

## АННОТАЦИЯ

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

**ЕСКАЛИЕВ ЕРТАЙ ТАЛГАТОВИЧ**

### **«МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНО-КАЛБИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЯСА»**

**Общая характеристика работы:** В диссертации рассматривается применение методов спутникового дистанционного зондирования, в частности данных мультиспектрального радиометра ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и гиперспектральных данных EnMAP, для картирования зон гидротермальных изменений и разработки критериев поиска золоторудных месторождений в Западно-Калбинском золоторудном поясе Восточного Казахстана. В рамках исследования разработана комплексная геологически обоснованная система целевых минералов, интегрирующая региональные геологические данные, минералогопетрографические характеристики месторождений и модели гидротермальных изменений с лабораторными эталонными спектрами (библиотека USGS). Установлен воспроизводимый технологический процесс обработки мультиспектральных данных ASTER, включающий совместную регистрацию, атмосферную коррекцию, маскирование NDVI, расчеты спектральных индексов, генерацию псевдоцветных композитов и мозаику многосценивых данных. Исследование демонстрирует, что использование диагностических спектральных признаков минералов Al–OH, Mg/Fe–OH, карбонатов и оксидов Fe<sup>3+</sup>, и их свойств поглощения и отражения электромагнитного излучения, обеспечивает воспроизводимую связь между спутниковыми спектральными откликами и зональностью гидротермальных изменений, генетически связанных с золотым оруденением. Методология была валидирована посредством пространственного корреляционного анализа с известными месторождениями и поисковыми проявлениями, а также гиперспектрального подтверждения EnMAP, демонстрируя сильную пространственную корреляцию: более

80 месторождений и следов геологической разведки совпадают с зонами изменений, выявленными по данным ASTER.

**Актуальность исследования.** В последние десятилетия глобальный спрос на золото и масштабы золотодобычи продолжают расти, в то время как открытие и разработка месторождений становятся все более сложными из-за истощения богатейших месторождений, снижения содержаний руды и ужесточения экологических ограничений. В Восточном Казахстане находятся многочисленные золоторудные месторождения различных генетических типов, с концентрацией их в Западно-Калбинском золоторудном поясе. В то же время потенциал открытия новых крупных объектов с использованием только традиционных поисковых подходов снижается, создавая потребность в масштабируемых и воспроизводимых методах скрининга. Спутниковое дистанционное зондирование предоставляет такую возможность путем картирования зон гидротермальных изменений и структурного контроля на региональном масштабе, но его применение в Казахстане остается ограниченным и требует разработки новых методик.

**Объект исследования:** золоторудные месторождения и проявления Западно-Калбинской металлогенической зоны, а именно рудные поля Бакырчик и Акжал-Васильевское (Восточный Казахстан).

**Предмет исследования:** зоны гидротермальных изменений, связанные с золотым оруденением, их спектральные признаки, обнаруживаемые спутниковым дистанционным зондированием, и связь между минералогией изменений и формированием золотого оруденения.

**Цель исследования:** Разработать согласованную методологию дистанционного зондирования для поиска золота в Западно-Калбинском золоторудном поясе (Восточный Казахстан), которая картирует следы гидротермальных изменений и поддерживает выделение перспективных зон.

**Задачи исследования:**

1) Сформировать и обосновать набор ключевых индикаторов гидротермальных изменений в золоторудных системах Западно-Калбинского золоторудного пояса, отражающих рудообразования и пригодных для интерпретации данных дистанционного зондирования Земли; затем оценить их диагностическую информативность и ограничения при прогнозном выделении перспективных золоторудных участков.

2) Построить систему целевых индикаторов, которая картирует минералы гидротермальных изменений и диагностические поглотители

излучения с использованием региональных геологических данных и эталонных лабораторных спектров.

3) Разработать воспроизводимый технологический процесс обработки мультиспектральных данных ASTER, включающий выравнивание, маскирование NDVI, спектральные индексы, генерацию псевдоцветных композитов и мозаику мультисценных данных.

4) Валидировать результаты картирования гидротермальных изменений с использованием независимого объектно-ориентированного сравнения и гиперспектральных спектров EnMAP, где доступно покрытие.

5) Создать региональный набор данных по гидротермальным изменениям и выявить перспективные зоны для постановки разведочных работ.

