

АННОТАЦИЯ

на диссертацию Садуова Алишера Берикжановича

«Технология создания и использования искусственного интеллекта при решении геопрогнозных задач (на примере минералогических, скважинных и региональных геолого-геофизических данных Казахстана и зарубежных стран)
представленную на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе **8D07104 - Нефтегазовая и рудная геофизика**

Актуальность исследования. Современная геологоразведка работает в условиях быстро растущего объема разнородных геологических и геофизических данных, при этом фактический контроль по рудоносности остается ограниченным и неравномерным по площади и разрезу. Для поисково-оценочных и разведочных задач это приводит к типичным методическим трудностям: дефициту достоверно подтвержденных «отрицательных» примеров, пространственной зависимости наблюдений, риску некорректной экстраполяции и завышенной оценке качества прогноза при формальной проверке. В этих условиях актуальной является не разработка отдельной модели для одной частной задачи, а создание воспроизводимой технологической схемы применения искусственного интеллекта, адаптированной к геологической природе данных и пригодной для практического принятия решений в геологоразведке. Диссертация Садуова А.Б. направлена именно на решение этой задачи - от минералогического уровня и скважинной геофизики (каротажа) до регионального прогноза перспективности.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является разработка и научное обоснование технологии создания и использования методов искусственного интеллекта при решении геопрогнозных задач на разных масштабных уровнях (минералогический, скважинный, региональный) с учетом геологической специфики исходных данных, ограниченности фактического контроля и необходимости практико-ориентированной интерпретации результатов.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие основные задачи: выполнен анализ особенностей геологических и геофизических данных, определяющих требования к построению ИИ-моделей в задачах геопрогноза; разработана и апробирована схема автоматизированного выделения устойчивых ассоциаций редких и статистически нетипичных минералов в крупных минералогических массивах; разработан подход к вероятностному выделению потенциально уранопродуктивных интервалов по данным ГИС (каротажа) в условиях неполной разметки, когда достоверно подтверждены преимущественно продуктивные интервалы; реализованы процедуры проверки качества по геологически независимым единицам (скважины, пространственные блоки), исключающие перенос информации между близкими наблюдениями; разработана и апробирована схема регионального ранжирования перспективности территории на Au-Ag оруденение по интегрированным геолого-геофизическим признакам с ограничением интерпретации прогнозов областью геологической аналогии; выполнена калибровка вероятностных оценок и их адаптация к риск-ориентированному принятию решений в геологоразведке; проведено сопоставление результатов моделирования с фактическими данными (керна, экспертная интерпретация, известные проявления и месторождения) и оценена практическая применимость предложенной технологии.

Объект исследования. Объектом исследования являются геопрогнозные задачи в геологии и геофизике, решаемые на основе минералогических, скважинных геофизических (каротажных) и региональных геолого-геофизических данных.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы, алгоритмы и технологические схемы применения искусственного интеллекта и машинного обучения для выделения геологически содержательных закономерностей, вероятностного прогноза и ранжирования перспективных объектов в условиях неполной разметки, пространственной зависимости и неоднородности геоданных.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в создании и апробации единой воспроизводимой технологии применения ИИ к геопрогнозным задачам, в которой современные вычислительные методы адаптированы к реальным условиям геологоразведки. В диссертации не просто использованы отдельные алгоритмы, а научно обоснованно объединены ключевые элементы корректной работы с геоданными: обучение в условиях неполного фактического контроля (когда подтверждены преимущественно продуктивные объекты, а остальной фонд рассматривается как фон неопределенного статуса), проверка по геологически независимым единицам, калибровка вероятностных оценок, контроль области геологической аналогии (области, где условия сопоставимы с обучающей выборкой), интерпретируемость результатов и риск-ориентированное ранжирование целей. Новизна также проявляется в доказанной переносимости данной схемы на задачи различного масштаба - от минералогических ассоциаций до регионального Mineral Prospectivity Mapping (MPM).

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии методических оснований применения ИИ в геологии и геофизике за счет согласования математико-статистических процедур с физическим и геологическим смыслом данных. В работе формализован подход к построению прогностических моделей в условиях, типичных для геологоразведки: редкие подтвержденные объекты, пространственная автокорреляция, неоднородная изученность, риск экстраполяции за пределы геологической аналогии. Предложенная технологическая схема может рассматриваться как методический каркас для последующих исследований в области GeoAI и цифровой геологоразведки.

