую эффективность всей отрасли.

**Результаты и обсуждения.** Особенно остро потребность в интеграции ИИ в практику добычи полезных ископаемых ощущается в странах Азии и Европы. Несмотря на богатую промышленную базу и многочисленные реализованные проекты, эти континентальные регионы серьезно отстают по сравнению с Северной Америкой и Австралией, где внедрение ИИ в горнодобывающую промышленность достигло более высокого уровня. В этих странах последние несколько лет ИИ активно используется для оптимизации процессов, повышения безопасности и эффективности добычи, что в том числе, позволяет этим регионам оставаться в списках лидеров в мировой горнодобывающей отрасли. Большие шаги в развитии и внедрении ИИ в геолого-поисковый и горнорудный сегменты уже сделали китайские компании (Hasan, 2023) и (Nazerian et al., 2022), есть примеры успешного решения с использованием алгоритма геологического таргетирования в России в Группе ИГТ (Chitalin et al., 2020, Читалин и др., 2020).

Одним из ключевых факторов, способствующих успеху в этом направлении, является тесное сотрудничество разработчиков с ведущими исследовательскими и технологическими структурами. Такие партнерские отношения позволяют предприятиям, занимающимся разведкой и добычей полезных ископаемых, интегрировать передовые разработки в поисковые системы, их производственные процессы и быстрее приспосабливаться к новым условиям.

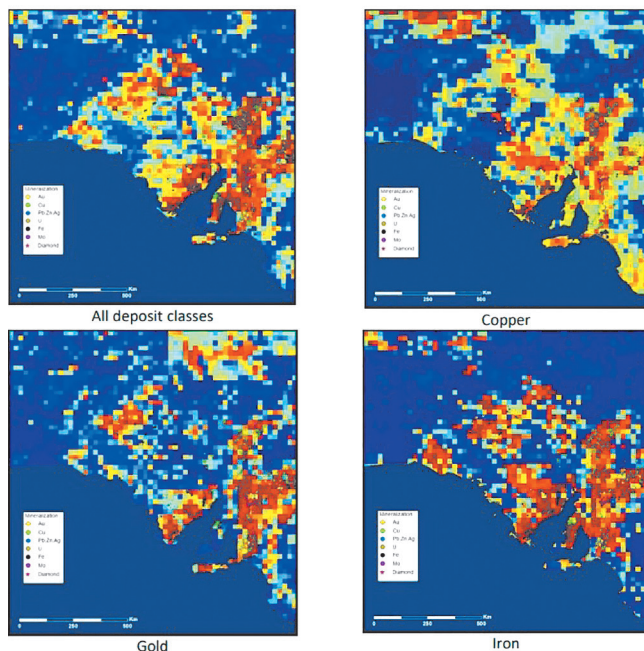


Рисунок 1 – Карты машинного прогноза перспективных рудных узлов для Южной Австралии, с окном осреднения 20x20 км, составленные специалистами Группы ИГТ (Chi-talin et al., 2020)

Может показаться, что такие термины, как ИИ и машинное обучение, появились совсем недавно, но реальность такова, что они существуют с 40-х годов прошлого века. По-этому неудивительно, что отрасль, основанная на науке, уже десятилетиями использует эти технологии не только для улучшения добычи и переработки, но и для помощи геологическим открытиям (Belder, 2024).

Казахстан, обладая богатейшей минерально-сырьевой базой, играет важную роль в мировом горнодобывающем секторе. На территории современного Казахстана археологами были обнаружены крупные центры по производству меди и бронзы начала II-го тыс. до н.э. – начало н.э. Добыча меди производилась в границах современных месторождений Жезказган, Кенказган, Алтынтобе. Золото добывалось на месторождениях Степняк, Аксу, олово на Калбе в начале I-го тыс. до н. э., когда также были открыты и первые месторождения железа. Интересный факт, что большинство современных месторождений полезных ископаемых в Казахстане были найдены благодаря следам древних рудных разработок. Это почти все месторождения на Калбе, Нарыне, месторождения меди в Рудном Алтае, Семиречье, Казахском мелкосопочнике, месторождения полиметаллов в Жезказгане, Кенказгане, Коргасыне, Бериккаре, Шатырколе, Ащысае и многие другие (Древние рудные разработки, 2005). В течение XIX века, геологами было найдено порядка 150 россыпей золота.





В 1886 г. открыто первое золоторудное месторождение Баладжал в районе Калбы и к 1913 г. на территории современного Казахстана было уже добыто 121 т золота («В Казахстане отмечают День геолога», 2024).

Начиная с конца 1920-х годов в СССР необходимо было быстрыми темпами осваивать восточные районы страны с богатыми природными ресурсами. Работа советских геологов уже в первые пятилетки позволила в том числе увеличить минерально-сырьевую базу Казахской Республики и способствовала новым открытиям месторождений металлов и углеводородного сырья. В 30-е годы прошлого века выявлены месторождения золота на севере и востоке Казахстана – рудники Жолымбет, Бестюбе, Аксу, Кварцитовые Горки, Майкаин. В 1950-1960 гг. были открыты месторождения золота Бакырчик (ныне Кызыл) на востоке, Юбилейное – на западе, Васильковское – на севере и Акбакай – на юге («В Казахстане отмечают День геолога», 2024).