#### **Основные методы исследования:**

Обзор и анализ геологической информации по золоторудным объектам Западно-Калбинского пояса; обоснование набора ключевых минералов-индикаторов гидротермальных изменений в золоторудных рудообразующих системах; создание каталога лабораторных спектральных проявлений минералов-индикаторов на мульти- и гиперспектральных снимках; комплексные аналитические исследования, включающие обработку данных спутникового дистанционного зондирования (мультиспектральные данные ASTER и гиперспектральные данные EnMAP), спектральный анализ, расчеты спектральных индексов, генерацию псевдоцветных композитов, пространственный корреляционный анализ и интеграцию с геологическими и минералогическими данными. Оценка диагностической информативности и ограничения при прогнозном выделении перспективных золоторудных участков с помощью методов зондирования Земли.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1) Впервые для Западно-Калбинского золоторудного пояса разработана геологически обоснованная схема минералого-спектральной зональности, основанная на интеграции региональных геологических данных, минералого-петрографических характеристиках месторождений и моделей гидротермального изменения с лабораторными эталонными спектрами (библиотека USGS). Показано, что использование диагностических спектральных признаков минералов Al-OH, Mg/Fe-OH, карбонатов и оксидов Fe<sup>3+</sup>, регистрируемых сенсором ASTER, обеспечивает воспроизводимую связь между спутниковыми спектральными отражениями и зональностью

гидротермальных изменений, генетически связанных с золотым оруденением.

2) Разработана интегрированная мульти- и гиперспектральная методика поисков золота с минералогической верификацией, объединяющая мультиспектральный анализ ASTER с гиперспектральной минералогической верификацией по данным EnMAP. Показано, что сочетание мультиспектральных коэффициентов, ориентированных на диагностические полосы поглощения Al-OH, Mg/Fe-OH, карбонатов и оксидов Fe<sup>3+</sup>, с высокоразрешающим спектральным сопоставлением обеспечивает переход от регионального поискового картирования к локальной минералогической идентификации и повышает геологическую обоснованность дистанционно выявляемых аномалий.

3) Показана высокая эффективность дистанционного картирования гидротермальных изменений для выявления перспективных золоторудных зон в пределах Западно-Калбинского пояса. На площади около 30 750 км<sup>2</sup> установлена устойчивая пространственная корреляция между зонами изменения, выделенными по данным ASTER, и более чем 80 известными месторождениями и рудопроявлениями золота. На основе комплексной валидации воспроизведена локальная зональность гидротермальных изменений и выделены три перспективные зоны (B1, B2 и A1), что подтверждает возможность выявления скрытых и ранее не выявленных объектов золоторудной минерализации.

**Научная новизна.** Научная новизна данной работы заключается в интеграции геологически обоснованной системы целевых минералов-индикаторов для Западно-Калбинского пояса с воспроизводимым технологическим процессом обработки многосценых данных ASTER, который производит сопоставимые результаты по всей площади исследования, в сочетании с двухуровневой стратегией валидации, которая объединяет объектно-ориентированную пространственную корреляцию с месторождениями и поисковыми проявлениями вместе с гиперспектральным подтверждением EnMAP в области перекрытия покрытий, тем самым усиливая интерпретацию минералов-индикаторов и оценку неопределенности. На золоторудных объектах данные работы проводятся в Казахстане впервые, что несомненно внесет значительный вклад в развитие использования дистанционных технологий для поисков и разведки месторождений различных генетических типов.

**Практическая значимость.** Практическая значимость заключается в создании методики использования дистанционных

методов для предварительного прогноза перспективных участков возможных золоторудных проявлений, месторождений, что значительно повысит эффективность геологоразведочных работ.

Результаты исследования внедрены в производственную деятельность ТОО «GEOSAT» и используются в учебном процессе НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева» по образовательной программе 7М07302 «Геодезия» по дисциплине «Автоматизированные системы сбора и обработки результатов дистанционного зондирования».

#### **Фактический материал и личный вклад автора.**

Основной фактический материал исследования основан на данных и опыте, полученных автором в период обучения в докторантуре, а также в ходе участия в следующих научных проектах, финансируемых Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

1. ИРН BR24992854 «Разработка и реализация конкурентоспособных научно-обоснованных технологий для обеспечения устойчивого развития горно-металлургической отрасли Восточно-Казахстанской области».

2. ИРН AP25795761 «Разработка комбинированного метода для прогнозирования золоторудных месторождений на основе спутниковых технологий, ГИС и искусственного интеллекта глубокого обучения».

В рамках повышения квалификации автор прошел две научные стажировки в Техническом университете Берлина (Германия), программа которых была тесно согласована с методологией и аналитическими подходами, используемыми в диссертационной работе.