Практическая значимость. Практическая значимость диссертации заключается в том, что предложена не отдельная «разовая» модель или карта, а технологическая схема, пригодная для включения в прикладной контур геологоразведочных работ. В минералогическом блоке практический эффект выражается в автоматизированной фильтрации больших массивов минералогических данных и выделении устойчивых ассоциаций редких и статистически нетипичных минералов, что позволяет обоснованно приоритизировать дальнейшие лабораторные и полевые проверки. В скважинной геофизике (каротаже) результаты представлены в виде вероятностного выделения потенциально уранопродуктивных интервалов, что может использоваться при выборе интервалов опробования, уточнении программы доразведки и повышении эффективности работ при дефиците керна. В региональном MPM практическая ценность состоит в ранжировании территории по степени перспективности с учетом неопределенности, калиброванной вероятностной шкалы и ограничения интерпретации областью геологической аналогии, что соответствует логике поэтапного планирования полевых работ и снижает риск затрат на участки с неконтролируемой экстраполяцией. Практические предложения являются новыми прежде всего как технологически связанная система проверки, интерпретации и принятия решений на геоданных.

Результаты исследования. В диссертации получены следующие основные результаты. Разработан и апробирован подход к автоматизированному выделению устойчивых ассоциаций редких и аномальных минералов в глобальной минералогической базе данных, позволивший получить воспроизводимые группы, интерпретируемые в контексте различных генетических обстановок и рудной специализации. Для уранового направления разработана схема вероятностного выделения потенциально продуктивных интервалов по данным ГИС (каротажа) в постановке неполного фактического контроля, при которой проверка качества выполнена по скважинам как независимым единицам, а итоговые вероятностные разрезы дополнительно согласованы с керновыми данными и экспертной интерпретацией после геостатистического сглаживания вдоль профилей. Для регионального уровня реализована технология Au-Ag MPM по интегрированным геолого-геофизическим признакам с пространственно независимой проверкой, калибровкой вероятностей и ограничением интерпретации прогнозов областью геологической аналогии, что позволило сформировать количественно обоснованный перечень приоритетных участков для дальнейшей геологоразведки.

Личный вклад автора. Личный вклад Садуова А.Б. заключается в постановке научной проблемы, формировании общей концепции и структуры исследования, выборе и адаптации методов искусственного интеллекта к геологическим и геофизическим задачам, подготовке и анализе исходных данных, разработке вычислительных схем, проведении вычислительных экспериментов, организации корректной проверки качества по геологически независимым единицам, интерпретации результатов в геологическом и геофизическом контексте, а также в обобщении результатов в виде научных публикаций, докладов и положений, выносимых на защиту.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Автоматизированное выделение устойчивых ассоциаций редких и статистически нетипичных минералов в глобальной базе минералогических данных обеспечивает получение воспроизводимых минералого-геохимических групп, интерпретируемых как различные генетические обстановки, пространственно приуроченных к зонам повышенной рудоносности и пригодных для использования в качестве минералогических критериев прогнозирования соответствующих типов оруденения.
2. Вероятностное выделение потенциальных уранопродуктивных интервалов по данным ГИС (каротаж) корректно выполняется в условиях, когда достоверно подтверждены только продуктивные интервалы, а остальная толща рассматривается как фон неопределенного статуса (PU learning - обучение по “подтверждено продуктивно” vs “фон неизвестного статуса”), при этом проверка по скважинам как независимым единицам исключает перенос информации между разрезами, а итоговые вероятностные разрезы потенциальной урановой продуктивности, сформированные с последующим геостатистическим сглаживанием вдоль профилей, согласуются с керновыми данными и экспертной интерпретацией.
3. Региональное ранжирование перспективности территории на Au-Ag оруденение по интегрированным геолого-геофизическим признакам является воспроизводимым при условии проверки по пространственно разнесенным блокам и ограничения интерпретации прогнозов областью геологической аналогии (АОА - зона, где условия сопоставимы с обучающими данными), что обеспечивает концентрацию известных проявлений и месторождений в верхней доле приоритетных участков (top-k - заданная доля площади для первоочередной проверки) и формирует количественно обоснованный перечень целей для дальнейших геологоразведочных работ.

Апробация работы. Основные результаты научных исследований, представленных в диссертации, неоднократно обсуждались и получали одобрение научного сообщества. Промежуточные и итоговые выводы рассматривались на научных семинарах и заседаниях кафедры, а также на международной научно-практической конференции «75 лет кафедры “Геофизика и сейсмология” - образование, наука и судьбы» КазНУ имени К. И. Сатпаева. Отдельные результаты по минералогической аналитике, картированию урановых горизонтов и региональному Mineral Prospectivity Mapping докладывались и обсуждались в Бакинском государственном университете (г. Баку, Азербайджан) в рамках научных семинаров и мероприятий, приуроченных к юбилею профильных кафедр. В ходе работы осуществлялись регулярные консультации с зарубежным научным консультантом и другими исследователями, специализирующимися на машинном обучении в геологии и геофизике, что способствовало уточнению методологических подходов и сопоставлению полученных результатов с мировым уровнем исследований в данной области.

