



X Всероссийская конференция «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2025), посвящённую памяти академика Ю.И. Шокина

**РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ
РУДОПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНО ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Докладчик: Академик НАН РК,
академик НИА РК, д.ф-м.н.,
профессор Темирбеков Н.М.

О программе

Президент Республики Казахстан Касым-Жомарт Токаев в своем Послании народу Казахстана от 1 сентября 2021 года указал на важность разработки природных ресурсов и отметил, что геологическая изученность страны остается на низком уровне. Он подчеркнул необходимость расширения доступа инвесторов к качественной геологической информации путем создания Национальной геологической службы и цифровой базы данных геологической информации. В этой связи настоящая программа исследований напрямую отвечает на эти вызовы, поставленные на уровне национальной стратегии, и направлена на повышение результативности геологоразведочных работ в Казахстане.

Данная программа «BR27100483 Разработка прогнозно-поисковых технологий выделения рудоперспективных территории на основе анализа данных единой платформы недропользователей «MINERALS.GOV.KZ» с применением искусственного интеллекта и методов дистанционного зондирования земли» исследований охватывает широкий спектр научных направлений, включая геологию, геофизику, геохимию, минерагению, математическую геоинформатику, дистанционное зондирование, искусственный интеллект и анализ больших данных.

Исполнители проекта



**Жумагулов Бакытжан
Турсынович**

Главный научный сотрудник



**Темирбеков Нурлан
Муханович**

Руководитель проекта



**Вабищевич Петр
Николаевич**

Главный научный сотрудник



**Гавриленко Олег
Дмитриевич**

Ведущий научный сотрудник



**Тамабай Динара
Оразбекқызы**

Старший научный сотрудник



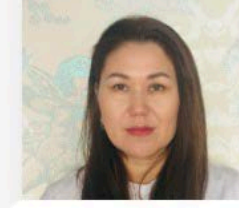
**Зимановская Наталья
Александровна**

Старший научный сотрудник



**Тлеулесова Айгерим
Мекемтасовна**

Старший научный сотрудник



**Мустафина Зинура
Агзамнова**

Научный сотрудник



**Ахмедов Даулет
Шафигуллович**

Главный научный сотрудник



**Темирбеков Алмас
Нурланович**

Ведущий научный сотрудник



**Касенов Сырым
Еркинович**

Ведущий научный сотрудник



**Исахов Алибек
Абдишимович**

Ведущий научный сотрудник



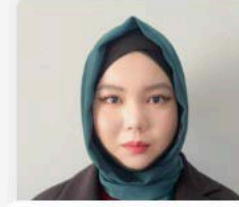
**Омиржанова Бакытжан
Болатовна**

Инженер



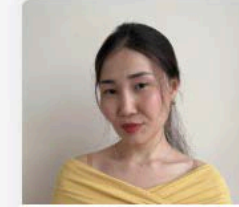
**Танашова Мөлдір
Есенәліқызы**

Младший научный сотрудник



**Сейтмуратова Зульфия
Ильясқызы**

Лаборант



**Турлыбек Жания
Ғанибекқызы**

Лаборант



**Ешматова Дильфуза
Бахромовна**

Ведущий научный сотрудник



**Иванов Дьулус
Харлампович**

Ведущий научный сотрудник



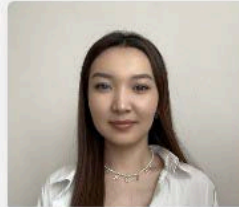
**Горфинкель Наталья
Евгеньевна**

Ведущий научный сотрудник



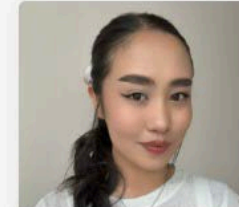
**Темирбекова Лаура
Нурлановна**

Ведущий научный сотрудник



**Тугенбаева Жансая
Серікқызы**

Лаборант



**Муханова Томирис
Ғабитқызы**

Лаборант

Цель и задачи программы

Цель: Разработка прогнозно-поисковых технологий выделения рудоперспективных территории на основе анализа данных единой платформы недропользователей «Minerals.gov.kz» с применением искусственного интеллекта и методов дистанционного зондирования Земли.

Для достижения поставленной цели будут решены следующие **задачи**:

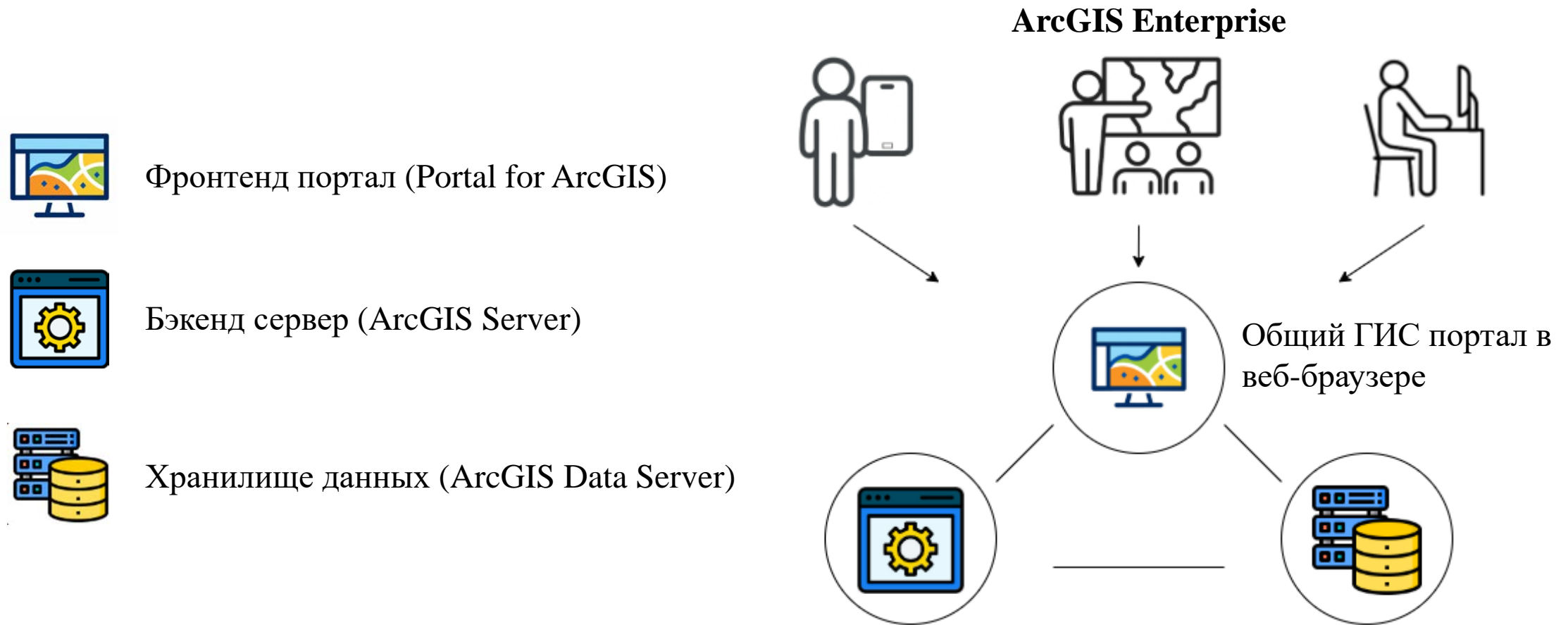
- 1. «Внедрение алгоритмов ИИ для автоматизации процессов обработки, анализа, очистки и фильтрации геологических данных, включая выделение ключевой информации, удаление шума и артефактов, что способствует повышению точности и качества данных».*
- 2. Интеграция машинного обучения и ИИ в платформу ЕПН «Minerals.gov.kz» с введением прототипа системы в опытную эксплуатацию и предоставлением аналитических отчетов прогнозно-поисковой геологической информации заинтересованным пользователям;*
- 3. Разработка методики картирования минералогических индикаторов для выявления перспективных рудных месторождений с комплексным использованием сведений гравиметрических и магнитных измерений и аэрокосмических данных на тестовых участках;*
- 4. Разработка алгоритмов с применением методов машинного обучения для выделения структурных элементов, литологических неоднородностей, идентификация метасоматических изменений на тестовых участках.* ⁴

Структура научной программы



Программное обеспечение ArcGIS

ArcGIS PRO и ArcGIS Enterprise используются в рамках научно-исследовательской деятельности на основе соглашения с компанией ESRI. Программный комплекс ArcGIS Enterprise установлен в дата-центре ТОО «Академсеть».



Исполнители научного проекта BR27100483 выражают благодарность компании ESRI и факультету географии КазНУ им. Аль-Фараби за поддержку исследований.

1. Автоматизация обработки и анализа геологических данных с помощью ИИ для повышения их точности и качества

В данной задаче формулируются ключевые задачи, решаемые посредством внедрения методов искусственного интеллекта в сферу анализа геологических данных. Каждая из задач направлена на решение отдельных аспектов проблем, связанных с качеством, достоверностью и интерпретируемостью геоданных. В рамках реализации данной задачи предусмотрены следующие подзадачи:

1.1 Автоматическая обработка и очистка данных. Разработка и внедрение ИИ-моделей, способных без участия человека выполнять рутинные задачи по предварительной обработке данных.

1.2 Фильтрация шумов и артефактов. Повышение достоверности данных за счёт удаления нежелательных шумов, вызванных ошибками измерений, внешними воздействиями (например, электромагнитными помехами), артефактами приборов или цифровой интерполяцией.

1.3 Выделение ключевой информации. Автоматическое извлечение значимых признаков и структур из массивов геоданных.

1.4 Повышение точности и качества данных. Обеспечение повышения достоверности интерпретации и последующего моделирования на основе более чистых и точно интерпретированных данных.