В диссертации использованы результаты анализа монографических, справочных и научных публикаций по золоторудным объектам Западно-Калбинского пояса и зарубежным аналогам. Работа опирается на региональные геологические материалы и базы данных, собранные и интерпретированные автором, а также на результаты обработки спутниковых данных дистанционного зондирования и полученные тематические картографические продукты. Дополнительно были использованы сведения об известных месторождениях и объектах поисково-разведочных работ в пределах района исследований, включая материалы предшествующих работ и, при наличии, дополнительные данные, полученные в сотрудничестве с коллегами, выполнявшими полевые исследования на рассматриваемых объектах.

Обработка спутниковых данных и разработка методики выполнялись в рамках проекта IRN AP25795761 и были выполнены

автором. На основе полученных результатов автором предложена интегрированная методология прогнозирования и поисков золоторудных объектов, сочетающая спутниковое дистанционное зондирование и геоинформационный анализ, и расширяющая возможности традиционных геологоразведочных работ за счет эффективного инструмента регионального скрининга и приоритизации целей.

**Апробация работы и публикации.** Результаты работы опубликованы в 7 статьях, из них 3 – в изданиях, рекомендованных КОКШВО РК (Труды университета, Горный журнал Казахстана), 1 – в журнале, входящем в базу данных Scopus / Web of Science (Minerals).

**Результаты исследований отражены в следующих публикациях:**

Рецензируемый журнал открытого доступа, включенный в Scopus/ Web of Science:

1. D'yachkov B.A., Mizernaya M.A., Khromykh S.V., Bissatova A.Y., Oitseva T.A., Miroshnikova A.P., Frolova O.V., Kuzmina O.N., Zimanovskaya N.A., Pyatkova A.P., Zikirova K.T., Ageyeva O.V., Yeskaliyev Y.T. Geological history of Great Altai: Implications of Mineral Exploration. Minerals 12 (6), 744, 2022 <https://doi.org/10.3390/min12060744>.

Научные журналы, рекомендованные КОКШВО МНВО РК:

1. Zikirova K.T., Mizernaya M.A., Yeskaliyev Y.T., Aitkazyuev T., Joyashish T. The Scientific Basis of the Investment Attractiveness of Geological Structures on the Example of Rudny Altai. Труды университета, №1 (90), 2023, С. 144-150.

2. Мизерная М.А., Дьячков Б.А., Мирошникова А.П., Ескалиев Е.Т. Особенности геологического строения, магматизма и рудообразования месторождений Бакырчикского рудного поля. Труды университета, №3 (84), 2021. С. 94-99.

3. Mizernaya M.A., Agaliyeva B.B., Shayakhmetova Z.A., Yeskaliyev Y.T. Features of the microelement composition of ore of the Artemyevskoye deposit (Rudny Altai). Горный журнал Казахстана, №1, 2026, С. 25-30.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на международных конференциях:

1. Methodology of scientific forecasting based on GIS of precious metal deposits in Eastern Kazakhstan. 20-я Международная конференция «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты», 11- 14 мая 2021. Киев, Украина.

2. Structural position, magmatism and mineralization of Bakyrchik ore field (Kazakhstan). 22-я международная междисциплинарная научная геоконференция SGEM, 4-10 июля 2022, Альбения, Болгария.

3. WeedsGalore: A Multispectral and Multitemporal UAV-Based Dataset for Crop and Weed Segmentation in Agricultural Maize Fields. Зимняя конференция IEEE/CVF по применению компьютерного зрения (WACV), 28 февраля–4 марта 2025 года, Тусон, Аризона, США.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 161 странице, которая включает введение, 6 глав, заключение и список использованных источников из 94 наименований, 56 рисунков, 14 таблиц, 2 приложений.

В первой главе приводится информация о состоянии минеральных ресурсов золота в Казахстане и обосновывается выбор площадей исследования.

Во второй главе рассматривается краткое описание геологической позиции Западной Калбы в структурах Иртыш-Зайсанской складчатой системы, дается описание основных золоторудных объектов Восточного Казахстана.

Третья глава посвящена изложению разработанной докторантом методики использования технологии дистанционного зондирования земли для геологических целей.

Четвертая глава описывает методы дистанционного зондирования, применяемые для оценки зон гидротермальных изменений на основании показателей поглощения зон электромагнитного излучения.

В пятой главе описаны результаты картирования на основе данных дистанционного зондирования в пределах эталлонных территорий (Бакырчикское и Акжал-Васильевское рудные поля).

В шестой главе на основе разработанной методики выделены перспективные рудные поля В1, В2, А1.

В Заключении приведены основные выводы по результатам исследований.