Список публикаций:

1. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Consolidated geological and geophysical characteristics of uranium deposit rocks and prospects for their utilization (Shu-Sarysu Province, Kazakhstan). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 6(467), 210-229. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.471>

2. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2025). Prediction of rare and anomalous minerals using anomaly detection and machine learning techniques. *Applied Computing and Geosciences*, 26, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2025.100250>
3. Шарапатов, А., Садуов, А. Б., Асирбек, Н. (2023). Сравнительный анализ возможностей алгоритмов машинного и глубокого обучения в геологии. *Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана*, 11(223), 14-21. <https://doi.org/10.48498/minmag.2023.223.11.002>
4. Жумабаев, Б. Т., Садуов, А. Б., Асирбек, Н. (2023). Геомагнитные данные и использование их при решении задач геонаук. *Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана*, 12(224), 30-36. <https://doi.org/10.48498/minmag.2023.224.12.004>
5. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Оценка фильтрационных свойств рудовмещающих пород по данным электрических методов каротажа (Шу-Сарысуская урановая провинция, Казахстан). *Trudy Universiteta*, 3(96), 105-112. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2024_3_105
6. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Плотностные и магнитные характеристики пород восточной части Сарысу-Тенизского поднятия (Центральный Казахстан). *Горный журнал Казахстана*, 4(228), 1-8. <https://doi.org/10.48498/minmag.2024.228.4.006>
7. Асирбек, Н. А., Садуов, А. Б., Шарапатов, А. (2024). Изучение свойств рудовмещающих пород по данным электрических методов каротажа (Шу-Сарысуская урановая провинция, Казахстан). В: *Сборник XI Международной научно-практической конференции "Развитие урановой и редкометалльной промышленности"* (16-18 мая 2024, Алматы). Алматы: Казатомпром, 19-22. ISBN 978-601-7095-048.
8. Садуов, А. Б., Абишев, Э. А., Асирбек, Н. А., Абдыров, М. М., Шарапатов, А. (2025). Машинное обучение и использование геофизических данных в прогнозе Au-Ag оруденения - калиброванные карты перспективности с контролем области применимости (Невада, США). В: *75 Years of the Department of Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies* (21 November 2025, Almaty, Kazakhstan). Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, 114-118. ISBN 978-601-323-650-6.
9. Әсірбек, Н. Ә., Садуов, А. Б., Абдыров, М. М., Шарапатов, Ә. (2025). Синтезированная модель урановых горизонтов в Шу-Сарысуской депрессии. В: *75 Years of the Department of Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies* (21 November 2025, Almaty, Kazakhstan). Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, 125-129. ISBN 978-601-323-650-6.
10. Тайкулаков, Е. Е., Садуов, А. Б. (2021). Выявление геологических структур с применением математических уравнений в интерпретации данных магниторазведки, Чу-Сарысу. В: *Сатпаевские чтения - 2021* (Том 1). 616-619. ISBN 978-601-323-246-1.
11. Сайлауғалиев, Ж. М., Асқарұлы, О., Мейрамбайұлы, А., Жалғасов, Р. Е., Шарапатов, А., Садуов, А. Б. (2022). Подготовка магнитных данных к обработке и интерпретации с помощью программного обеспечения Geosoft OASIS montaj. В: *Сатпаев оқулары-2022. Қазіргі ғылыми зерттеулердің трендтері / Сатпаевские чтения - 2022. Тренды современных научных исследований / Satbayev conference - 2022. Trends in modern scientific research* (Том 1). Алматы: КазННТУ, 93-99. ISBN 978-601-323-291-5.

АННОТАЦИЯ

Садуов Алишер Берікжанұлы

«Қазақстанның және шетел мемлекеттерінің минералогиялық, ұңғымалық және өңірлік геологиялық-геофизикалық деректері мысалында геоболжау міндеттерін шешуде жасанды интеллектті құру және қолдану технологиясы»

8D07104 - Мұнай-газ және кен геофизикасы білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған

Зерттеудің өзектілігі. Қазіргі геологиялық барлау жұмыстары әртекті геологиялық және геофизикалық деректер көлемінің қарқынды өсуі жағдайында жүргізілуде, ал кендену бойынша нақты бақылау кеңістікте және қимада шектеулі әрі біркелкі емес күйінде қалып отыр. Іздеу-бағалау және барлау міндеттері үшін бұл типтік әдістемелік қиындықтарға әкеледі: сенімді расталған «теріс» мысалдардың тапшылығы, бақылаулардың кеңістіктік тәуелділігі, қате экстраполяция қаупі және формальды тексеру кезінде болжам сапасының артық бағалануы. Осы жағдайларда жекелеген модельді әзірлеу емес, геологиялық деректердің табиғатына бейімделген және геологиялық барлауда практикалық шешім қабылдауға жарамды жасанды интеллектіні қолданудың қайта өндірілуге болатын технологиялық схемасын құру өзекті болып табылады. Диссертациялық жұмыс минералогиялық деңгейден бастап ұңғымалық геофизика (каротаж) және аймақтық перспективалылық болжамына дейінгі міндеттерді қамтиды.

