

АННОТАЦИЯ

Диссертация на соискание степени «доктор философии» (PhD) по образовательной программе 8D07201 «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»»

БЕКИШЕВ ЕРКЕБУЛАН ТЕМИРХАНОВИЧ

«СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ГИС РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЛБА-НАРЫМСКОГО РУДНОГО ПОЯСА»

Общая характеристика исследования.

В условиях устойчивого роста мирового спроса на минеральные ресурсы, включая редкие, редкоземельные и критические металлы, особую значимость приобретает разработка научно обоснованных методов повышения эффективности геологоразведочных работ. Современный этап развития минерально-сырьевой базы характеризуется истощением традиционных источников сырья, усложнением геологического строения объектов и необходимостью освоения новых, в том числе скрытых и глубоко залегающих типов оруденения. В этих условиях ключевым направлением становится внедрение комплексных цифровых технологий, обеспечивающих интеграцию и интерпретацию разнородной геологической информации.

Регион Центральной Калбы Калба-Нарымского редкометалльного пояса (Восточный Казахстан) представляет собой один из перспективных металлогенических районов, характеризующийся высокой степенью изученности и одновременно значительным потенциалом для выявления новых месторождений. Более чем за столетний период геологических исследований здесь накоплен обширный объем данных, включающий геологические карты различных масштабов, результаты полевых работ, геохимические и геофизические материалы. Вместе с тем, данные различаются по степени достоверности, методам получения и формату представления, что обуславливает их фрагментарность и затрудняет комплексное использование при прогнозировании оруденения.

Более того, в результате современных исследований появляются новые данные в виде результатов высокоточной геохимии, сканирующей электронной микроскопии, космические снимки, полученные с помощью современных спутниковых технологий, которые также должны быть интегрированы в общую структуру информационных данных о редкометалльных объектах.

В связи с этим в работе обоснована необходимость создания единой обновляемой геоинформационной системы (ГИС), обеспечивающей стандартизацию, унификацию и интеграцию разнородных геологических данных. Реализация такого подхода позволяет обеспечить единую идентификацию информации различного генезиса и времени получения, повысить достоверность интерпретации и создать основу для пространственного анализа металлогенических закономерностей.

Существенное значение в исследовании уделено применению методов дистанционного зондирования Земли как эффективного инструмента регионального геологического картирования. Разработанная методика спектральной обработки данных спутников Landsat-8 с использованием анализа главных компонент и отношений спектральных каналов позволяет выделять основные литологические комплексы и зоны спектральных аномалий Fe-оксидного, Si-O и Al-OH типов. Пространственная корреляция данных аномалий с зонами гидротермального изменения и рудной минерализации подтверждает их диагностическую значимость и определяет перспективность использования данного подхода для предварительного прогноза рудоносных участков.

В работе также реализован подход, основанный на применении методов машинного обучения для интерпретации данных дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения. Использование космических снимков WorldView-3 в сочетании с алгоритмами машинного обучения, в частности методом Random Forest, обеспечивает повышение точности классификации геологических объектов, выделения зон изменения и распознавания потенциально рудоносных структур. Интеграция данных методов с ГИС-

технологиями формирует современную цифровую платформу для комплексного анализа геологических систем.

Таким образом, представленное исследование направлено на разработку и апробацию интегрированного подхода, объединяющего геоинформационные технологии, методы дистанционного зондирования Земли и алгоритмы машинного обучения, для повышения эффективности прогноза оруденения в пределах Центральной Калбы. Полученные результаты создают научно-методическую основу для совершенствования геологоразведочных работ, снижения инвестиционных рисков и расширения минерально-сырьевой базы региона.

Актуальность исследований.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геологоразведочных работ в условиях истощения традиционных месторождений и роста спроса на редкие и критические металлы. Для региона Центральной Калбы, Калба-Нарымского редкометалльного пояса, обладающего значительным металлогеническим потенциалом, характерен большой объем накопленных за длительный период разнородных геологических, геохимических и геофизических данных, отличающихся неоднородностью и фрагментарностью, что затрудняет их комплексное использование.