1.1 Автоматическая обработка и очистка данных

| Этап | Описание | Библиотеки |
|---------------------------------------|--|---|
| 1. Загрузка и чтение данных | Загрузка пространственных данных различных форматов | geopandas, rasterio, pandas |
| 2. Приведение к единой проекции | Преобразование в EPSG:3857 | pyproj, geopandas |
| 3. Выявление и заполнение пропусков | Восстановление недостающих значений с помощью интерполяции | scipy.interpolate.griddata |
| 4. Коррекция систематических выбросов | Удаление аномалий | numpy, sklearn.ensemble.IsolationForest |
| 5. Сохранение результата | Запись в формат .geojson или .shp | geopandas |

1.2 Фильтрация шумов и артефактов

| Подход | Подходит для | Инструмент | Преимущество |
|----------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| CNN | Растровые снимки | Python (TensorFlow) | Высокоточная очистка |
| Autoencoder | 1D сигналы или изображения | Python (Keras) | Глубокое восстановление структуры |
| Kalman / Butterworth | Временные геофиз. сигналы | Python (pykalman, scipy) | Лёгкость реализации и контроль шумов |
| Focal Statistics | Растры в ArcGIS | ArcGIS Pro (GUI, arcpy) | Простота и визуальная настройка |

1.3 Выделение ключевой информации

Классификация и сегментация данных с помощью нейронных сетей (например, U-Net, ResNet);

Использование методов feature extraction:

PCA — для снижения размерности и выделения основных геофизических признаков;

t-SNE — для визуализации аномалий;

DBSCAN — выделение аномальных зон;

| Метод | Python | ArcGIS Pro |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| U-Net, ResNet | TensorFlow, PyTorch | Через ArcGIS Notebooks или .dlpk |
| PCA, t-SNE, DBSCAN | sklearn, scipy, umap-learn | PCA есть встроенно, t-SNE — нет |
| Обнаружение объектов | YOLOv5, Detectron2 | DetectObjectsUsingDeepLearning |
| Сегментация изображений | Полный контроль в Jupyter | Готовые инструменты в Image Analyst |

1.4 Повышение точности и качества данных

Повышение качества данных и прогнозных моделей требует комплексного подхода:

- интеграции разнородных данных (гравиметрия, геохимия),
- строгой калибровки по эталонным (лабораторным) значениям,
- использования ансамблей ИИ-моделей, которые повышают устойчивость и точность интерпретации.

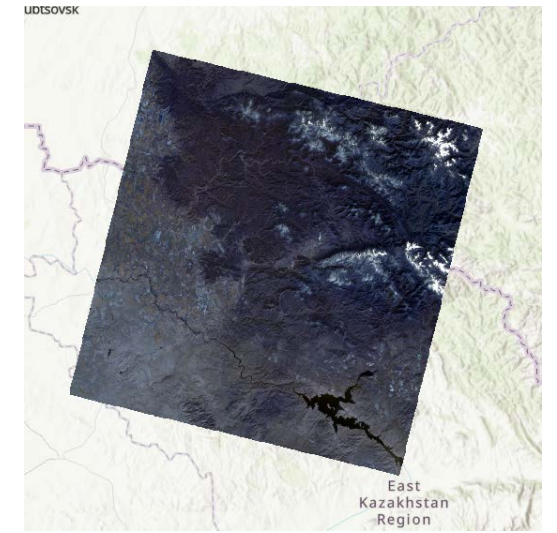
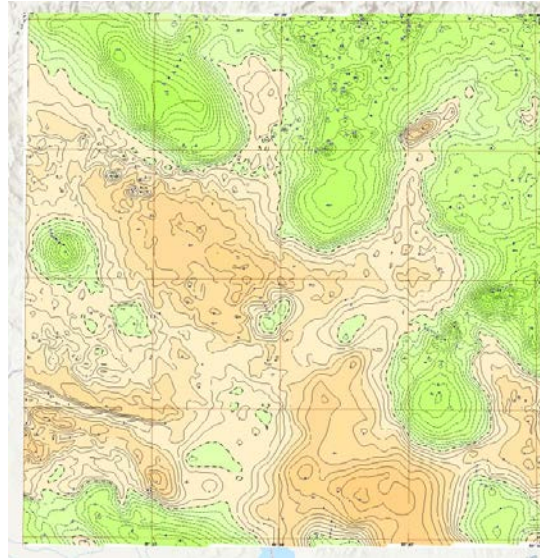
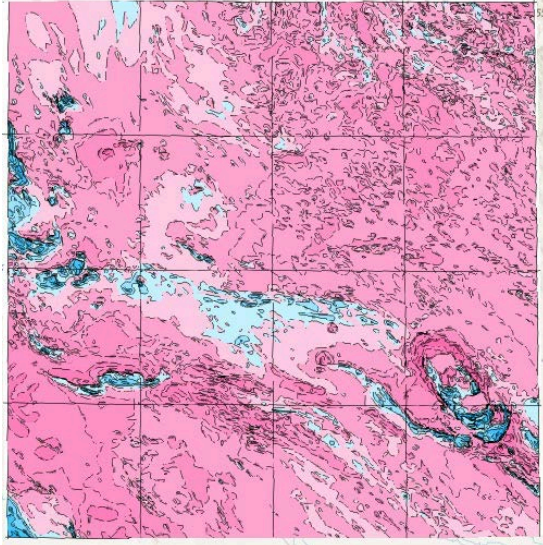
Платформы Python и ArcGIS Pro дают взаимодополняющие возможности: первая — для гибкой аналитики и построения моделей, вторая — для визуализации, пространственного анализа и внедрения моделей в рабочие геопространственные процессы.

Магнитное поле

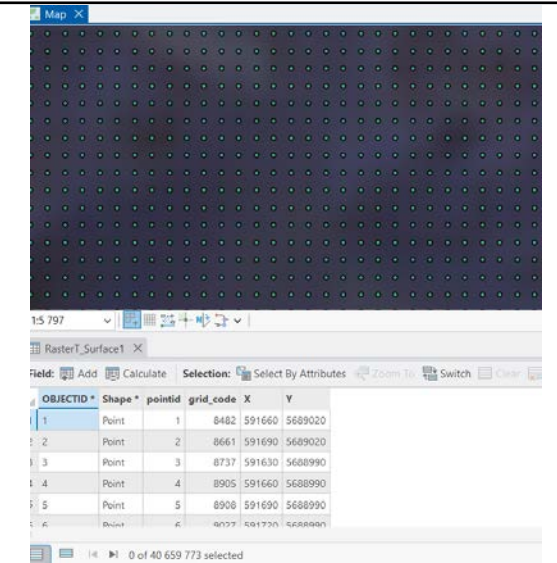
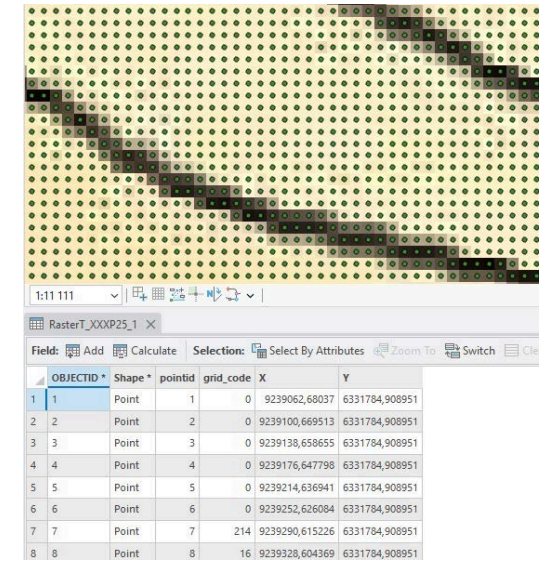
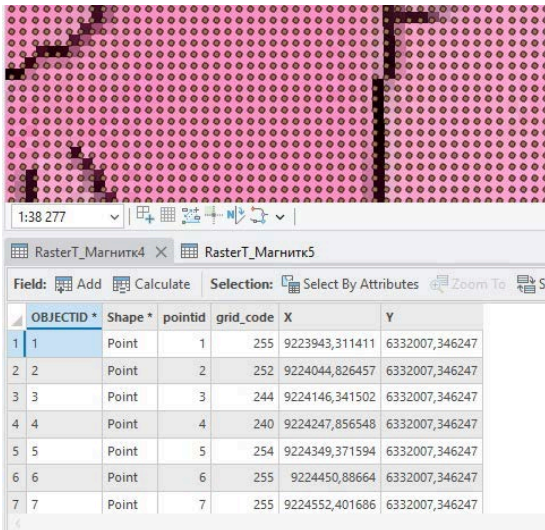
Гравиметрия

ДЗЗ

До



После



Выводы по первому заданию

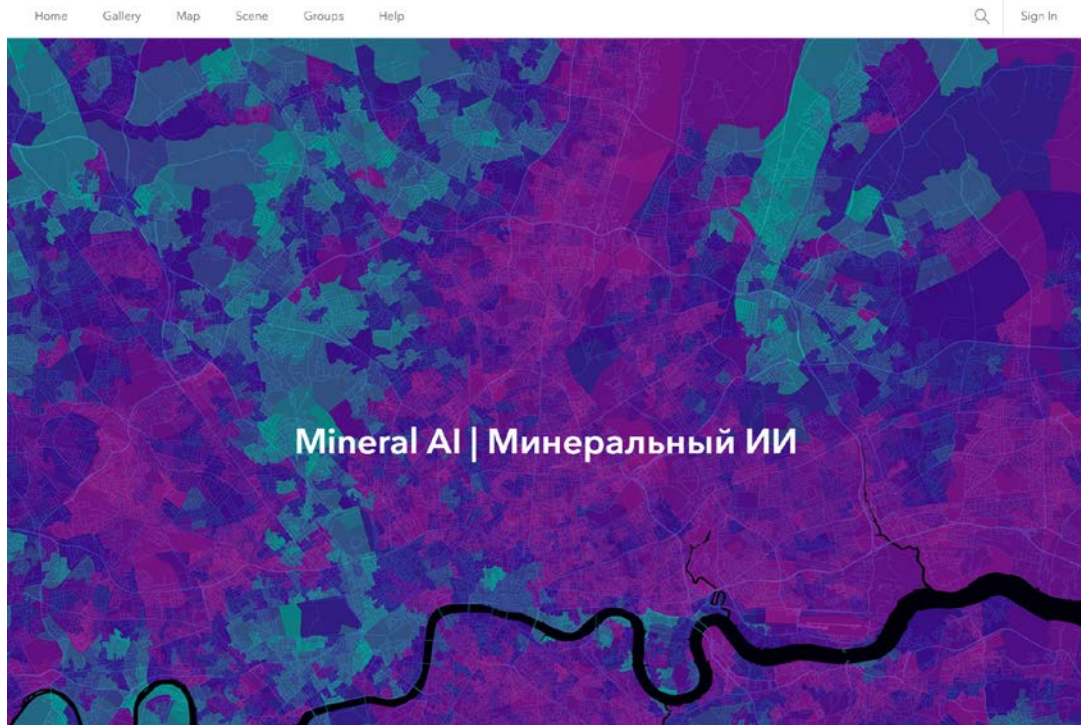
В первом задании была рассмотрена возможность применения методов искусственного интеллекта для автоматизации обработки и анализа геологических данных. Проведённая работа показала высокую эффективность комплексного подхода, сочетающего возможности Python и ArcGIS Pro.