На сегодняшний день Казахстан находится в мировых лидерах по запасам таких полезных ископаемых, как железо (6-е место в мире), цинк, свинец, хром, вольфрам (1-е место), марганец, уран (2-е место). По урану Казахстан является ведущей страной по объему добычи, на долю которой приходится более 40% глобальных поставок (Akhmetkali, 2024). В стране активно идет добыча драгоценных металлов. По запасам золота Казахстан занимает в мировом рейтинге 15-е место. Объем производства золота в Казахстане в 2023 г. составил 130 т, что отражает восходящий тренд добычи его в стране по сравнению с 69 т, добытыми в 2016 г. По данным USGS, в 2023 году Казахстан занял шестое место по объему добытого золота в мире, расположившись между США и Мексикой (М. Кенесова, 2024). Крупнейшей золотодобывающей компанией Казахстана является рудник Алтынтау Кокшетау, который принадлежит горнодобывающему гиганту Glencore (Belder, 2024).

Общий объем добычи твердых полезных ископаемых вывел республику на 13-е место в мире среди 70 горнодобывающих стран. В настоящее время, согласно данным Министерства индустрии и инфраструктурного развития РК, в стране выявлено более 8 тысяч месторождений, на которых разрабатываются более 100 видов полезных ископаемых (Анатолий Пак, 2023), что позволило по этим показателям Казахстану войти в число лидеров среди мировых производителей. Страна занимает треть мирового рынка критических металлов (Akhmetkali, 2024). Критические металлы относятся к общему термину, обозначающему класс металлических элементов, которые включают редкоземельные, цветные и драгоценные металлы – никель, кобальт, литий, медь, алюминий и другие. Эти металлы обладают уникальными физическими свойствами, а также играют важную роль в инновационных отраслях промышленности, таких как новая энергетика, информационные технологии, аэро-космическая промышленность и национальная оборона, и т.д. (Critical Materials Strategy, 2010). Одно из трех в мире производств бериллия и скандия, а также одно из четырех производств полного цикла тантала и 25% бериллия также принадле-



жит Казахстану. На отечественный титан приходится более 20% аэрокосмического рынка (Akhmetkali, 2024). Геология даёт фундамент для развития экономики. 70% населенных пунктов завязаны на месторождениях. Более 60% ВВП – это результат освоения минеральных ресурсов (А.Гумарова, 2024). В недрах страны по-прежнему прогнозируется выявление значительных запасов углеводородного сырья, а также цветных, благородных, редких и редкоземельных металлов. В результате геологического доизучения площадей, геолого-минерагенического картирования и глубинного геологического картирования по перспективным площадям оценены прогнозные ресурсы золота – 12,7 тыс. тонн, меди – 195,3 млн тонн, полиметаллы – 193,6 млн тонн, железных руд – 12,7 млрд тонн, хромитовых руд – 396 млн тонн, 227,4 млн тонн бокситов, титан-циркониевых россыпей и редких металлов (Открытие новых месторождений, 2021). Но за годы независимости, с 1991 года казахстанскими геологами, по результатам проведенных геологоразведочных работ, на Госбаланс впервые поставлены запасы всего 224 месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе 94 – золота\*, 14 – меди, 19 – марганцевых руд, 16 – железных руд, 4 – полиметаллов (Открытие новых месторождений, 2021). Также было открыто 135 месторождений углеводородного сырья, но в этой статье мы делаем упор на поиск и выявление именно рудных полезных ископаемых. Но значимых открытий в последние годы нет. За эти годы не было открыто крупных месторождений благородных металлов, и в большинстве своём ещё отрабатываются советские открытия. В 2023 г. Президент Касым-Жомарт Токаев обратил внимание на то, что в стране долгое время не было значимых геологических открытий и поручил привлечь частные инвестиции в отрасль (А.Гумарова, 2024). Задача масштабная и требует выявления перспективных поисковых направлений и развития недоизученных территорий, перехода на глубокозалегающие горизонты, и что становится первостепенной задачей для обеспечения устойчивого развития горнодобывающей отрасли Казахстана. Традиционные методы геоло-горазведки требуют значительных временных и финансовых затрат. Ситуация усугубляется резким сокращением государственного финансирования геологоразведочных работ. Например площадь Великобритании составляет 242,9 тыс. км<sup>2</sup> и 770,0 тыс. км<sup>2</sup> шельфа, а территория Казахстана – почти более чем в 3 раз больше – 2 725 тыс.км<sup>2</sup> и соответственно 21,96 тыс.км<sup>2</sup> шельфа, при этом в Великобритании существует старейший институт геологоразведки, созданный в 1835 г., с годовым оборотом 55 млн. GBP в год, что указывает на существующее системное недофинансирование геологопоисковых и разведочных работ в Казахстане и необходимость применения ИИ для ускорения данных процессов.