В этой связи особую значимость приобретает разработка интегрированного подхода, основанного на создании единой геоинформационной системы, позволяющей унифицировать и систематизировать многолетние данные, а также на применении современных методов дистанционного зондирования Земли и алгоритмов машинного обучения. Использование спектрального анализа данных Landsat-8 и космических снимков высокого разрешения WorldView-3 в сочетании с алгоритмами машинного обучения (Random Forest) обеспечивает возможность выделения зон гидротермальных изменений и потенциально рудоносных структур.

Таким образом, исследование направлено на создание научно обоснованных методов комплексной интерпретации геологических данных, что является ключевым условием повышения достоверности прогноза оруденения и эффективного освоения минерально-сырьевой базы региона.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки интегрированного подхода, объединяющего ГИС-технологии, методы дистанционного зондирования и алгоритмы машинного обучения для повышения достоверности прогноза оруденения и выделения перспективных участков в пределах Центральной Калбы. Реализация данного подхода позволит повысить эффективность геологоразведочных работ, снизить риски недропользования и обеспечить научно обоснованное расширение минерально-сырьевой базы региона.

Объект исследования: Асубулак-Белогорский рудный узел Калба-Нарымского рудного пояса (Восточный Казахстан).

Предмет исследования: взаимосвязи геологических геопространственных данных, спектральные особенности горных пород и минералов и их индикаторы, определяемые по данным дистанционного зондирования.

Цель исследования: Целью исследования является разработка и апробация интегрированного подхода к прогнозированию рудоносных структур Калба-Нарымского редкометалльного пояса на основе объединения геоинформационных технологий, методов дистанционного зондирования Земли (Landsat-8, WorldView-3) и алгоритмов машинного обучения (Random Forest) для повышения достоверности выделения перспективных участков и эффективности геологоразведочных работ.

Задачи исследования:

- 1) оцифровка систематизированных геопространственных материалов;
- 2) создание веб-ГИС на основе цифровых карт;
- 3) проведение геостатистического анализа с использованием цифровых карт;

4) расчёт спектральных индексов-индикаторов минерализации (оксиды железа, гидроксильные минералы, окварцевание) по данным Landsat-8 и их сопоставление с геологическими данными;

5) разработка моделей машинного обучения для выявления пегматитовых тел и их разграничения с гранитами по данным WorldView-3.

Методика исследования.

Работа основана на комплексном анализе геологических и дистанционных материалов различного масштаба для выявления пространственных закономерностей редкометального оруденения в Калба-Нарымском поясе.

Исследование включало сбор картографических данных, их геопривязку, оцифровку и интеграцию в единую ГИС-базу. На основе цифровых карт применены пространственно-корреляционные и геостатистические методы.

На региональном уровне данные Landsat-8 были подвергнуты атмосферной коррекции, после чего рассчитаны спектральные индексы и комбинации, являющиеся индикаторами минерализации.

Высокодетальные изображения WorldView-3 прошли предварительную спектральную обработку, после чего спектральная информация была усилена геометрическими характеристиками. Для выделения пегматитовых тел использована модель машинного обучения Random Forest, обученная на выборках, что позволило выявить спектральные признаки, связанные с минерализацией.

Все полученные результаты интегрированы в ГИС-среде с формированием интерактивной картографической системы, реализованной как современная многоуровневая система анализа.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Интеграция разномасштабных геологических, дистанционных и атрибутивных данных в единую веб-геоинформационную систему (веб-ГИС) Калба–Нарымского рудного пояса обеспечивает их унификацию и стандартизацию в рамках единой пространственной базы данных, что позволяет сопоставлять разнородную геологическую информацию, выявлять

пространственные закономерности размещения рудных объектов и формировать единую цифровую базу данных, пригодную для использования недропользователями при ранжировании перспективных участков, планировании поисково-разведочных работ и снижении геологических рисков.

2) Спектральная обработка данных Landsat-8 с использованием анализа главных компонент и отношений спектральных каналов позволяет на региональном уровне дифференцировать основные литологические комплексы и выделять зоны спектральных аномалий Fe-оксидного, Si-O и Al-OH типов, пространственно согласующиеся с участками гидротермального изменения и рудной минерализации Центральной Калбы, что делает данный подход эффективным инструментом предварительного геологического картирования и прогноза.