В рамках задания были успешно решены ключевые задачи: автоматическая очистка данных, фильтрация шумов и артефактов, выделение геологической значимой информации, а также повышение точности интерпретации путём интеграции многоканальных источников и калибровки моделей.

Использование Python обеспечило гибкость, модульность и доступ к современным алгоритмам машинного обучения и нейросетям, тогда как ArcGIS Pro предоставил инструменты визуализации и пространственного анализа. Сочетание программного языка и геоинформационной системы позволило создать масштабируемую и воспроизводимую среду для интеллектуальной обработки геоданных.

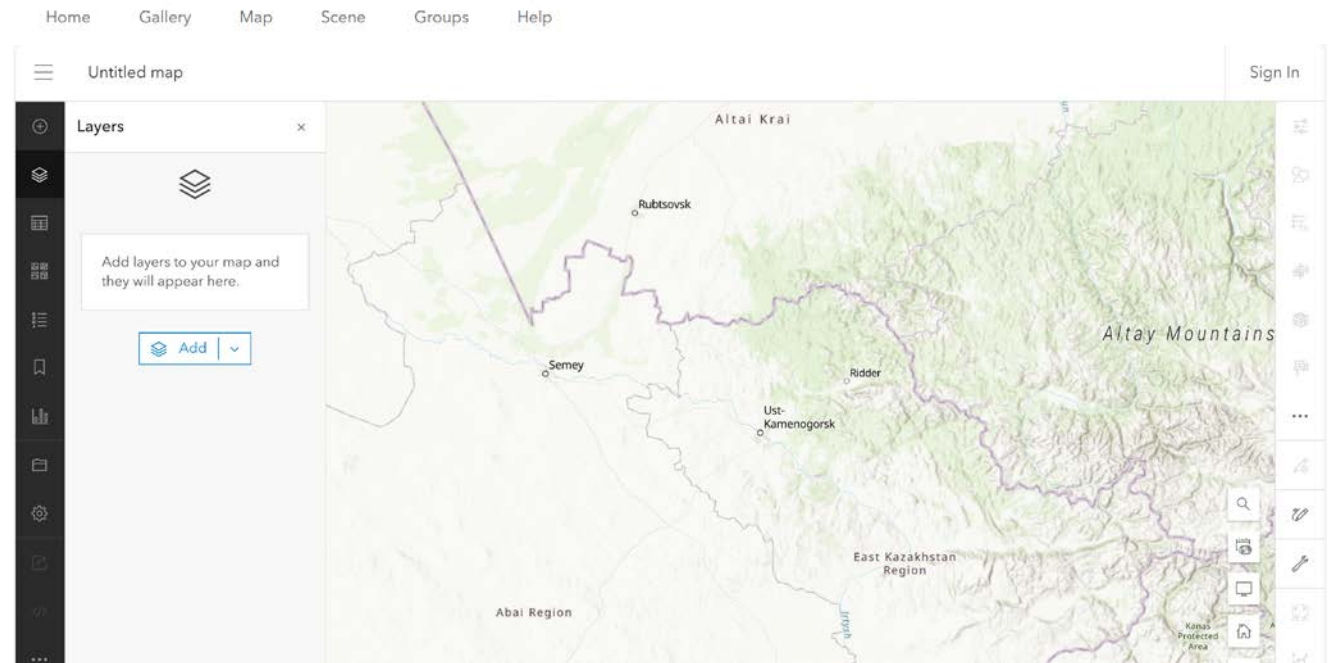
Таким образом, полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для автоматизированного анализа пространственной информации в геологии, геофизике и смежных дисциплинах.

2. Разработка платформы minerals-ai.kz



Серверная версия ArcGIS позволит централизованно обрабатывать пространственные данные, выполнять анализ, интегрировать машинное обучение и предоставлять доступ к геоинформационным сервисам пользователям платформы **minerals-ai.kz**.

На текущем этапе работ была проведена установка и полная конфигурация серверной версии программного комплекса **ArcGIS**. Программное обеспечение развернуто на нашем выделенном сервере, расположенном в Дата-центре ТОО «Академсеть», что обеспечивает доступность и безопасность хранения данных.

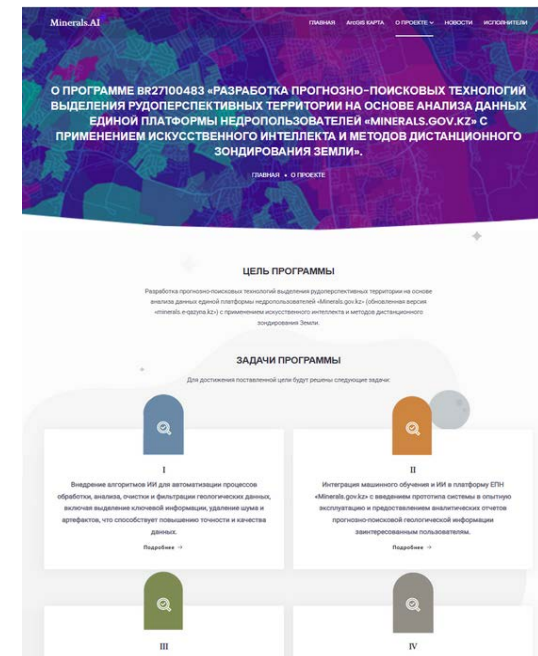
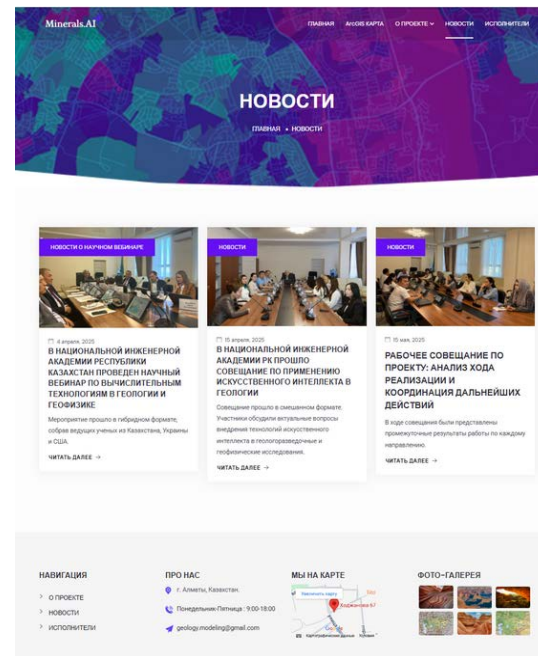
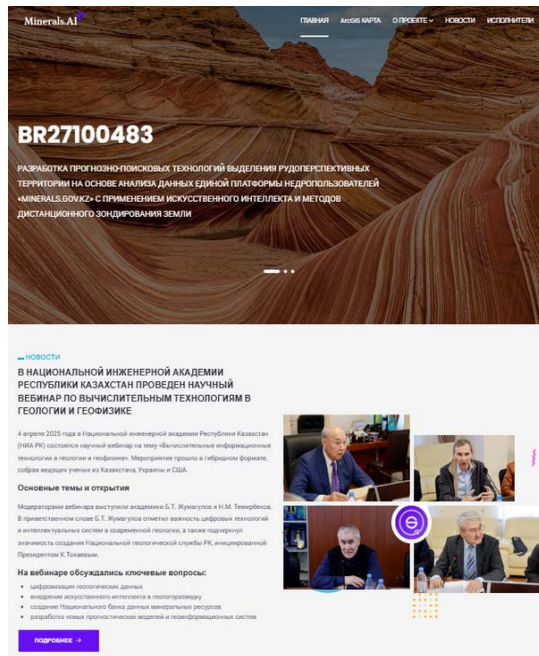


Платформа minerals-ai.kz

Разработанная платформа minerals-ai.kz представляет собой цифровой сервис, ориентированный на анализ геохимических и пространственных данных с целью выделения рудоперспективных участков.