Зерттеудің мақсаты. Диссертациялық жұмыстың мақсаты - әртүрлі масштабтық деңгейлерде (минералогиялық, ұңғымалық, аймақтық) геоболжау міндеттерін шешу үшін жасанды интеллект әдістерін құру және қолдану технологиясын әзірлеу және ғылыми негіздеу, бастапқы деректердің геологиялық ерекшеліктерін, нақты бақылаудың шектеулілігін және нәтижелердің практикалық интерпретациясын ескере отырып.

Зерттеу міндеттері. Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді: геологиялық және геофизикалық деректердің ерекшеліктерін талдау және ИИ-модельдерді құру талаптарын айқындау; сирек және статистикалық тұрғыдан атиптік минералдардың тұрақты ассоциацияларын автоматтандырылған түрде бөліп көрсету схемасын әзірлеу және апробациялау; толық емес белгілеу жағдайында ГИС деректері бойынша әлеуетті уранөнімді интервалдарды ықтималдықпен бөлу тәсілін әзірлеу; сапаны геологиялық тәуелсіз бірліктер бойынша тексеру рәсімдерін іске асыру; Au-Ag кенденуі бойынша аймақтық перспективалылықты интеграцияланған геолого-геофизикалық белгілер негізінде ранжирлеу; ықтималдық бағаларды калибрлеу және оларды тәуекелге бағдарланған шешім қабылдауға бейімдеу; модельдеу нәтижелерін нақты деректермен салыстыру және практикалық қолданылуын бағалау.

Зерттеу объектісі. Зерттеу объектісі минералогиялық, ұңғымалық геофизикалық және аймақтық геолого-геофизикалық деректер негізінде шешілетін геоболжау міндеттері болып табылады.

Зерттеу пәні. Зерттеу пәні - толық емес белгілеу, кеңістіктік тәуелділік және геодеректердің біртектілігі жағдайында геологиялық мазмұнды заңдылықтарды анықтау, ықтималдық болжау және перспективалы объектілерді ранжирлеу үшін жасанды интеллект пен машиналық оқыту әдістері мен технологиялық схемалары.

Ғылыми жаңалығы. Жұмыстың ғылыми жаңалығы геоболжау міндеттеріне жасанды интеллектіні қолданудың бірыңғай, қайта өндірілуге болатын технологиясын әзірлеу және апробациялау болып табылады. Ұсынылған схема толық емес фактілік бақылау жағдайында оқытуды, геологиялық тәуелсіз бірліктер бойынша тексеруді, ықтималдықтарды калибрлеуді, геологиялық аналогия аймағын бақылауды, нәтижелердің интерпретациялануын және тәуекелге бағдарланған ранжирлеуді біріктіреді. Технологияның минералогиялық деңгейден аймақтық

Mineral Prospectivity Mapping міндеттеріне дейінгі масштабтарда қолданылу мүмкіндігі дәлелденді.

Теориялық маңызы. Диссертация математикалық-статистикалық рәсімдерді геологиялық және физикалық мазмұнымен үйлестіру арқылы GeoAI бағытындағы әдіснамалық негіздерді дамытады. Сирек расталған объектілер, кеңістіктік автокорреляция, зерттелу дәрежесінің әркелкілігі және экстраполяция тәуекелі жағдайында прогностикалық модельдер құру тәсілі формализацияланды.

Практикалық маңызы. Ұсынылған технология геологиялық барлау жұмыстарының қолданбалы контурына енгізуге жарамды. Минералогиялық деңгейде сирек минерал ассоциацияларын автоматты түрде бөліп көрсету қамтамасыз етіледі. Ұңғымалық геофизикада ықтималдық негізінде уранөнімді интервалдар анықталады. Аймақтық деңгейде белгісіздік ескерілген калибрленген ықтималдық шкаласы негізінде Au-Ag перспективалылық карталары құрылады, бұл экстраполяция тәуекелін төмендетуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері. Автоматтандырылған минералогиялық талдау нәтижесінде әртүрлі генетикалық жағдайлармен интерпретацияланатын тұрақты минералдық топтар анықталды. Уран бағыты бойынша ГИС деректері негізінде ықтималдық разрездер алынып, олар керндік материалдармен және сараптамалық интерпретациямен сәйкестендірілді. Аймақтық деңгейде кеңістіктік тәуелсіз тексеру және ықтималдықтарды калибрлеу негізінде Au-Ag перспективалылық картасы әзірленіп, приоритетті учаскелердің сандық негізделген тізімі қалыптастырылды.