3) Объектно-ориентированный анализ спутниковых данных WorldView-3 высокого пространственного разрешения в сочетании с алгоритмом Random Forest обеспечивает более достоверное выделение пегматитовых тел и их разграничение с вмещающими гранитоидами по сравнению с пиксельной классификацией за счёт совместного использования спектральных, текстурных и геометрических признаков объектов.

Научная новизна:

Научная новизна выполненного исследования заключается в разработке и реализации интегрированного геоинформационного подхода к прогнозу рудоносности, основанного на синтезе классических металлогенических представлений, методов дистанционного зондирования Земли и алгоритмов машинного обучения:

1. Впервые для Калба-Нарымского редкометалльного пояса на примере Центральной Калбы создана интегрированная геоинформационная система нового поколения, обеспечивающая унификацию, стандартизацию и совместную интерпретацию разнородных геологических, геохимических, геофизических и дистанционных данных, накопленных более чем за 100 лет исследований. Разработанная система реализует принципы многомасштабного

анализа и пространственной согласованности данных и послужила основой для создания интерактивной цифровой карты Калба–Нарымского пояса.

2. Разработана и научно обоснована методика спектральной интерпретации данных Landsat-8, включающая анализ главных компонент и отношения спектральных каналов, позволяющая на региональном уровне дифференцировать литологические комплексы и выявлять зоны спектральных аномалий Fe-оксидного, Si–O и Al–OH типов. Установлена их пространственная и генетическая связь с зонами гидротермальных изменений и рудной минерализации, что подтверждает диагностическую значимость спектральных индикаторов при прогнозе оруденения.

3. Впервые выполнена адаптация методов машинного обучения (Random Forest) для задач геологического картирования и прогноза редкометального оруденения с использованием высокоразрешающих спутниковых данных WorldView-3. Предложен подход, основанный на интеграции спектральных, текстурных и геометрических признаков, обеспечивающий повышение точности классификации гранитоидных комплексов и редкометальных пегматитов на региональном уровне.

4. Разработана концептуальная модель интеграции ГИС, данных ДЗЗ и алгоритмов машинного обучения, обеспечивающая переход от фрагментарного анализа к системному пространственному моделированию геологических объектов и металлогенических закономерностей. Показано, что комплексное использование указанных методов существенно повышает достоверность прогноза рудоносных структур.

5. Выявлены новые закономерности пространственного распределения гидротермально изменённых пород и редкометальной минерализации, отражённые в прогнозных картах, полученных на основе интеграции спектральных, геологических и машинных моделей, что расширяет представления о факторах локализации оруденения в пределах Калба–Нарымского пояса на примере Центральной Калбы.

Практическая значимость:

Практическая значимость исследования определяется внедрением разработанного интегрированного подхода, объединяющего геоинформационные технологии, методы дистанционного зондирования Земли и алгоритмы машинного обучения, и его применимостью для решения широкого круга задач геологоразведки и управления минерально-сырьевой базой.

Созданная геоинформационная система представляет собой единую цифровую среду, обеспечивающую сбор, хранение, унификацию и анализ разнородных геологических, геохимических, геофизических и дистанционных данных. Ее использование позволяет существенно повысить эффективность геологического картирования, структурного анализа и прогнозирования рудоносности на различных масштабных уровнях.

Разработанная методика спектральной обработки данных Landsat-8 обеспечивает оперативное выделение зон гидротермальных изменений (Fe-оксидных, Si-O и Al-OH типов) и может использоваться в качестве эффективного инструмента предварительного геологического картирования и ранних стадий поисковых работ, снижая затраты на полевые исследования.

Применение алгоритмов машинного обучения (Random Forest) к данным WorldView-3 позволяет повысить точность распознавания литологических комплексов, гранитоидов и редкометальных пегматитов, что существенно увеличивает достоверность прогнозных построений и эффективность выбора перспективных участков.