Ключевые компоненты платформы:

- Интерактивная карта с минералогическими слоями
- Информационные модули по проекту, задачам, участникам
- Интеграция с алгоритмами машинного обучения
- Возможность масштабирования и анализа пространственных закономерностей

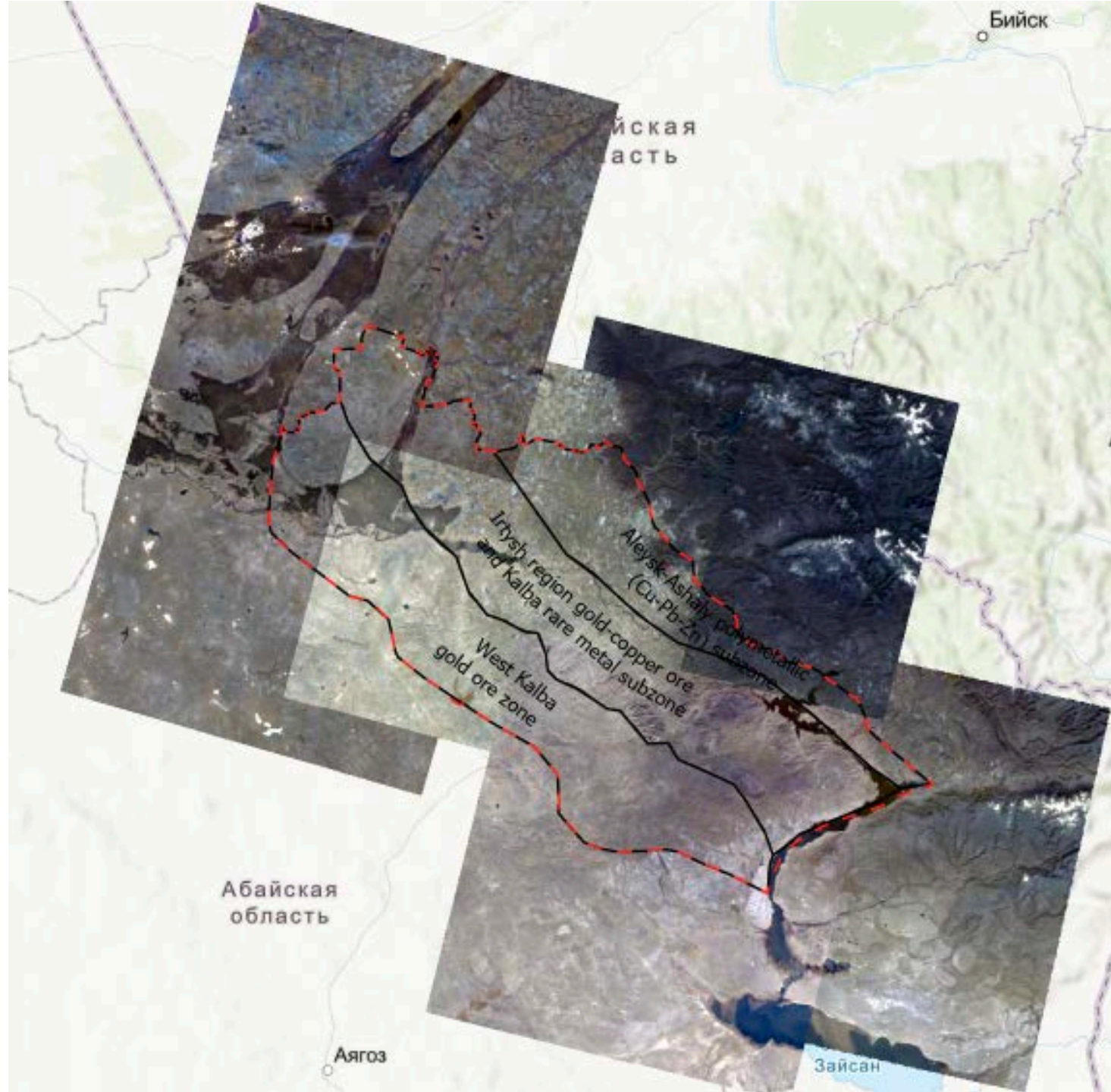


3. Разработка методики картирования индикаторов для поиска рудных месторождений с использованием геофизических и космических данных

Спектрональные космоснимки Landsat 8 по территории исследования

Особенности космоснимков:

- Космоснимки Landsat 8 с портала *EarthExplorer* [URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>], который предоставляет данные из архивов *United States Geological Survey (USGS)*.
- Использовались снимки L2SP, которые корректируются с учетом атмосферных эффектов и, следовательно, наиболее приемлемы для изучения отражательной способности поверхности Земли.
- Выбирались в основном осенние (сентябрьские) космоснимки, чтобы уменьшить влияние растительности на геологические объекты.



1. Для минералов меди:

индексы, усиливающие синий, зеленый и крайний коротковолновой инфракрасный каналы по отношению к красному, ближнему инфракрасному (NIR), рассчитываются по формуле - $(B2+B3+B7)/(B4+B5+B1)$

2. Для железистых минералов:

индексы в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (встроены в ArcGis Pro)

3. Для глинистых минералов:

индексы, использующие отражение в ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах (встроены в ArcGis Pro)

4. Для литиевых минералов:

индексы усиливающие каналы видимого спектра по отношению к ультрафиолетовому, ближнему инфракрасному (NIR) и коротковолновому инфракрасному (SWIR) диапазонам рассчитываются по формуле - $(B2+B3+B4)/(B1+B5+B7)$

5. Для оксидов железа:

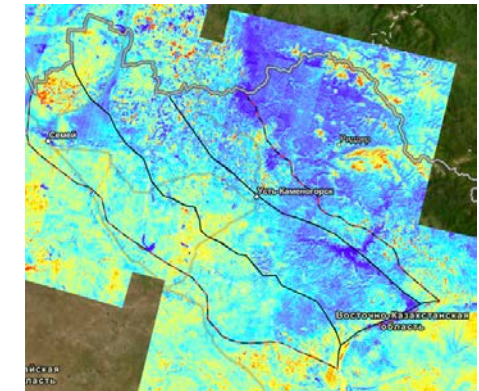
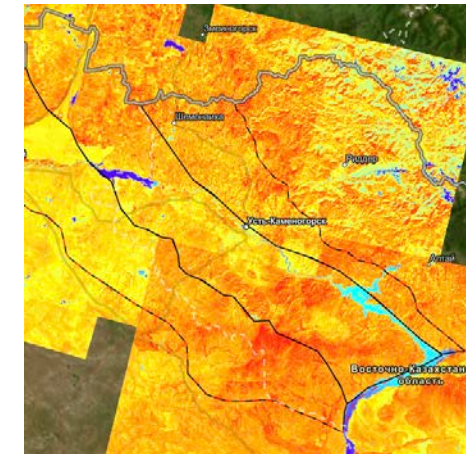
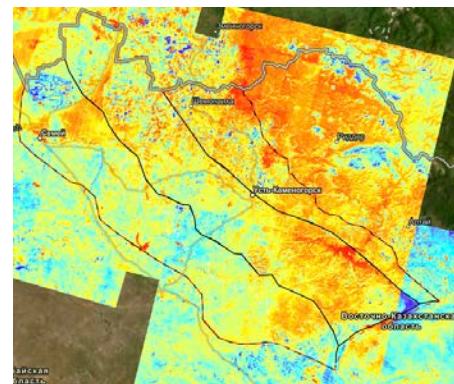
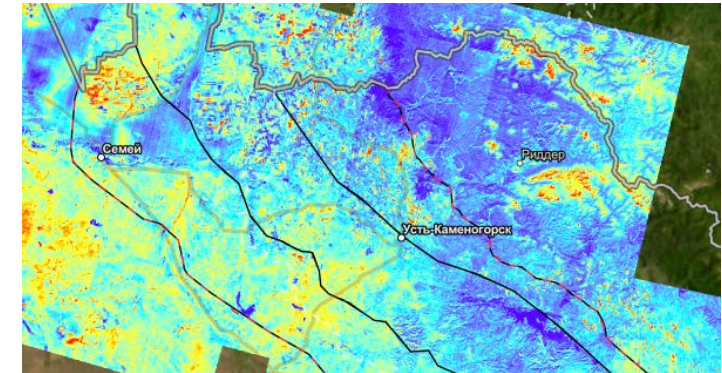
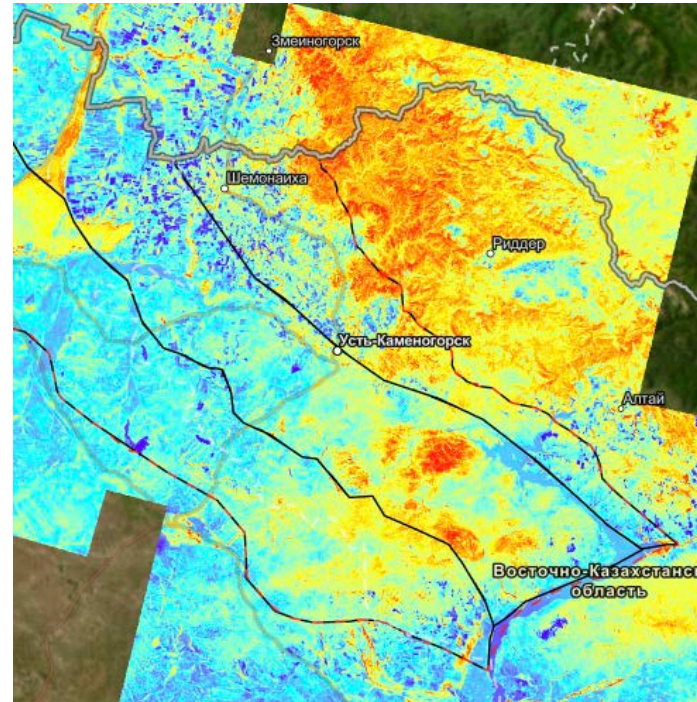
индексы, базирующиеся на соотношении красной и синей длин волн (встроены в ArcGis Pro)

Спектральные диапазоны каналов Operational Land Imager (OLI) Landsat-8

| СПЕКТРАЛЬНЫЙ КАНАЛ | ДЛИНЫ ВОЛН | РАЗРЕШЕНИЕ (НА ОДИН ПИКСЕЛЬ) |
|--|-----------------|------------------------------|
| Канал В1 — побережья и аэрозоли (Coastal / Aerosol, New Deep Blue) | 0,433—0,453 мкм | 30 м |
| Канал В2 — синий (Blue) | 0,450—0,515 мкм | 30 м |
| Канал В3 — зелёный (Green) | 0,525—0,600 мкм | 30 м |
| Канал В4 — красный (Red) | 0,630—0,680 мкм | 30 м |
| Канал В5 — ближний ИК (Near Infrared, NIR) | 0,845—0,885 мкм | 30 м |
| Канал В6 — ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2) | 1,560—1,660 мкм | 30 м |
| Канал В7 — ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3) | 2,100—2,300 мкм | 30 м |
| Канал В8 — панхроматический (Panchromatic, PAN) | 0,500—0,680 мкм | 15 м |
| Канал В9 — перистые облака (Cirrus, SWIR) | 1,360—1,390 мкм | 30 м |