Қорғауға ұсынылатын негізгі ережелер. Автоматтандырылған минерал ассоциацияларын анықтау минералогиялық критерийлерді қалыптастырады; уранөнімді интервалдарды ықтималдықпен бөлу PU learning жағдайында корректі жүзеге асырылады; Au-Ag перспективалылығын аймақтық ранжирлеу кеңістіктік тәуелсіз тексеру және геологиялық аналогия аймағын шектеу жағдайында қайта өндіріледі.

Жеке үлесі. Автор ғылыми мәселені қоюды, зерттеу концепциясын қалыптастыруды, әдістерді бейімдеуді, деректерді дайындау мен талдауды, есептеу эксперименттерін жүргізуді, сапаны тәуелсіз бірліктер бойынша тексеруді және нәтижелерді геологиялық интерпретациялауды жүзеге асырды.

Қорғауға шығарылатын негізгі қағидалар.

1. Жаһандық минералогиялық деректер базасында сирек және статистикалық тұрғыдан атиптік минералдардың тұрақты ассоциацияларын автоматтандырылған түрде бөліп көрсету әртүрлі генетикалық жағдайлар ретінде интерпретацияланатын, кеңістікте рудалылығы жоғары аймақтарға шоғырланатын және тиісті кендену типтерін болжауға арналған минералогиялық критерийлер ретінде қолдануға жарамды қайта өндірілуге болатын минералого-геохимиялық топтарды алуды қамтамасыз етеді.
2. ГИС (каротаж) деректері бойынша әлеуетті уранөнімді интервалдарды ықтималдықпен бөліп көрсету тек өнімді интервалдар ғана сенімді түрде расталған, ал қиманың қалған бөлігі мәртебесі белгісіз фон ретінде қарастырылатын жағдайда (PU learning - "расталған өнімді" vs "мәртебесі белгісіз фон") әдістемелік тұрғыдан дұрыс орындалады; мұнда ұңғымалар тәуелсіз бірліктер ретінде қолданылып, қималар арасында ақпараттың тасымалдануы болдырылмайды, ал профильдер бойымен кейінгі геостатистикалық тегістеуден кейін алынған ықтималдық разрездер керндік деректермен және сараптамалық интерпретациямен үйлеседі.
3. Au-Ag кенденуі бойынша аумақтың перспективалылығын интеграцияланған геолого-геофизикалық белгілер негізінде аймақтық ранжирлеу кеңістікте алшақтатылған блоктар бойынша тексеру және болжамдарды геологиялық аналогия аймағымен (АОА - оқыту деректерімен салыстырмалы жағдайлар сақталатын аймақ) шектеу жағдайында қайта өндіріледі; бұл белгілі көріністер мен кен орындарының басым бөлігінің приоритетті учаскелердің жоғарғы үлесіне (top-k - бастапқы тексеруге бөлінетін берілген аумақ үлесі) шоғырлануын қамтамасыз етеді және әрі

карайғы геологиялық барлау жұмыстарын жоспарлауға арналған мақсаттардың сандық негізделген тізімін қалыптастырады.

Жұмыстың апробациясы. Диссертацияда ұсынылған ғылыми зерттеулердің негізгі нәтижелері бірнеше рет талқыланып, ғылыми қауымдастық тарапынан қолдау тапты. Аралық және қорытынды тұжырымдар ғылыми семинарлар мен кафедра отырыстарында, сондай-ақ Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ-да өткен «Геофизика және сейсмология» кафедрасының 75 жылдығына арналған "білім, ғылым және тағдырлар" атты халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференцияда қарастырылды. Минералогиялық аналитика, уран горизонттарын карталау және аймақтық Mineral Prospectivity Mapping бойынша жекелеген нәтижелер Баку мемлекеттік университетінде (Баку қ., Әзербайжан) ғылыми семинарлар мен профильдік кафедралардың мерейтойлық іс-шаралары аясында баяндалып, талқыланды. Зерттеу барысында шетелдік ғылыми консультантпен және геология мен геофизикадағы машиналық оқытуға маманданған басқа зерттеушілермен жүйелі консультациялар жүргізіліп, бұл әдіснамалық тәсілдерді нақтылауға және алынған нәтижелерді осы бағыттағы әлемдік зерттеулер деңгейімен салыстыруға мүмкіндік берді.