Разработанные прогнозные карты и модели пространственного распределения оруденения могут использоваться при планировании поисково-оценочных и разведочных работ, а также при ранжировании территорий по степени их инвестиционной привлекательности.

Результаты исследования внедрены в производство ТОО «Корпорация ГеоПроект», а также в учебный процесс Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева по образовательной программе 6В07302

«Геодезия и картография» в рамках дисциплины «Аэрокосмические методы съёмки».

В целом, результаты исследования формируют научно-методическую основу для перехода к цифровым технологиям в геологоразведке и могут быть использованы при решении задач восполнения и расширения минерально-сырьевой базы Республики Казахстан.

Фактический материал и личный вклад автора.

В основу работы положены материалы, полученные автором в процессе обучения и в рамках научного проекта BR24992854 «Разработка и реализация конкурентоспособных научно-обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области», реализуемого в Восточно-Казахстанском техническом университете им. Д. Серикбаева.

Автор прошёл зарубежную научную стажировку в Masaryk University (кафедра географии, г. Брно, Чешская Республика).

В ходе работы изучены отечественные и зарубежные публикации по Калба-Нарымскому поясу и редкометальным месторождениям. В исследование включены материалы, полученные в ходе полевых работ в пределах месторождений Калба-Нарымского пояса (Центральная Калба), а также предоставленные коллегами.

Данные дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения (Landsat-8) получены бесплатно с порталов EarthExplorer и Copernicus Data Space Ecosystem. Высокодетальные снимки WorldView-3 приобретены в рамках научного проекта BR24992854 «Разработка и реализация конкурентоспособных научно-обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области».

Апробация работы и публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в научных изданиях, а также представлены и обсуждены на международных научных конференциях.

Публикации в международных научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus / Web of Science:

1) Mizernaya M.A., Aitbayeva S.S., Kotler P.D., Dolgopolova A.V., Seltmann R., Bekishev Y., Kuzmina O.N., Oitseva T.A., Shayakhmetova Z.A., Akbarov Y.Y., Baisalova A.O. Pegmatites of the Kalba–Naryn Batholith (East Kazakhstan): Origin and Classification. Minerals, 2026, 16, 187.

Публикации в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

1) Бекишев Е.Т., Рахымбердина М.Е., Мизерная М.А., Матайбаева И.Е., Кузьмина О.Н. Применение методов дистанционного зондирования при поисках редкометальных месторождений в Восточно-Казахстанской области // Вестник ВКТУ. – 2023. – №3. – С. 86–98;

2) Бекишев Е.Т., Рахымбердина М.Е., Левин Е., Капасов А.К. Қалба–Нарым кен белдеуінің сирек кездесетін металл кен орындарының дерекқорын құру // Горный журнал Казахстана. – 2025. – №9 (245). – С. 33–39;

3) Асылханова Ж.А., Рахымбердина М.Е., Бекишев Е.Т., Левин Е., Грохотов Е.В. Разработка цифровой геологической базы данных Калба–Нарымского рудного пояса Восточного Казахстана // Труды университета. – 2025. – №4 (101);

4) Bekishev Y., Levin E., Mataibayeva I., Orazbekova G. Study and Prospects of the Red Cordon Rare Metal Ore Occurrence in the Asubulak Ore Field // Труды университета. – 2025. – №4 (101).

Участие в международных научных конференциях:

1) Asian Conference on Remote Sensing 2024 (ACRS 2024). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 913(5), 052050;

2) International Conference on Cartography and GIS 2024, 16–21 июня 2024 г., Несебр, Болгария. ISSN: 1314-0604;

3) XX International Scientific and Practical Conference 2023, 22–24 мая 2023 г., Мюнхен, Германия. ISBN: 978-9-40368-892-3;

4) APRSEI – PHEDCS 2025, 23–25 сентября 2025 г., Ташкент, Узбекистан // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-5/W3-2025.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из 122 страниц и включает введение, 6 разделов, заключение, список использованных источников из 124 наименований, 40 рисунков, 17 таблиц и 2 приложения.