Значительное влияние на прогнозируемый дефицит металлов формирует глобальная гонка – декарбонизация. Глобальный тренд по декарбонизации: нулевые выбросы – Net Zero Emissions (NZE) к 2050 году. 93 страны мира обязались достичь NZE к 2050 г., Китай к 2060 г.; \$580 млрд было привлечено в «зеленые» облигации



в 2021 г., \$500 млрд в 2022 г. Всего оцениваемые инвестиции составляют \$6 трлн. (Climate impact Partners). Казахстан также присоединился к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) в 1995 году и ратифицировал Киотский протокол в 2009 году. В 2016 году Казахстан ратифицировал Парижское соглашение и обязался сократить свои выбросы парниковых газов на 15% ниже уровней 1990 года к 2030 году в качестве безусловной цели. Объём CO<sub>2</sub> в ВВП Казахстана почти на 70% выше, чем в среднем по миру, что отражает структуру его экономики, которая включает энергоёмкую тяжелую промышленность и зависимость от угля в производстве электроэнергии. План, озвученный президентом Касым-Жомартом Токаевым в 2021 году достичь углеродной нейтральности к 2060 году, придало значительный импульс развитию климатической политики («Казахстан-2022»).

Существующий прогноз сокращения потребления углеводородного сырья и начало перехода на «зелёную» энергетику стимулирует скачкообразное увеличения потребности мировой экономики в цветных и «умных» металлах, которые нужно описковывать в сжатые сроки. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), например, спрос на редкоземельные элементы к 2040 г. может в 3-7 раз превысить существующие мировые потребности, в зависимости от выбранного сценария развития и политических решений (Kazakhstan's rare earth deposit, 2022) и (Kazakhstan Boasts 15 Rare Earth Deposits, 2024). На выступлениях на Всемирном экономическом форуме в Давосе в 2024 г. оценили, что в связи с зеленым переходом спрос на критические минералы увеличится на 500% к 2050 г. Прогнозируется, что в ближайшие два десятилетия мир планирует добыть больше металлов, чем человечество добыло за всю историю. Каким образом это может быть реализовано – вопрос открытый. Например, по оценке Клауса Мартина Шваба – немецкого экономиста, основателя и бессменного президента Всемирного экономического форума в Давосе – «свободной» меди больше нет. Все выявленные запасы уже распределены по недропользователям, и прогнозируется постепенное увеличение дефицита этого металла. Соответственно и внутриказахстанские задачи развития, где выявлено 15 месторождений редкоземельных металлов (Kazakhstan's rare earth deposit, 2022) и существующие потребности в поиске и оценке ресурсов наиболее востребованных на современном рынке металлов, так же заставляют искать наиболее рациональные и комплексные решения.

Снижение качества выявляемых в последние десятилетия запасов минерального сырья во всём мире добавляет необходимость принятия каких-то революционных решений. Произошло ужесточение промышленных требований к повышению качества и верификации проводимых работ, в том числе и для привлечения внешнего инвестирования.

Многие инвесторы стараются сконцентрировать финансирование и усилия своих геологов на уже известных месторождениях полезных ископаемых, работающих рудниках и месторождениях. Это можно объяснить рядом причин:





1) проще и дешевле исследовать области с выявленной минерализацией. Несомненно, что это менее рискованно, требует меньше концептуального или творческого мышления, поскольку геология объектов и их фланговых зон обычно хорошо изучена, и конечно, доступно больше фактических данных;

2) с точки зрения рынка легче убедить инвесторов, если проекты расположены в хорошо известных районах. Эти проекты часто кажутся практически лишенными геологических и логистических рисков, не должны преподнести негативных сюрпризов и выглядят более уверенно, чем что-то новое.

Но такие проекты обычно предусматривают достаточно ограниченный потенциал прироста ресурсной базы, и соответственно и не стоит ожидать существенного роста стоимости проекта.

Обнажившая ситуация с фактической деглобализацией и возврату к многополярному миру, заставила ряд стран, ранее интенсивно использовавших ресурсы из стран третьего мира, с разной степенью успешности стимулировать собственные ресурсные возможности. Практически все страны, создававшие до того добавленную стоимость за счёт более развитых технологий поиска, разведки и добычи минерального сырья в других странах и на чужих территориях, стараются быстрее купировать риски и мобилизоваться для обеспечения собственного снабжения критическими минералами, используя федеральные программы и инструменты финансирования. В ход идут даже совсем не рыночные механизмы развития, доходящие до купирования активных игроков. Характерный пример, условный Западный мир сейчас активно пытается уйти от зависимости от Китая в сфере минерального сырья. В ноябре 2022 г. правительство Канады практически заставило три китайские компании отказаться от своих инвестиций в горнодобывающую промышленность Канады. Принятый в конце 2023 г. В результате такого нерыночного решения, канадская горнодобывающая компания Power Metals Corp. стала обладателем концессий на два месторождения – литиевого и цезиевого. Но, если месторождения лития есть во многих странах, то цезий – это уже действительно критический элемент, месторождений в мире выявлено немного, и многие из них уже на стадии истощения. Между тем, этот щелочной металл играет ключевую роль в достижении цели тех же США в развитии связи 5G. Металл играет ключевую роль в системах наведения оружия, самолётов, в системе GPS, бурении на углеводороды (Kern, 2024). Этот пример показывает, что когда на кону стоит сырьевая независимость государства, то никакие ранние договорённости работать не будут.