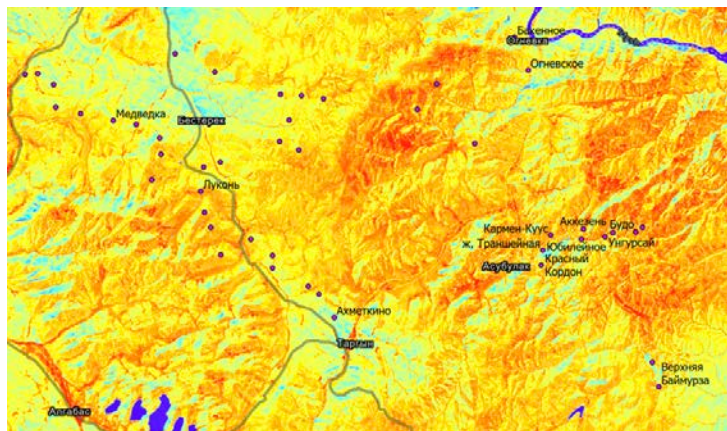
Результаты спектрального анализа
космоснимков Landsat 8 по
территории исследования

- Для минералов меди
- Для железистых минералов
- Для глинистых минералов
- Для литиевых минералов
- Для оксидов железа

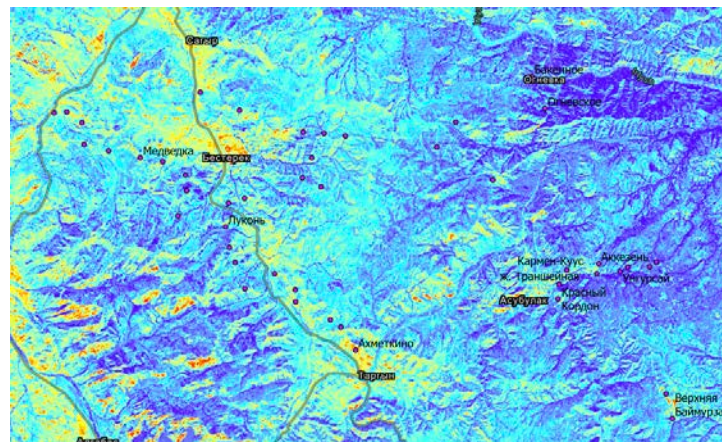


Изображения спектральных индексов, позволяющих выделить и откартировать в Центральной Калбе зоны метасоматитов, благоприятные для локализации редкометального оруденения

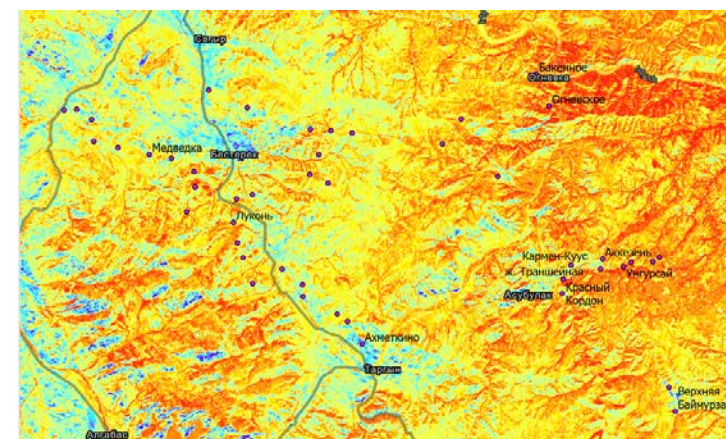
по оксидам железа



по железистым минералам

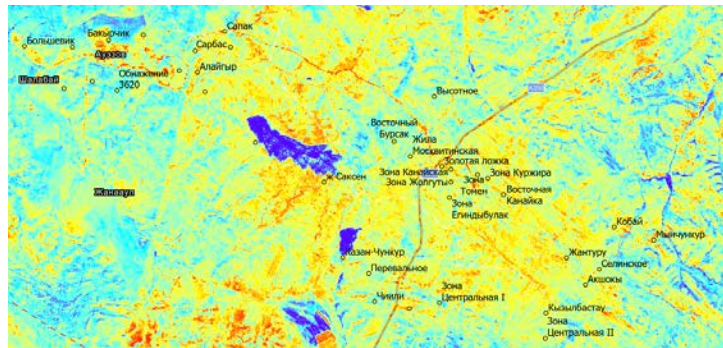


по литиевым минералам

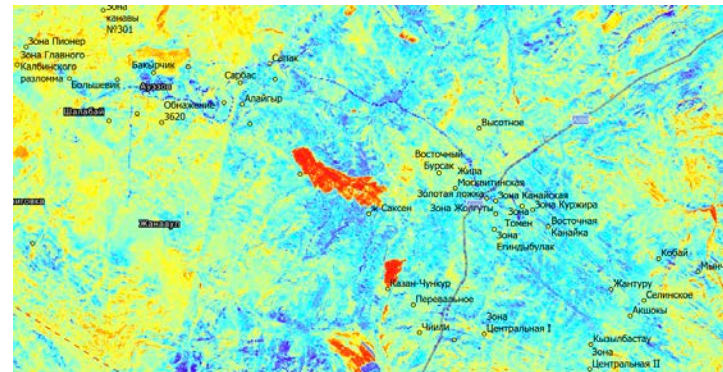


Изображения спектральных индексов, позволяющих выделить и откартировать в Западной Калбе зоны метасоматитов, благоприятные для локализации золоторудного оруденения