В первой главе диссертационной работы рассмотрены редкие металлы, их роль и значимость в современном промышленном производстве, а также проанализированы мировые тенденции роста спроса на данную группу полезных ископаемых. Особое внимание уделено расширению сфер применения редких металлов в высокотехнологичных отраслях, включая электронику, энергетику и производство инновационных материалов.

Кроме того, в главе приведён обзор редкометалльных месторождений Республики Казахстан, рассмотрены их геолого-экономические особенности, степень изученности и перспективы освоения.

Во второй главе диссертационной работы изложена методика выполнения исследований. Описаны этапы сбора и анализа геолого-картографических материалов, а также данных дистанционного зондирования Земли, включая спутниковые снимки Landsat 8 и WorldView-3.

Приведены сведения о проведённых геологических полевых работах, включая маршруты, наблюдения и отбор образцов горных пород для последующего рентгеноструктурного анализа (XRD). Описаны применяемые программные средства обработки и анализа данных, в том числе ENVI и QGIS.

Кроме того, подробно рассмотрена методика обработки спутниковых данных дистанционного зондирования, включая предварительную обработку, спектральный анализ и интерпретацию изображений. Описаны подходы к

оцифровке геологических карт и интеграции полученных данных в геоинформационную среду для последующего анализа.

В третьей главе диссертационной работы представлено геологическое описание Калба-Нарымского рудного пояса. Рассмотрены особенности его тектонического строения, включая основные структурные элементы, определяющие формирование и размещение рудных объектов.

Освещены магматические комплексы Калба-Нарымского батолита, их состав, возраст и геодинамические условия формирования. Особое внимание уделено вопросам металлогенической специализации региона, с выделением ведущих типов оруденения.

Отдельный раздел посвящён редкометалльным пегматитам, их генетическим особенностям, условиям формирования и роли в локализации редких металлов. Также приведена характеристика основных месторождений Центральной Калбы, их геологического строения и минерально-сырьевого потенциала.

В четвёртой главе диссертационной работы рассмотрены геоинформационные системы и их возможности при решении геологических задач. Приведён обзор мировых геологических баз данных, ГИС-платформ и веб-ресурсов, используемых для хранения, анализа и визуализации пространственных данных, а также рассмотрено текущее состояние и краткая история развития геоинформационных технологий в Казахстане.

Описана методика сбора, систематизации и оцифровки геологических карт с последующей интеграцией в единую геоинформационную среду. Особое внимание уделено процессам подготовки данных и их публикации в формате веб-ГИС, обеспечивающем удобный доступ и визуализацию геологической информации.

На основе созданных цифровых карт выполнены корреляционный, кластерный и геостатистический анализы, направленные на выявление закономерностей пространственного распределения геологических объектов и факторов, контролирующих размещение редкометалльного оруденения.

В пятой главе диссертационной работы рассмотрены вопросы регионального литологического картирования и выявления индикаторов гидротермальных изменений пород на основе данных дистанционного зондирования Земли со спутника Landsat 8.

Выполнен анализ главных компонент (РСА), позволивший определить информативность отдельных спектральных каналов и интерпретировать вклад каждой главной компоненты в выделение геологических объектов. На основе полученных результатов построены классификационные карты, отражающие распределение литологических разностей.

С применением метода соотношения спектральных полос рассчитаны геологические индексы, характеризующие содержание оксидов железа, гидроксильных минералов и зоны окварцевания. На основе данных индексов сформированы ложноцветные композиции, что позволило выделить и картировать зоны гидротермально изменённых пород.

В шестой главе диссертационной работы рассмотрена разработка моделей машинного обучения для выявления пегматитовых тел и их разграничения с гранитами на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения WorldView-3.

На первом этапе выполнено обучение моделей с использованием исключительно спектральных характеристик изображений. Проведена оценка их эффективности при классификации геологических объектов и выделении пегматитовых тел.

На втором этапе реализован подход с использованием гибридных данных, включающих как спектральные, так и геометрические признаки объектов. Сравнительный анализ результатов показал повышение точности классификации и более надёжное разграничение пегматитов и гранитов при использовании комплексного подхода.