Чтобы уменьшить зависимость от иностранных источников металлов и минералов, правительства нескольких стран начали выступать в роли новых игроков в горнодобывающей отрасли, используя законодательство и финансовую поддержку. США, 2022 г. – план обеспечения цепочки поставок критических минералов, произведенных в США – \$3 млрд.; Канада, 2023 г. – "Закон о стратегии критических минералах" – C\$3,8 млрд + C\$1,5 млрд на горнодобывающую инфраструктуру; ЕС,



2023 – «Закон о критическом сырье + Европейский фонд сырьевых материалов» – €2 млрд.; Саудовская Аравия, 2023 до 2030 г. – «Фонд Ma'adan Mining» – \$15 млрд.; ФРГ, 2024 – «Фонд развития KfW» – €1,1 млрд.

В 2021 году была основана Национальная геологическая служба Казахстана с целью обеспечения всесторонней поддержки пользователей в области геологии. Одним из ее проектов является цифровизация первоначальной геологической информации, которая должна стать доступна на [minerals.gov.kz](http://minerals.gov.kz). К концу 2023 г. планировалось перевести в электронную форму около 861 тысяч страниц информации на бумажных носителях, 129 тысяч страниц графических материалов, а также 38 тысяч магнитных носителей и 16 тысяч картриджей (А.Пак, 2023). Но целью работы должно являться не сканирование отчетов и перевод графики в растровый формат, о чём и идёт речь, а перевод графики именно в векторный формат, т.е. тот формат, который как раз и позволяет масштабировать информацию, строить цифровые модели и выполнять последующие аналитические исследования. Специалисты понимают, что это большая разница. В этом и состоит основная цель цифрового архивирования данных. Готовых решений пока нет, но это одна из задач, которую должен будет решить разрабатываемый программный комплекс Digital Geology Kz.

### **Возможное решение**

Современные технологии, такие как ИИ и глубокое машинное обучение, могут также стать ключевым решением для ускоренного восполнения и развития ресурсной базы Казахстана. Одной из ключевых задач является обязательное вовлечение в процессы геологического прогнозирования накопленных предшественниками знаний и данных. Информационная ценность этих данных крайне высока и может значительно повысить эффективность работы современных алгоритмов ИИ. ИИ может обрабатывать и анализировать огромный массив исторических данных, накопленных за десятилетия выполнения геологоразведки в Казахстане. Это включает отчеты, карты, аналитические результаты и другие данные, которые в совокупности могут предоставить ценную информацию для выявления новых поисковых направлений и месторождений полезных ископаемых. Использование накопленных данных также позволяет сохранять и переносить опыт предшествующих поколений геологов, что особенно важно в контексте кадровых и технологических изменений. В том числе и по этой причине, предлагаемая ТОО «Digital Geology» разработка является наиболее современным решением задачи компенсации истощения минерально-сырьевой базы Казахстана за счёт выявления новых и развития ранее выявленных, но по разным экономическим или технически причинам недоизученных объектов минерально-сырьевой базы страны.

По комментариям американского футуролога Рэя Курцвейла, ИИ может быстро анализировать миллиарды химических веществ при моделировании и уже способствует инновациям, как, например, в фотоэлектрической энергетике, в аккумуляции энергии в батареях и т.д. Аналитические процессы могут резко ускориться. Как



пример, за всю историю человечества, за 800 лет исследований, до ноября 2023 г. люди открыли около 20 000 стабильных неорганических соединений, которые можно было использовать во всех технологиях. Но, ИИ от Google Graph Networks for Materials Exploration (GNoME) (Merchant et al., 2023) и (Merchant et al., 2023) за одну ночь увеличил это в 21 раз до 421 000 (Ray Kurzweil on how AI will transform the physical world, 2024). Издания MINING (США) и Global Satellite Services (США) задались вопросом, способен ли искусственный интеллект заменить геологов при разведке месторождений полезных ископаемых? (Заменит ли искусственный интеллект труд геологов, 2024). Физически, конечно, нет. Но есть целый ряд моментов, где применение ИИ в геологоразведке представляется оправданным. Как мы уже указывали, прежде всего, ИИ поможет в анализе больших объёмов геологических данных. Традиционная геологическая работа по обработке входящих лабораторных параметров, учёт данных полученных прежними поколениями геологов, комплексная интерпретация информации – это трудоёмкий процесс, часто связанный с человеческими ошибками на разных этапах получения данных. Инструменты на базе ИИ автоматизируют анализ имеющихся данных, что позволит геологам быстрее выявить закономерности и аномалии, которые могут указывать на наличие ценных минеральных ресурсов. Учитывая, что при постановке задачи в геологоразведке, особенно на поисковом этапе, специалисты сталкиваются с множеством



Рисунок 2 – Применение высоких технологий и искусственного интеллекта в геодезии и геологии



геологических неопределённостей и прогнозов, ИИ в этом случае может явиться крайне эффективным рабочим инструментом по обработке и выполнения аналитики с учётом миллионов геологических, геоморфологических, геохимических и геофизических признаков и закономерностям ассоциативного распределения минеральных соединений в пространстве, для выявления новых поисковых трендов, включая слепые оруденения.