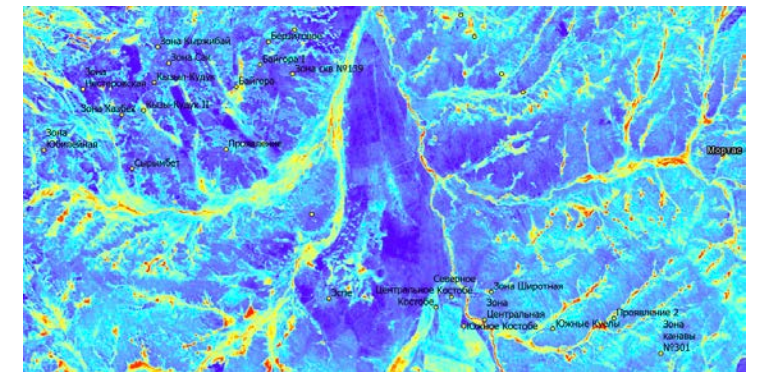
по железистым минералам



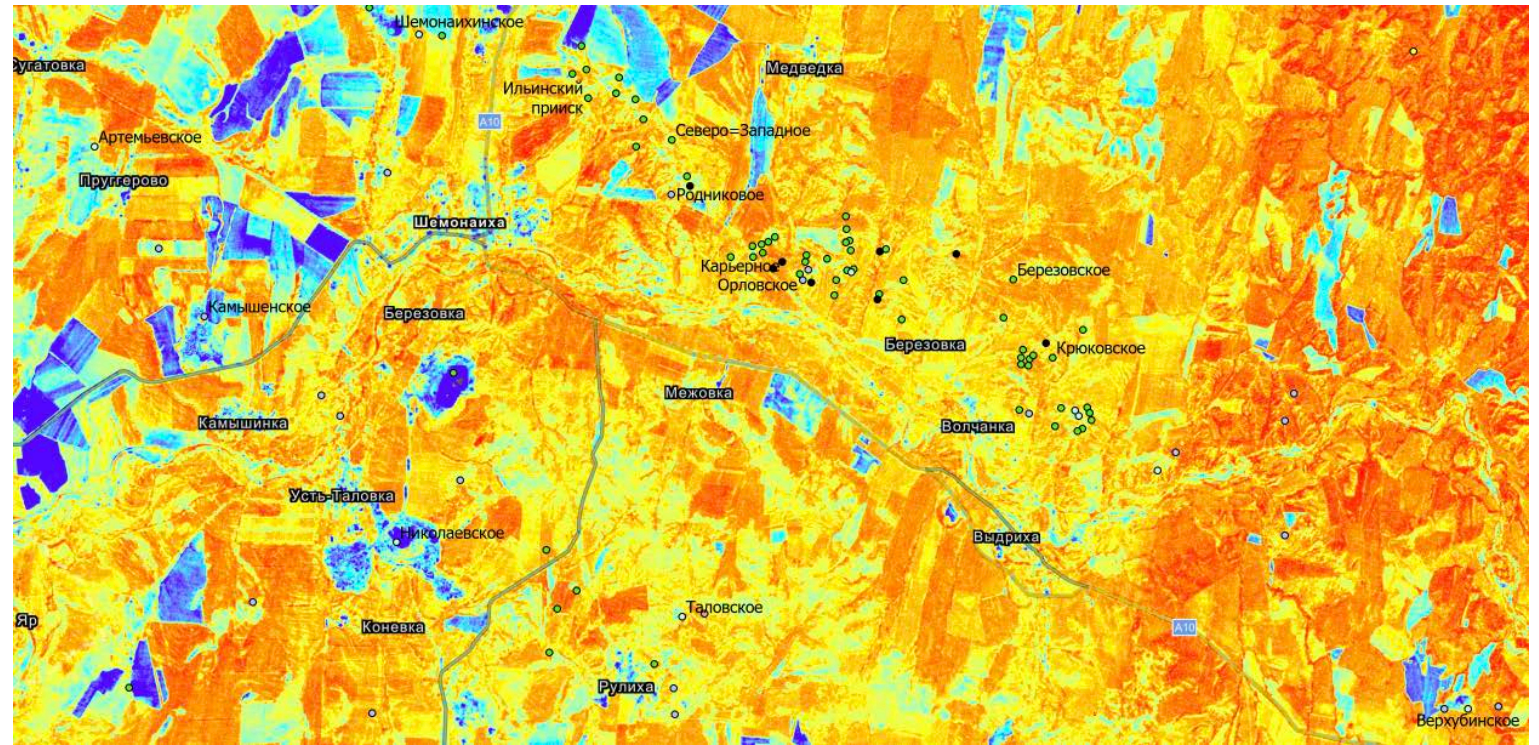
по оксидам железа



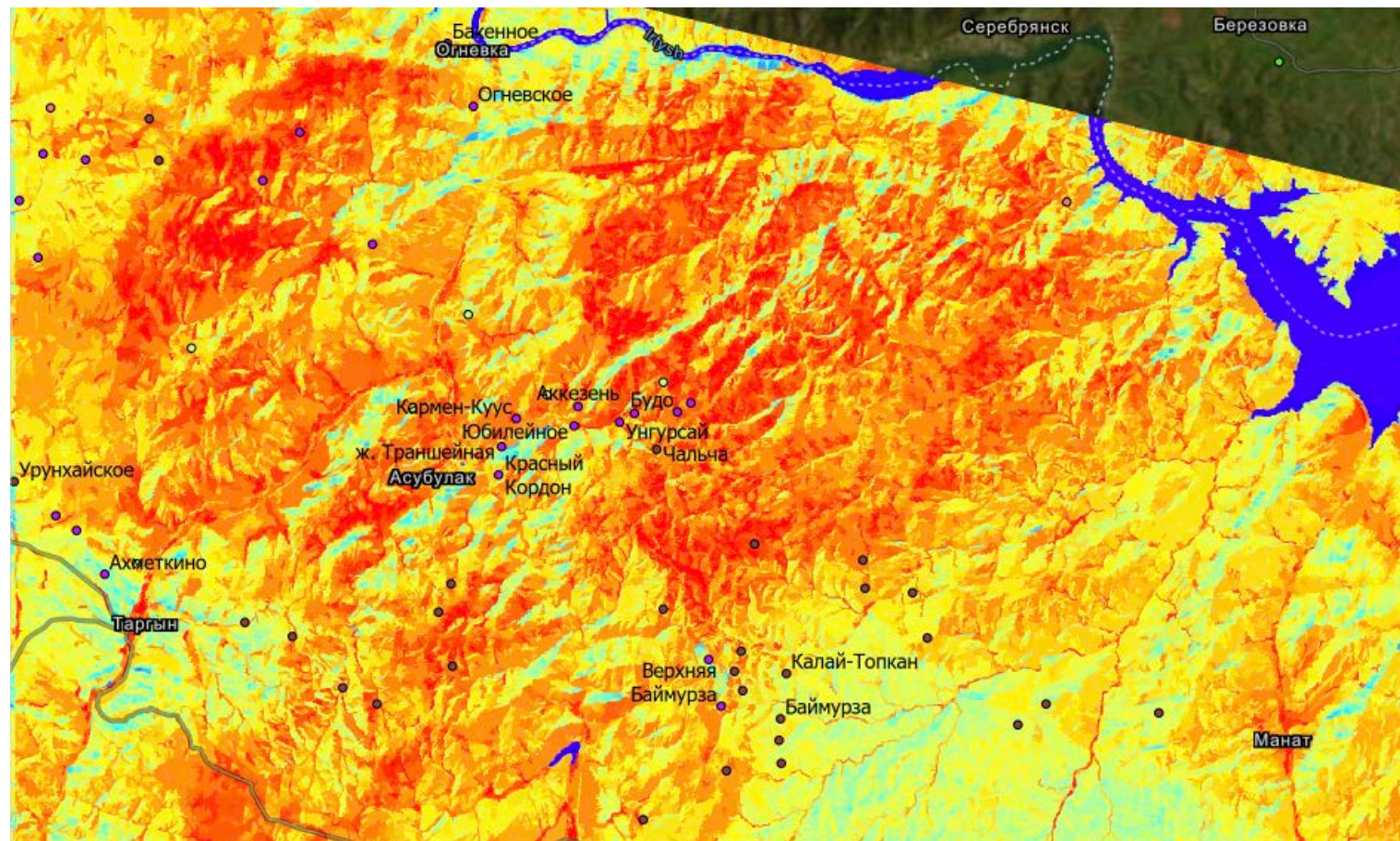
по медным минералам



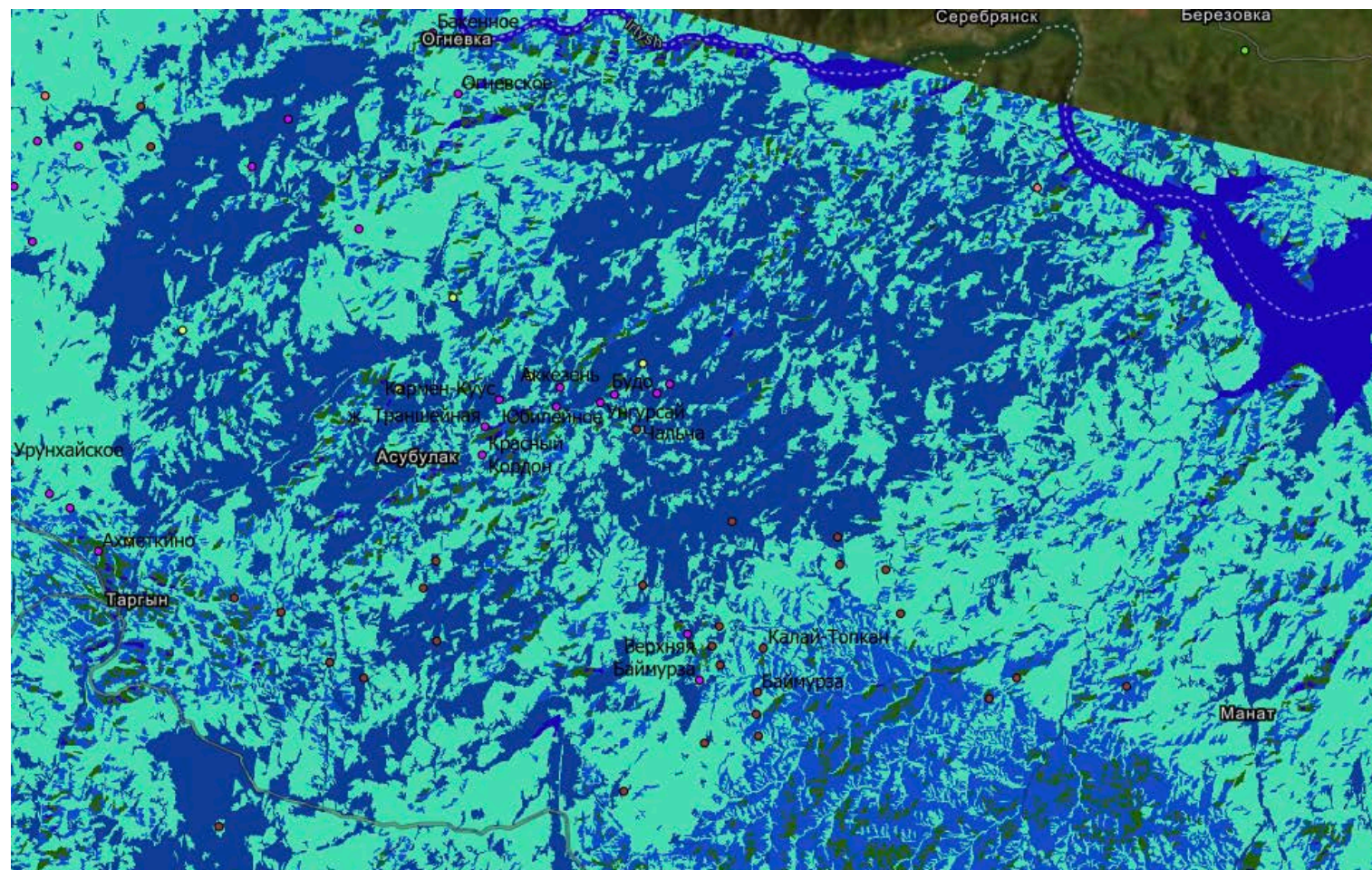
Изображения спектральных индексов, позволяющих выделить и откартировать в Алейско-Ащалинкой подзоне метасоматиты, благоприятные для локализации полиметаллического (Cu-Pb-Zn) оруденения



Пример
сегментированного
изображения части
территории
Центральной Калбы



Пример
классифицированного
изображения части
территории Центральной
Калбы



1.1 Структура таблицы для ГИС по рудным месторождениям

The screenshot shows the ArcGIS Pro interface with the 'Gold deposits' layer selected. The attribute table is displayed, showing the following fields and their properties:

| Видимый | Только чтение | Имя поля | Псевдоним | Тип данных | Разрешить пустые значения (NULL) | Выделить | Числовой формат | Домен | По умолчанию | Длина |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---|------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | OBJECTID | OBJECTID | Object ID | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Shape | SHAPE | Геометрия | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Name | Название месторождения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Number | Реквизиты/индикаторы отчета | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Long_des | Долгота_дес | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Lat_des | Широта_дес | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Absolute_elevation | Абсолютная отметка | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Long_WGS | Долгота (ГМС) WGS | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Lat_WGS | Широта (ГМС) WGS | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scale | Масштаб месторождения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Formation | Формационный тип | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Morphological_type_depsit | Морфологический тип месторождения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Mineragenic_profile | Минерагенический профиль | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Age_mineralization | Возраст оруденения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Absolute_age_mineralization | Абсолютный возраст оруденения (млн лет) | Long | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ave_grade_1 | Среднее содержание 1 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ave_grade_2 | Среднее содержание 2 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ave_grade_3 | Среднее содержание 3 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recourse_1 | Ресурсы/Запасы 1 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recourse_2 | Ресурсы/Запасы 2 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recourse_3 | Ресурсы/Запасы 3 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Mineral_composition | Минеральный состав руд | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Structure_ore | Структуры и текстуры руд | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Morphology_mineralization | Морфология оруденения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |

Выбрано 2 из 37

1.2 Структура таблицы для ГИС по рудным месторождениям

The screenshot displays the ArcGIS Pro interface with the 'Gold deposits' layer selected. The 'Field Properties' window is open, showing a table of fields. The 'Recourse_2' field is highlighted in blue. The table columns include: Видимый (Visible), Только чтение (Read-only), Имя поля (Field Name), Псевдоним (Alias), Тип данных (Data Type), Разрешить пустые значения (NULL) (Allow Null Values), Выделить (Highlight), Числовой формат (Number Format), Домен (Domain), По умолчанию (Default), and Длина (Length).

| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Имя поля | Псевдоним | Тип данных | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой формат | Домен | По умолчанию | Длина |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ave_grade_1 | Среднее содержание 1 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ave_grade_2 | Среднее содержание 2 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Ave_grade_3 | Среднее содержание 3 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recourse_1 | Ресурсы/Запасы 1 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recourse_2 | Ресурсы/Запасы 2 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Recourse_3 | Ресурсы/Запасы 3 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Mineral_composition | Минеральный состав руд | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Structure_ore | Структуры и текстуры руд | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Morphology_mineralization | Морфология оруденения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Enclosing_rocks | Вмещающие породы | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Metasomatic_changes | Метасоматические изменения вмещающих пород | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Structure_deposit | Структура месторождения | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Search_criteria | Поисковые критерии | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Geochemical_corelation | Геохимическая корреляция с основным рудным элементом | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Geophysical_corelation | Геофизическая корреляция с основным рудным элементом | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Map | Геологическая карта месторождения | Растр | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scheme_1 | Геологический разрез по месторождению | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scheme_2 | План опробования поверхностных горных выработок | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scheme_3 | План опробования подземных горных выработок | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scheme_4 | План изолиний содержаний 1 компонента по основному ру | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scheme_5 | План изолиний содержаний 2 компонента по основному ру | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Scheme_6 | План изолиний содержаний 3 компонента по основному ру | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |

Щелкните здесь, чтобы добавить новое поле.