Жарияланымдар тізімі:

1. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Consolidated geological and geophysical characteristics of uranium deposit rocks and prospects for their utilization (Shu-Sarysu Province, Kazakhstan). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 6(467), 210-229. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.471>
2. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2025). Prediction of rare and anomalous minerals using anomaly detection and machine learning techniques. *Applied Computing and Geosciences*, 26, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2025.100250>
3. Шарапатов, А., Садуов, А. Б., Асирбек, Н. (2023). Сравнительный анализ возможностей алгоритмов машинного и глубокого обучения в геологии. *Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана*, 11(223), 14-21. <https://doi.org/10.48498/minmag.2023.223.11.002>
4. Жумабаев, Б. Т., Садуов, А. Б., Асирбек, Н. (2023). Геомагнитные данные и использование их при решении задач геонаук. *Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана*, 12(224), 30-36. <https://doi.org/10.48498/minmag.2023.224.12.004>
5. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Оценка фильтрационных свойств рудовмещающих пород по данным электрических методов каротажа (Шу-Сарысуская урановая провинция, Казахстан). *Trudy Universiteta*, 3(96), 105-112. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2024_3_105
6. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Плотностные и магнитные характеристики пород восточной части Сарысу-Тенизского поднятия (Центральный Казахстан). *Горный журнал Казахстана*, 4(228), 1-8. <https://doi.org/10.48498/minmag.2024.228.4.006>
7. Асирбек, Н. А., Садуов, А. Б., Шарапатов, А. (2024). Изучение свойств рудовмещающих пород по данным электрических методов каротажа (Шу-Сарысуская урановая провинция, Казахстан). В: *Сборник XI Международной научно-практической конференции "Развитие урановой и редкометалльной промышленности"* (16-18 мая 2024, Алматы). Алматы: Казатомпром, 19-22. ISBN 978-601-7095-048.
8. Садуов, А. Б., Абишев, Э. А., Асирбек, Н. А., Абдыров, М. М., Шарапатов, А. (2025). Машинное обучение и использование геофизических данных в прогнозе Au-Ag оруденения - калиброванные карты перспективности с контролем области применимости (Невада, США). В: *75 Years of the Department of Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies* (21 November 2025, Almaty, Kazakhstan). Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, 114-118. ISBN 978-601-323-650-6.
9. Әсірбек, Н. Ә., Садуов, А. Б., Абдыров, М. М., Шарапатов, Ә. (2025). Синтезированная модель урановых горизонтов в Шу-Сарысуской депрессии. В: *75 Years of the Department of*

Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies (21 November 2025, Almaty, Kazakhstan). Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, 125-129. ISBN 978-601-323-650-6.

10. Тайкулаков, Е. Е., Садуов, А. Б. (2021). Выявление геологических структур с применением математических уравнений в интерпретации данных магниторазведки, Чу-Сарысу. В: *Сатбаевские чтения - 2021* (Том 1). 616-619. ISBN 978-601-323-246-1.
11. Сайлауғалиев, Ж. М., Асқарұлы, О., Мейрамбайұлы, А., Жалғасов, Р. Е., Шарапатов, А., Садуов, А. Б. (2022). Подготовка магнитных данных к обработке и интерпретации с помощью программного обеспечения Geosoft OASIS montaj. В: *Сәтбаев оқулары-2022. Қазіргі ғылыми зерттеулердің трендтері / Сатбаевские чтения - 2022. Тренды современных научных исследований / Satbayev conference - 2022. Trends in modern scientific research* (Том 1). Алматы: КазННТУ, 93-99. ISBN 978-601-323-291-5.

ABSTRACT

Saduov Alisher Berikzhanovich

Technology for the development and application of artificial intelligence in solving geospatial prediction tasks (case study of mineralogical, borehole, and regional geological and geophysical data from Kazakhstan and foreign countries)

Submitted for the degree of Doctor of Philosophy (PhD)
Educational Program **8D07104 - Oil, Gas and Ore Geophysics**

Relevance of the research. Modern mineral exploration is conducted under conditions of rapidly increasing volumes of heterogeneous geological and geophysical data, while factual control of mineralization remains limited and uneven in both map view and section. For prospecting-evaluation and exploration tasks, this situation leads to common methodological difficulties, including a shortage of reliably confirmed negative examples, spatial dependence of observations, the risk of invalid extrapolation, and an overestimation of predictive performance under formal validation. Under these constraints, the development of a single model for an isolated case is insufficient, whereas a reproducible technological workflow for artificial intelligence adapted to the geological nature of the data and suitable for practical decision-making in exploration is required. The dissertation is directed toward addressing this need across multiple scales, from mineralogical data analytics and borehole geophysics (well logging) to regional prospectivity prediction.

Aim of the research. The aim of the dissertation is to develop and scientifically substantiate a technology for creating and applying artificial intelligence methods to solve geopredictive tasks at different scale levels (mineralogical, borehole, and regional), taking into account geological specificity of the input data, limited factual control, and the need for practice-oriented interpretation of results.