Ведущими пользователями искусственного интеллекта в горнодобывающей промышленности в настоящее время являются такие гранды как Goldcorp, BHP, Rio Tinto, Freeport-McMoRan, Fortescue, Newcrest, Barrick Gold, Dundee Precious Metals и др. Горнодобывающие компании производят в основном взаимозаменяемые товары в гигантских объемах, отрасль высококонкурентная и каждая компания уделяет большое внимание повышению эффективности на всех уровнях или производственных переделах от поиска и разведки до добычи и обогащения руды. Даже небольшие улучшения в скорости принятия решений, увеличения доходности и эффективности часто могут стать той границей, которая отделяет прибыльный проект от убыточного. Именно это пытаются сделать в этой сфере компании, использующие искусственный интеллект и машинное обучение. Ярким примером сейчас являются специалисты Goldspot Discoveries Inc., которые успешно предсказали, или, если будет более корректно сформулировать, именно рассчитали зоны повышенной минерализации 86% золотых ресурсов Золотого пояса Абитибид (Abitibi Gold Belt), используя геологическую, топографическую и минералогическую информацию, собранную всего лишь с 4% общей площади региона (Owais Ali, 2022), (Jon Walker, 2019), (The impact of artificial intelligence on the mining sector, 2023). На этот полученный результат обратили внимание многие компании, и он стимулировал следующую волну активности развития предиктивного ПО с ИИ. Другой пример Windfall Geotek в центральной части острова Ньюфаундленд (Канада) – ИИ выявил 12 поисковых объектов на площади 1208 км<sup>2</sup>, используя данные всего 4942 анализов. Кроме того, ИИ используя заданный алгоритм предположил потенциал выявления новых месторождений за пределами ранее известной золоторудной минерализации лицензионного участка (Morton, 2023).

В то время как некоторые ресурсные компании всё же осторожно подходят к ИИ, предпочитая придерживаться стандартных методов разведки, к которым они привыкли, другие приняли эту технологию. При поддержке таких миллиардеров, как Билл Гейтс и Джефф Безос, компания KoBold Metals также приняла стратегию внедрения ИИ и полностью интегрировала машинное обучение в свои процессы. Первоначально геологоразведочную компанию ошибочно приняли за технологическую компанию из-за интенсивного внедрения программного обеспечения в её деятельности и тесной связи со столицей Силиконовой долины Сан-Хосе и Стэндфордским индустриальным парком. Компания, которая в настоящее время владеет долями участия в более чем 60 проектах, попала в заголовки газет в декабре 2022 г.,



когда согласилась выплатить \$115 миллионов EMR Capital, частной инвестиционной компании с 80% долей в медном руднике Любамбе в Замбии. Взамен Kobre получила 52% долю в проекте расширения Любамбе, который теперь известен как месторождение Мингомба. В рамках соглашения компания также обязалась инвестировать дополнительные \$35 млн. в геологоразведочные работы на участке, которые она проводит с тех пор. В феврале 2024 года Kobre подтвердила, что в Мингомбе находится крупный ресурсный объект, назвав это крупнейшим открытием меди за столетие (Belder, 2024).

В 2024 г. на конференции Ассоциации геологоразведчиков и разработчиков Канады (PDAC) интенсивно обсуждались искусственный интеллект и машинное обучение (Belder, 2024). Каковы последствия ИИ для горнодобывающего сектора? Может ли ИИ помочь оживить инвестиции на этапе хронически недофинансируемой геологоразведки? Может ли он предоставить компаниям инструменты, необходимые для повышения операционной эффективности? Но, пока на эти вопросы нет ответа. Тем не менее этот тренд получает всё большее развитие. К концу 2024 г. по всему миру горнодобывающие компании потратят \$218 млн на платформы искусственного интеллекта. Это серьёзный рост по сравнению с \$76 млн. в 2019 году. Прогнозируется, что уже к 2035 г. мировая горнодобывающая отрасль получит выгоду от новой эры интеллектуального майнинга. ИИ будет использоваться для оптимизации решений в горнодобывающей промышленности, что позволит производителям минерального сырья сэкономить от \$290 до \$390 млрд. в год. Ожидается, что мировой рынок геологоразведочного ПО достигнет \$1,5 млрд к 2025 году с ежегодным ростом на 7%. В России внутренний рынок ПО также оценивается к 2030 г. в колоссальную цифру в приблизительно \$3,5 млрд.

Несомненно, ИИ – это не только компьютерные науки и математика. Был сделан значительный вклад из совершенно разных ключевых областей человеческой деятельности, таких как лингвистика, экономика, нейробиология и др. (Т.Таулли, 2021). Теперь настала очередь геологии, и, в частности, в поисковом сегменте геологоразведки. Существующие прогнозы развития специализированного ПО и определённых направлений работ указывают на несколько ключевых направлений и технологий, которые будут использовать ИИ в геолого-разведке наиболее эффективно. В ближайшие 10 лет (если принять это как общепринятый срок среднесрочного планирования) внедрение ИИ в геологический поиск и разведку новых месторождений обещает значительно изменить отрасль недропользования. В частности это:

- Интеграция данных: исторически и статистически сложилось так, что в горнодобывающей отрасли показатели успешности геологоразведочных работ достаточно низкие, только 1 из 1000 проектов становился добычным проектом. Выигрывает тот, кто сможет выйти из этой статистики и сможет снизить геологические риски и качественно улучшить итоговый результат. Этому может способствовать более эффективная интеграция данных из различных источников, что улучшает комплексное





понимание геологического строения и ресурсного потенциала территорий. Алгоритмы ИИ повысят надежность прогнозов за счёт технологической возможности единовременной обработки огромных массивов информации. Например, в России, по оценкам Федерального Агентства Роснедра, только годовой объем поступающих геологических данных в Единый Фонд Геологической Информации (ЕФГИ) по итогам 2022 г. составил около 1,3 Пб (1 Петабайт равен 1099511627776000 байт) («В России создадут цифровую систему геологических данных», 2023). Это ёмкость хранения больше, чем 5 лет работы системы наблюдения Земли (Earth Observing System, EOS).