Активация Windows
Чтобы активировать Windows, перейдите в раздел
"Параметры"

Выбрано 2 из 37

Структура таблицы по геологоразведочным данным рудных месторождений

ArcGIS Pro File Edit View Window

Al_Geology

Поиск команд (Alt+Q)

Oleg - Oleg Gavrilenko

Проект Поля Вставка Анализ Вид Общий доступ Справка Слой объектов Надписи Данные

Карта Компонетка1 Компонетка3

Геолого-разведочные ... месторождения Поля: Геолого-развед... месторождениям

Текущий слой Геолого-разведочные данные п

| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Имя поля | Псевдоним | Тип данных | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой формат | Домен | По умолчанию | Длина |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---|------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------|--------------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | OBJECTID | OBJECTID | Object ID | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Shape | Shape | Геометрия | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Deposit | Месторождение | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Test_point | Точка опробования | Текст | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | 255 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Long_des | Долгота (десятичная) | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Lat_des | Широта (десятичная) | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Elevation | Абсолютная отметка | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Value_1 | Содержание 1 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Value_2 | Содержание 2 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Value_3 | Содержание 3 компонента | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | API | Результаты гамма-каратожа (мкР/ч) | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Resistive_index | Коэффициент сопротивления | Float | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Числовой | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Photo | Фото керна скважин или обнажения горной выработки | Blob | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | |

Щелкните здесь, чтобы добавить новое поле.

Активация Windows
Чтобы активировать Windows, перейдите в раздел "Параметры".

Выбрано 0 из 13

24°C Sunny

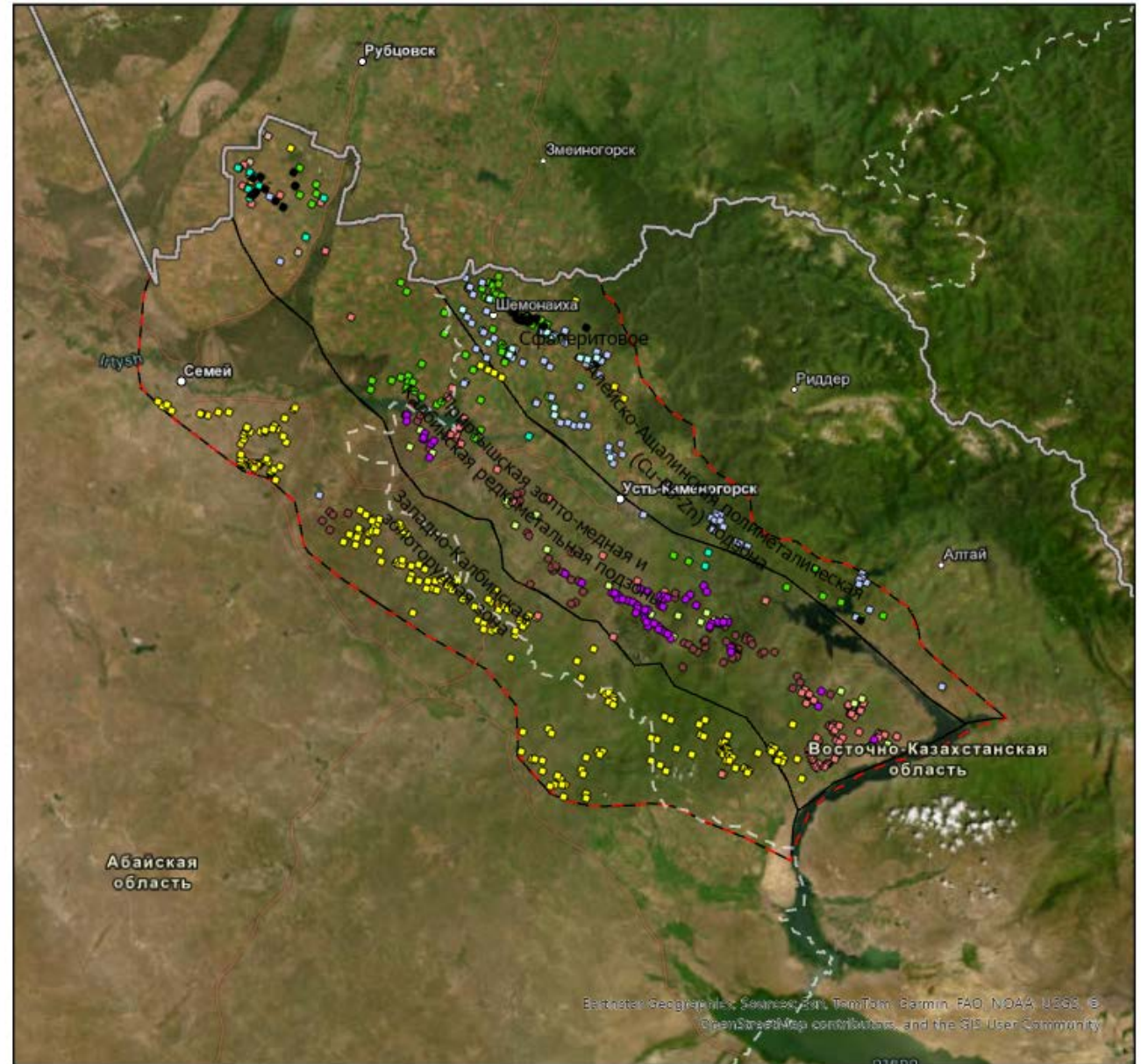
Поиск

14:13 06.08.2025

Визуализация на платформе ArcGis Pro металлогенических типов рудных месторождений

Условные обозначения

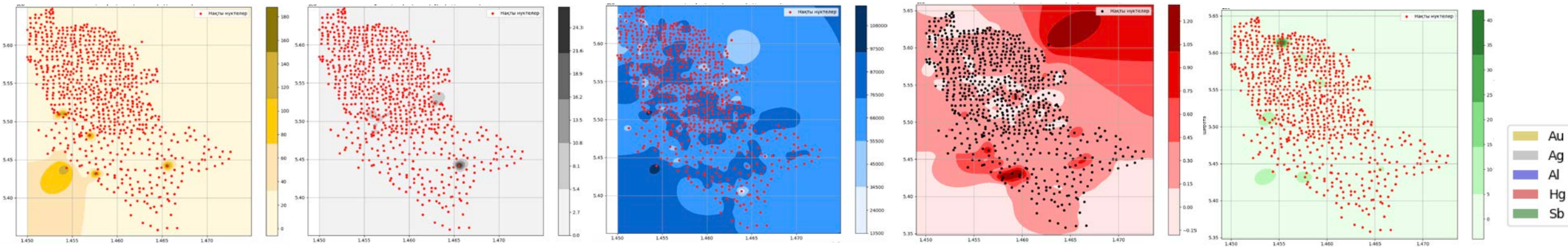
- | | | |
|---------------------------------|--|---------------------------|
| ● Месторождения железа | ● Месторождения вольфрама | ● Свинцовые месторождения |
| ● Месторождения Ni и Co | ● Месторождения олова | ● Месторождения меди |
| ● Редкометалльные месторождения | ● Полиметаллические месторождения (Cu-Pb-Zn) | ● Месторождения золота |
| ● Бериллиевые месторождения | ● Цинковые месторождения | — Территория исследований |
| | | — Металлогенические зоны |