Research objectives. To achieve the stated aim, the following objectives were accomplished: the key properties of geological and geophysical data that determine requirements for AI model construction in geoprediction were analyzed; an automated workflow for identifying stable associations of rare and statistically atypical minerals in large mineralogical datasets was developed and validated; a probabilistic approach for delineating potentially uranium-productive intervals from well logging data was developed for incomplete labeling conditions, where mainly productive intervals are reliably confirmed; quality assessment procedures based on geologically independent units (wells and spatial blocks) were implemented to prevent information transfer between spatially close observations; a regional workflow for ranking territory prospectivity for Au-Ag mineralization was developed using integrated geological-geophysical predictors, while restricting interpretation to the domain of geological analogy; probability calibration procedures were implemented and adapted for risk-oriented decision-making; and the modeling outputs were compared with factual evidence (core data, expert interpretation, and known occurrences and deposits) to evaluate practical applicability.

Object of the research. The object of the research comprises geopredictive tasks in geology and geophysics solved using mineralogical, borehole geophysical (well logging), and regional geological-geophysical data.

Subject of the research. The subject of the research comprises methods, algorithms, and technological workflows of artificial intelligence and machine learning for identifying geologically meaningful patterns, producing probabilistic forecasts, and ranking prospective targets under incomplete labeling, spatial dependence, and heterogeneous geodata.

Scientific novelty. The scientific novelty of the dissertation lies in the creation and validation of a unified, reproducible technology for applying AI to geopredictive tasks, in which modern computational methods are adapted to realistic exploration constraints. Rather than using isolated algorithms, the key elements required for rigorous work with geodata were integrated and scientifically justified, including learning under incomplete factual control (when predominantly productive objects are confirmed and the

remaining dataset is treated as background of unknown status), validation by geologically independent units, probability calibration, control of the area of geological analogy (the domain where conditions are comparable to those represented in the training data), interpretability of results, and risk-oriented target ranking. The novelty is additionally supported by demonstrated transferability of the workflow across scales, from mineralogical associations to regional Mineral Prospectivity Mapping (MPM).

Theoretical significance. The theoretical significance is defined by advancement of methodological foundations for AI in geology and geophysics through the alignment of mathematical-statistical procedures with the physical and geological meaning of the data. A formalized approach to predictive modeling was developed for conditions typical of mineral exploration, including rare confirmed targets, spatial autocorrelation, heterogeneous sampling density, and the risk of extrapolation beyond the geological analogy domain. The proposed technology may be considered a methodological framework for further research in GeoAI and digital mineral exploration.

Practical significance. The practical significance is defined by the provision of a technology suitable for integration into applied exploration workflows rather than a single-use model or map. At the mineralogical level, the approach enables automated filtering of large mineralogical datasets and extraction of stable associations of rare and statistically atypical minerals, supporting defensible prioritization of subsequent laboratory and field verification. In borehole geophysics (well logging), probabilistic delineation of potentially uranium-productive intervals is produced, which may be used to select sampling intervals, refine follow-up drilling programs, and improve operational efficiency under limited core availability. In regional MPM, the technology supports prospectivity ranking with explicit uncertainty handling, calibrated probability scales, and restriction of interpretation to the area of geological analogy, consistent with phased field planning and reduced expenditure risk associated with uncontrolled extrapolation.

Research results. A validated approach for automated extraction of stable associations of rare and anomalous minerals from a global mineralogical database was developed, yielding reproducible groups interpretable in terms of genetic environments and ore specialization. For uranium-oriented tasks, a probabilistic workflow for delineating potentially productive intervals from well logging data under incomplete factual control was implemented, with performance assessed using wells as independent units; the resulting probabilistic sections were additionally reconciled with core data and expert interpretation after geostatistical smoothing along profiles. At the regional level, an Au-Ag MPM technology based on integrated geological-geophysical predictors was implemented with spatially independent validation, probability calibration, and restriction to the area of geological analogy, resulting in a quantitatively justified set of priority targets for subsequent exploration.

Author's contribution. The author's contribution comprised formulation of the scientific problem, development of the overall concept and structure of the research, selection and adaptation of AI methods to geological and geophysical tasks, preparation and analysis of input datasets, development of computational workflows, execution of computational experiments, organization of quality assessment using geologically independent units, interpretation of results in geological and geophysical contexts, and synthesis of outcomes in the form of publications, presentations, and defense statements.

Main provisions submitted for defense.

1. Automated identification of stable associations of rare and statistically atypical minerals within a global mineralogical database ensures the derivation of reproducible mineralogical-geochemical groups interpreted as distinct genetic environments, spatially confined to zones of increased mineralization and suitable for application as mineralogical criteria for forecasting corresponding ore types.
2. Probabilistic delineation of potentially uranium-productive intervals from well logging data is methodologically valid under conditions where only productive intervals are reliably confirmed and the remaining stratigraphic thickness is treated as background of unknown status (PU learning - learning from "confirmed productive" vs "background of unknown status"); validation by wells as independent units prevents information leakage between sections, and the resulting probabilistic profiles of potential

uranium productivity, further refined by geostatistical smoothing along profiles, are consistent with core data and expert interpretation.