- Машинное обучение и анализ данных: эти технологии уже используются для анализа больших объемов данных, полученных из различных источников (геофизических, геохимических, геологических, данных ДЗЗ). Машинное обучение помогает выявлять закономерности и аномалии, которые в силу естественных физиологических ограничений нашего организма, ускользают от человеческого глаза.

Глубокое обучение: алгоритмы глубокого обучения, видимо преимущественно сверточные нейронные сети (CNN), рекуррентные нейронные сети (RNN), глубокие вероятностные модели (Deep probabilistic models) будут эффективны для обработки и интерпретации массивов геохимических данных – машинное обучение будет более эффективно использоваться для интерпретации результатов геохимического анализа, выявления аномальных концентраций, ассоциативные закономерности распространения элементов и расчёт (предсказания) местоположения новых месторождений и геофизических данных, поступающих от таких источников как электрические методы разведки, магнитная и гравиметрическая съемка.



**Рисунок 3 – Иллюстрация создана с помощью ИИ – без адаптации к новым методам, подобно Прокрусту, геологи подгоняют слои к аномалиям для выявления перспективных месторождений**



• Дешифровка и интерпретация изображений, полученных при ДЗЗ: в ряде стран, включая Казахстан, ИИ уже активно применяется для анализа спутниковых снимков и аэрофотосъемки, с целью выявления признаков повышенной минерализации и геолого-структурных особенностей изучаемых территорий и месторождений. Спутниковое дистанционное зондирование является важным техническим ресурсом геологического картирования и/или разведки полезных ископаемых, особенно на ранних этапах изучения объектов (Diaz-Rodriguez et al., 2021).

• Увеличение точности и скорости выполнения поиска и разведки: ИИ уже позволяет быстрее и точнее интерпретировать данные, что сокращает время и затраты на поиск и разведку новых месторождений.

• Снижение рисков: применение ИИ позволяет снизить риски, связанные прежде всего с человеческим фактором. Это объективная необходимость – по статистике до 80% ошибок, чрезвычайных ситуаций, техногенных происшествий и т.д., происходит именно по причине человека. Геологопоисковая специализация также в этом негативном тренде.

• Геостатистика и прогнозирование: использование ИИ для построения моделей геологического строения и прогнозирования вероятности нахождения полезных ископаемых на основе существующих данных. В настоящее время это с разной степенью успешности уже начало реализовываться в нескольких странах.

• Экологические и экономические преимущества: ИИ в дальнейшем поможет оптимизировать процесс разведки, что снизит воздействие на окружающую среду, поможет рассчитывать (предсказывать) чрезвычайные ситуации по критическим реперным признакам и сократит затраты на последующую рекультивацию. Модели ИИ уже могут предсказывать, где найти ресурсы с минимальным ущербом для окружающей среды, что значительно сокращает площадь, затрагиваемую горно-добывающими операциями. Кроме того, ИИ может оптимизировать использование ресурсов и энергии в процессах добычи полезных ископаемых, что приведет к уменьшению количества отходов и выбросов (The impact of artificial intelligence on the mining sector, 2022).

• Автономные системы: роботы и дроны, оснащенные ИИ, будут использоваться для автономного сбора данных в труднодоступных или опасных районах. Решение реализации этой задачи прогнозируется в ближайшие 3-5 лет, но в рамках предлагаемой работы мы эти направления пока не рассматриваем. Возможно, при развитии дроновых технологий можно будет также использовать для полевых рекогносцировочных работ, которые также являются одним из необходимых условий реализации предлагаемого ПО.

Таким образом, ИИ постепенно становится ключевым инструментом в геологоразведке, обеспечивая более точные и эффективные методы исследований и аналитических заключений значительно улучшая результаты работы и снижая геологические и экономические риски. Это стало центральной темой для обсуждения



на выступлениях на Всемирном экономическом форуме в Давосе в 2024 г. Но, для того чтобы ИИ стал применим в сферах с высоким уровнем риска (например, производство, куда мы можем отнести и геологоразведку), ему необходимо стать более точным. Т.е. точность вводимых параметров является одним из базовых условий целесообразности внедрения ИИ в поиски и разведку. Также необходимо повышать уровень доверия геологов к новому формирующемуся инструменту.

Разрабатываемый в настоящее время в Казахстане комплекс ПО «Digital Geology Kz» является одним из вариантов решений снижения геологического риска. Комплекс состоит из нескольких самостоятельных модулей цифровой обработки данных, модулей баз данных и модуля-агрегатора и, что особенно важно, с инновационной технологией возможности предиктивного выявления потенциальных месторождений рудных полезных ископаемых. Цель достигается за счёт идентификации и систематизирования комплекса геологических признаков и данных, полученных при выполнении дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием кластерного и нейронного анализов с элементами глубокого машинного обучения. Чем-то схожие методологические и программно-цифровые решения уже используются рядом компаний в Австралии, Индии, Канаде, Китае, России, и США для выявления поисковых объектов и снижения геологического риска на ранних этапах поисковых, оценочных и разведочных работ, но пока, по выполненному нами анализу, отсутствуют именно комплексные геолого-экономические решения, что, несомненно, снижает их эффективность для развития госпрограмм.

Учитывая перечисленные критические и мотивационные причины, и динамику запросов на эту услугу, мы прогнозируем, что применение цифровых алгоритмов геологического таргетирования в недропользовании в ближайшие 5 лет, возможно, станет промышленным стандартом. Известных, похожих по функционалу, программных аналогов на рынке мирового геологического сервиса нами пока выявлено уже более десяти – Windfall Geotek, Канада (Morton, 2023), Minerva Intelligence, Канада, KoBold Metals, Канада (Belder, 2024), DroneDeploy, Канада, AIMEX (Финляндия) (Finnish Research Consortium, 2023), многомодульный комплекс GeoTarget Pro Группа ИГТ, Россия, (Читалин и др., 2022), Mira Geoscience, Австралия (McGaughey et al., 2024), OreFox, состоит из Prospector AI и Hunter AI, Австралия, Datarock, Австралия, Earth AI, Австралия, Goldcorp и IBM Watson (США), Aganitha Cognitive Solutions, Индия (5 Top Artificial Intelligence Startups), Four Point, Польша. Эти проекты преимущественно стартапы на разной стадии реализации алгоритмов ИИ. Ситуация с развитием ИИ становится всё менее контролируемая, многие исследователи начинают понимать необходимость и появляющиеся преимущества. Значительное дополнительное преимущество – информационный ресурс, который уже использован в странах с развитой геологоразведочной и цифровой индустрией – геологические фонды, которые содержат огромный массив данных, зачастую пока не вовлечённых в обработку и анализ в странах, бывших республиках СССР. Потребность создания самостоятельного ка-



захстанского ПО является необходимым условием формирования геолого-информационной и ресурсной независимости государства. Союзников здесь не будет, будут только временные попутчики. Кроме того, вовлечение в работу такого ПО требует соблюдение как минимум отдельных протоколов коммерческой секретности.

В Казахстане различные приложения с элементами ИИ используют ряд компаний KazMinerals, ERG, Polymetal, Rio Tinto, Fortescue, Tau Ken Samruk, Highland Gold, Полюс золото, KazZinc, Kazakhmys, Barrick Gold, AzerGold. Но, как и во многих странах, используемые приложения прежде всего связаны с уже добывающим сегментом, либо 3D-моделированием на стадиях уже продвинутой разведки, на основании фактических данных, без решений в поисковом и оценочном сегменте геологоразведки. Программные решения на поисковом этапе, особенно с предиктивными функциями выявления потенциальных месторождений отсутствуют.

**Выводы.** Потенциальные преимущества ИИ в разведке полезных ископаемых уже доказываются, однако, опираясь на собранный мировой опыт, его применение является далеко не простой задачей. При определении расположения месторождений полезных ископаемых геологоразведчики всегда пытаются использовать очень сложные, комплексные системы. Доказательства наличия зон повышенной минерализации должны быть получены на основе интерпретации едва заметных признаков изменения, которые могут фиксироваться на километры от нахождения цели. Решение этой задачи требует такого же внимания к постановке задачи создания прогностических моделей ИИ, как и к самим методам ИИ. Именно здесь требуются глубокие знания предметной области и поддерживающая вычислительная платформа для геологопоисковых и разведочных работ.

Мы не ожидаем волшебства от масштабного внедрения ИИ в поисковую геологоразведку, но его явное преимущество – это в кратчайшие сроки создавать модели на основе миллиардов заложенных параметров (Belder, 2024).

Инструменты, созданные на базе ИИ, способствуют оптимизации рабочих процессов, ускоряя процесс обработки геологических данных и сокращая время, необходимое для проведения поиска и разведки. С помощью экспертов системы ИИ могут получить необходимые сведения о конкретных параметрах, их метаданных, а также уточнить информацию о зонах и участках повышенной минерализации, расположении потенциальных месторождениях полезных ископаемых.

Разработка прогнозных моделей для разведки полезных ископаемых – ещё одна область, где ИИ способен оказаться весьма эффективным инструментом. Алгоритмы машинного обучения можно настроить на распознавание на комплексы геологических признаков, связанных с определёнными типами залежей полезных ископаемых, загрузив в обучение практически все возможные типы месторождений, особенности их строения, закономерности в ассоциативном распространении конкретных элементов и т.д. Анализируя пространственное распределение уникальных кодов геологическим признаков в области исследования, модели на базе ИИ уже



могут создавать карты вероятности, на которых выделяются области с наиболее высоким потенциалом выявления зон повышенной минерализации и неоткрытых месторождений.

Интеграция ИИ в поиск и разведку полезных ископаемых сопряжена с целым рядом задач, требующих тщательной постоянной работы. Один из самых важных моментов, которые подчёркивают все исследователи в области применения ИИ в геологоразведке – обеспечение сбора, качества, точности и достоверности данных (Long et al., 2022). Алгоритмы ИИ требуют постоянной доработки и валидации для повышения их возможностей выполнения глубокого анализа, прогнозирования и купирования ошибок на ранних стадиях.