3. Regional ranking of Au-Ag prospectivity based on integrated geological-geophysical predictors is reproducible when validation is performed using spatially separated blocks and interpretation is restricted to the area of geological analogy (AOA - the domain where conditions are comparable to the training data), which supports concentration of known occurrences and deposits within the top fraction of priority areas (top-k - a predefined areal fraction for first-pass verification) and produces a quantitatively justified list of targets for subsequent exploration.

Approbation of the research. The principal results reported in the dissertation were repeatedly discussed and positively evaluated by the scientific community. Intermediate and final conclusions were considered at scientific seminars and departmental meetings, as well as at the international scientific-practical conference “75 Years of the Department of Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies” held at Satbayev University. Selected results in mineralogical analytics, uranium horizon mapping, and regional Mineral Prospectivity Mapping were also presented and discussed at Baku State University (Baku, Azerbaijan) within scientific seminars and anniversary events of профиль departments. During the research, regular consultations were conducted with an international scientific advisor and other researchers specializing in machine learning for geology and geophysics, which supported refinement of methodological choices and benchmarking of outcomes against the international research landscape.

List of publications.

1. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Consolidated geological and geophysical characteristics of uranium deposit rocks and prospects for their utilization (Shu-Sarysu Province, Kazakhstan). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, 6(467), 210-229. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170X.471>
2. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2025). Prediction of rare and anomalous minerals using anomaly detection and machine learning techniques. *Applied Computing and Geosciences*, 26, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2025.100250>
3. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N. (2023). Comparative analysis of machine learning and deep learning capabilities in geology. *Scientific-Technical and Industrial Mining Journal of Kazakhstan*, 11(223), 14-21. <https://doi.org/10.48498/minmag.2023.223.11.002>
4. Zhumabayev, B. T., Saduov, A. B., Assirbek, N. (2023). Geomagnetic data and their use in solving geoscience problems. *Scientific-Technical and Industrial Mining Journal of Kazakhstan*, 12(224), 30-36. <https://doi.org/10.48498/minmag.2023.224.12.004>
5. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Evaluation of filtration properties of ore-hosting rocks based on electrical well logging methods (Shu-Sarysu uranium province, Kazakhstan). *Trudy Universiteta*, 3(96), 105-112. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2024_3_105
6. Sharapatov, A., Saduov, A. B., Assirbek, N., Abdyrov, M., Zhumabayev, B. (2024). Density and magnetic characteristics of rocks in the eastern part of the Sarysu-Teniz uplift (Central Kazakhstan). *Gornyi Zhurnal Kazakhstana (Mining Journal of Kazakhstan)*, 4(228), 1-8. <https://doi.org/10.48498/minmag.2024.228.4.006>
7. Assirbek, N. A., Saduov, A. B., Sharapatov, A. (2024). Study of ore-hosting rock properties using electrical well logging methods (Shu-Sarysu uranium province, Kazakhstan). In: *Proceedings of the XI International Scientific-Practical Conference “Development of the Uranium and Rare-Metal Industry”* (May 16-18, 2024, Almaty). Almaty: Kazatomprom, 19-22. ISBN 978-601-7095-048.
8. Saduov, A. B., Abishev, E. A., Assirbek, N. A., Abdyrov, M. M., Sharapatov, A. (2025). Machine learning and the use of geophysical data in Au-Ag mineralization forecasting - calibrated prospectivity maps with area of applicability control (Nevada, USA). In: *75 Years of the Department of Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies* (November 21, 2025, Almaty, Kazakhstan). Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, 114-118. ISBN 978-601-

323-650-6.

9. Assirbek, N. A., Saduov, A. B., Abdyrov, M. M., Sharapatov, A. (2025). A synthesized model of uranium horizons in the Shu-Sarysu depression. In: *75 Years of the Department of Geophysics and Seismology - Education, Science, and Destinies* (November 21, 2025, Almaty, Kazakhstan). Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, 125-129. ISBN 978-601-323-650-6.

10. Taikulakov, E. E., Saduov, A. B. (2021). Identification of geological structures using mathematical equations in magnetic data interpretation, Chu-Sarysu. In: *Satbayev Readings - 2021* (Vol. 1). 616-619. ISBN 978-601-323-246-1.

11. Sailaugaliev, Zh. M., Askaruly, O., Meirambaiuly, A., Zhalgasov, R. E., Sharapatov, A., Saduov, A. B. (2022). Preparation of magnetic data for processing and interpretation using Geosoft OASIS montaj software. In: *Satbayev Conference - 2022. Trends in Modern Scientific Research* (Vol. 1). Almaty: KazNRTU, 93-99. ISBN 978-601-323-291-5.