Важная проблема, и она по праву находится в приоритете – достаточный квалификационный уровень геологов-экспертов, которые будут обучать алгоритмы ИИ, которые будут контролировать вводимые данные и информацию на которых будет проводиться глубокое обучение.

Еще одно существенное препятствие заключается в управлении конфиденциальностью и безопасностью данных. Поскольку системы ИИ в значительной степени зависят от обширных наборов данных, защита конфиденциальной геологической информации от взломов или несанкционированного доступа становится насущной необходимостью (Demystifying artificial intelligence for mineral exploration, 2024). Кроме того, вернёмся к необходимой доле секретности первичных данных, от которых может зависеть ресурсная безопасность и соответственно политика государства.

Развитие ИИ в геолого-поисковых и разведочных работах позволит геологам, горнякам и специалистам смежных отраслей экономики, внедрять инновации и обеспечить более ответственное использование ресурсов Земли для будущих поколений. 🌐

*Благодарность.*

*Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR21881822-«Разработка технических решений для оптимизации геолого-технических операций при бурении скважин и добычи нефти на поздней стадии эксплуатации месторождений», 2023-2025 гг.).*

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Гумарова А. Запасы скоро закончатся, будет катастрофа: что не так с геологией в Казахстане. Ulysmmedia.kz. <https://ulysmmedia.kz/news/27526-zapasy-skoro-zakonchatsia-budet-katastrofa-chto-ne-tak-s-geologiei-v-kazakhstan/amp> (Дата обращения 28.02.2024) [Gumarova A. Zapasy skoro zakonchatsya, budet katastrofa: chto ne tak s geologiej v Kazahstane.]
- 2 Древние рудные разработки // Казахстан. Национальная энциклопедия. – Алматы: Қазақ энциклопедиясы, 2005. Т. II. [Drevnie rudnye razrabotki // Kazahstan. Nacional'naya enciklopediya. – Almaty: Қазақ enciklopediyasy, 2005. Т. II.]





- 3 В Казахстане отмечают День геолога: как зарождалась наука и какие месторождения до сих пор кормят страну. <https://mail.kz/ru/news/kz-news/v-kazahstaneotmechayut-den-geologa-kak-zarozhdalas-nauka-i-kakie-mestorozhdeniya-do-sih-porkormyat-stranu> (Дата обращения 07.04.2024). [V Kazahstane otmechayut Den' geologa: kak zarozhdalas' nauka i kakie mestorozhdeniya do sih por kormyat stranu.]
- 4 В России создадут цифровую систему геологических данных. Золотодобыча. АО "Иргиредмет". <https://xn--80abilurbab1b9c5b.xn--p1acf/index.php/news/164-digitalization> (Дата обращения 05.05.2024) [V Rossii sozdadut cifrovuyu sistemu geologicheskikh dannyh. Zolotodobycha. AO "Irgiredmet".]
- 5 Chitalin A., Baraboshkin E., Sivkov D., Fomichev E., Mikhaylov A., Chikatueva V., Popov S., Grishin E. // Geological Analysis and Machine Learning for deposits prediction. Moscow, Russia, 2020, [https://igeotech.ru/wp-content/uploads/2020/09/igt-proposal\\_exploresa\\_2020.pdf](https://igeotech.ru/wp-content/uploads/2020/09/igt-proposal_exploresa_2020.pdf)
- 6 Читалин А.Ф., Агапитов Д.Д., Штенгелов А.Р., Усенко В.В., Фомичев Е.В. Геологическое таргетирование – инструмент повышения эффективности поисковых работ // Минеральные ресурсы. Экономика и управление. – 2020. – № 3. – С. 10–18. [Chitalin A.F., Agapitov D.D., Shtengelov A.R., Usenko V.V., Fomichev E.V. Geologicheskoe targetirovanie – instrument povysheniya effektivnosti poiskovyh работ // Mineral'nye resursy. Ekonomika i upravlenie. – 2020. – № 3. – S. 10–18]
- 7 Hamed Nazerian, Bahareh Hedayat, Aref Shirazi, Adel Shirazy. Prediction of Copper Mineralization by the Artificial Neural Network (GRNN and BPNN) in Mesgaran Exploration Area, Eastern Iran. // International Journal of Science and Engineering Applications. – 2022. – Vol. 11. Is. 05. – P. 61-65. <https://www.researchgate.net/publication/360587879>
- 8 J. Diaz-Rodriguez, R. Dietmar Muller, R. Chandra Predicting the emplacement of cordilleran porphyry copper systems using a spatio-temporal machine learning model // Ore Geol. Rev. – 2021. – Vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104300>
- 9 Long T., Zhou Z., Hancke G., Bai Y., Gao, Q. A Review of Artificial Intelligence Technologies in Mineral Identification: Classification and Visualization // J. Sens. Actuator Netw. – 2022. – N 11. <https://doi.org/10.3390/jsan11030050>
- 10 Пак А. В Казахстане известно более 8 тысяч месторождений полезных ископаемых. <https://bizmedia.kz/2023-08-29-v-kazahstaneizvestno-bolee-8-tysyach-mestorozhdenij-poleznyh-iskopaemyh/> (Дата обращения 25.06.2024) [Pak A. V Kazahstane izvestno bolee 8 tysyach mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh.]