Модель интерполяции RBF

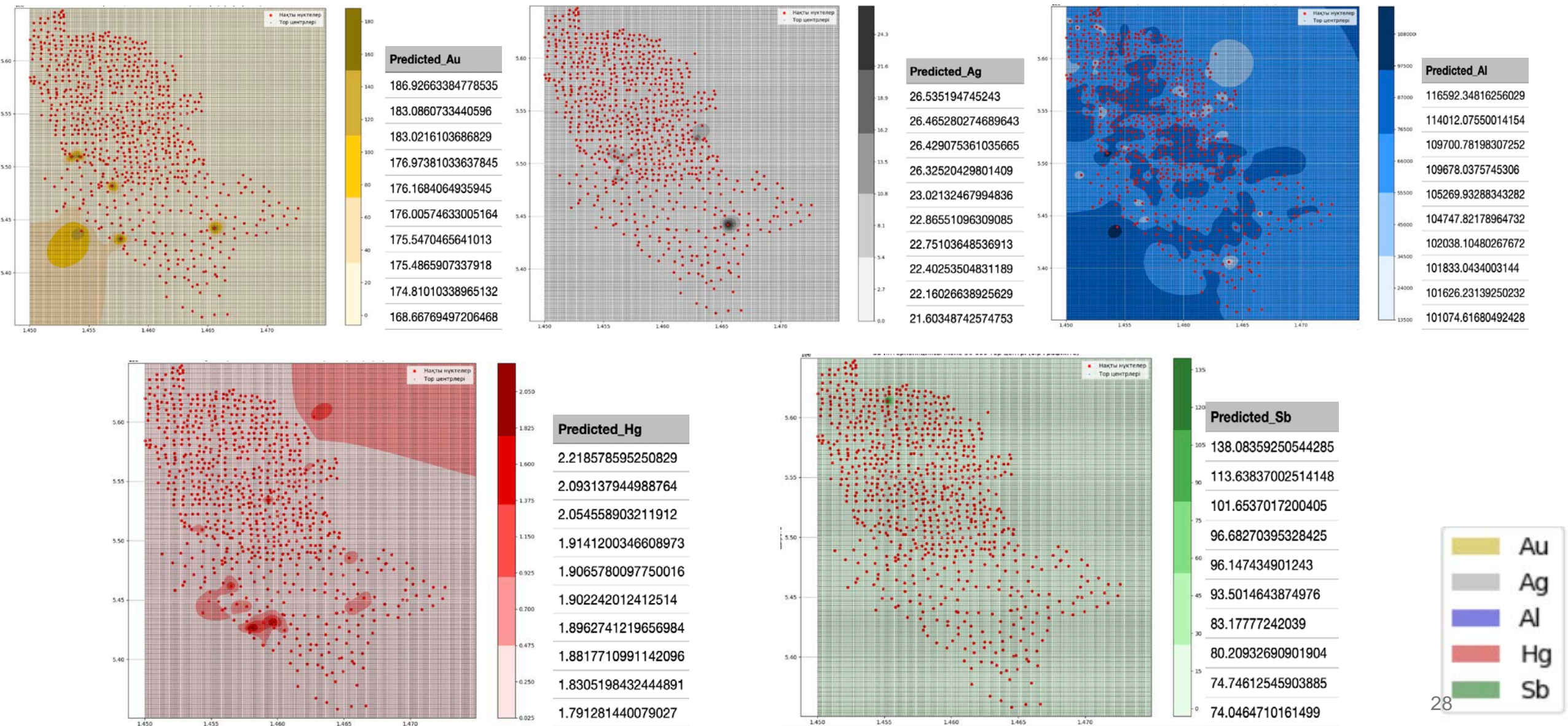
Модель интерполяции RBF (Radial Basis Function) — метод, предназначенный для плавного и точного прогнозирования значений между пространственно распределёнными данными. Модель строит непрерывную поверхность по известным точкам, охватывая всю исследуемую область. В геологии данный метод эффективен для выявления вероятных зон залегания месторождений, геохимических аномалий и областей изменения концентраций минералов. Интерполяция RBF обеспечивает высокую точность даже при разреженном расположении данных, что делает её ценным инструментом для поисково-разведочных и прогностических работ.

В данном исследовании метод RBF был применён к элементам Au, Ag, Al, Hg и Sb, поскольку они являются ключевыми индикаторами при оценке геохимической структуры региона и определении перспективности месторождений. Au — прямой показатель золотого оруденения, Ag — благородный металл, сопутствующий золоту, Al — важный элемент, характеризующий литологический состав и процессы изменения пород, а Hg и Sb — маркеры гидротермальных систем, связанных с золотом.

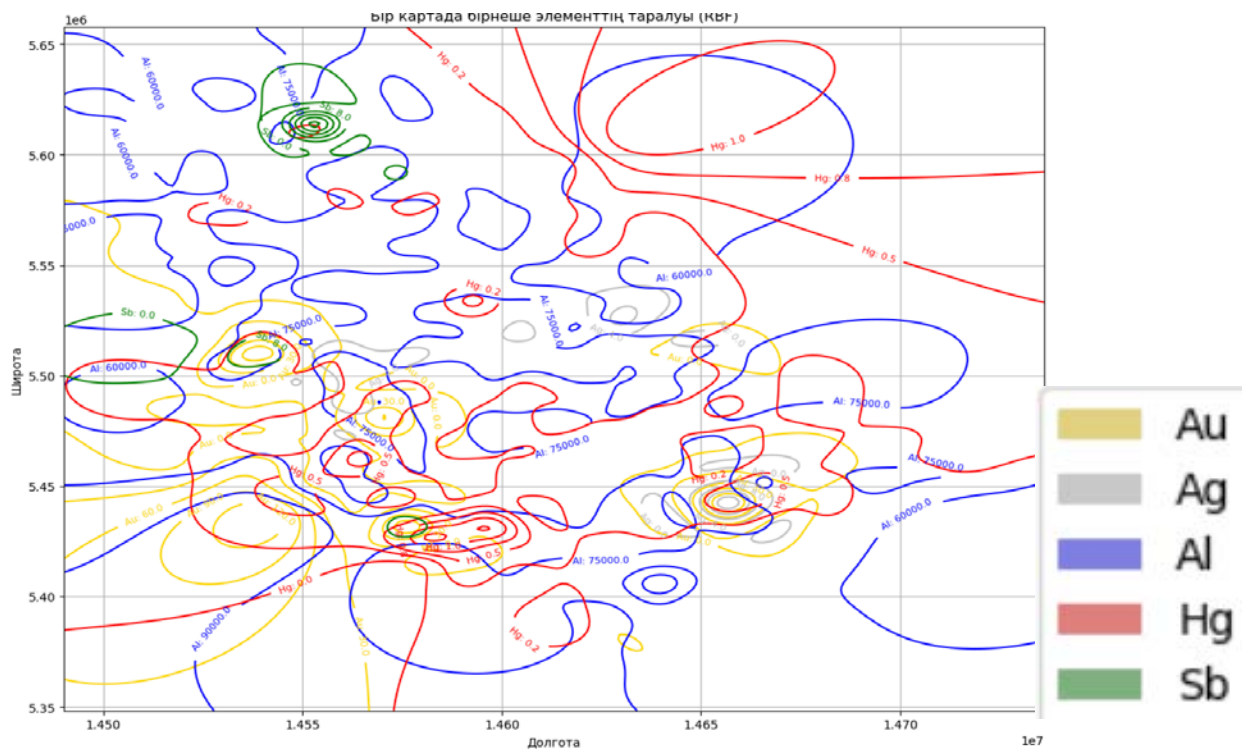


Для каждого элемента проведена отдельная интерполяция методом RBF, результаты визуализированы в виде 2D-графиков пространственного распределения концентраций.

В рамках проведённого исследования интерполяция была выполнена на 50 000 координатных точек с использованием метода RBF (Radial Basis Function). На основе полученных результатов были выделены и представлены 10 точек с наивысшими прогнозируемыми значениями.



Выводы



На следующем этапе все полученные результаты были визуализированы на одном графике, что позволило наглядно отразить пространственное распределение прогнозируемых значений.

Золото (Au) – В результате интерполяции было выявлено несколько зон с высокой концентрацией, которые могут рассматриваться как потенциальные месторождения. Метод RBF позволил точно отобразить данные скопления в конкретных координатах.

Серебро (Ag) – Обнаружены зоны, перекрывающиеся с Au. Это указывает на возможное наличие полиметаллических месторождений, особенно в случаях, когда скопления двух элементов находятся в непосредственной близости друг от друга. Ртуть (Hg) и сурьма (Sb) – В отдельных районах эти элементы перекрываются с Ag и Au, что свидетельствует о возможном существовании гидротермальных систем или глубоких магматических процессов. Их аномальные скопления представляют особый интерес для последующих исследований. Алюминий (Al) – Этот элемент распределён относительно равномерно на большой территории, в основном отражая геологический фон. Его концентрация может использоваться как нормальное значение для выделения других аномальных элементов.

Объединённый 3D-график – Зоны перекрытия нескольких металлов отображены чётко. Такой подход позволил выявить комплексные геохимические аномалии, что даёт возможность более точно определять перспективные районы для проведения поисковых работ.

4. Разработка алгоритмов математическое моделирование для выявления структур, литологических неоднородностей и метасоматических изменений с применением методов машинного обучения

Задача магнитотеллурического зондирования

Рассмотрим двумерную обратную задачу МТЗ при Е-поляризации. $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$ $\vec{H} = (0, H_y, H_z)$

Электрическое поле $E_x(y, z)$ удовлетворяет уравнению Гельмгольца*:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + i\omega\mu \cdot \sigma(y, z) \cdot E_x = 0 \quad -l < y < l, 0 < z < h \quad (1)$$

$$E_x(-l, z) = E_x(l, z) = E_x^N(z) \quad 0 \leq z \leq h \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_x(y, 0)}{\partial z} + ik_0 E_x(y, 0) = 2ik_0 \tilde{E}_0 \quad -l < y < l \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_x(y, h)}{\partial z} - ik_h E_x(y, h) = 0 \quad -l < y < l \quad (4)$$

где

$k_0 = \sqrt{i\omega\mu\sigma_0}$ – волновое число в воздухе, $k_h = \sqrt{i\omega\mu\sigma_h}$ – волновое число в глубине модели, \tilde{E}_0 – амплитуда возбуждающего внешнего поля.

Нормальное поле $E_x^N(z)$ – граничное условие по z .

$$\frac{d^2 E_x^N}{dz^2} + k^2(z) E_x^N = 0, \quad z \in [0, h] \quad (5)$$

$$\frac{dE_x^N}{dz} + ik_0 E_x^N = 2ik_0 \tilde{E}_0 \text{ при } z = 0, k_0 = \sqrt{i\omega\mu\sigma_0} \quad (6)$$

$$\frac{dE_x^N}{dz} - ik_h E_x^N = 0 \text{ при } z = H, k_h = \sqrt{i\omega\mu\sigma_h} \quad (7)$$

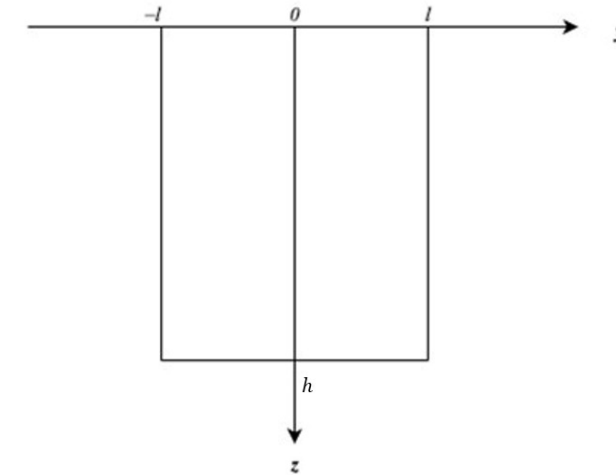


Рисунок 1. Область уравнения Гельмгольца

Прямая и обратная задача МТЗ

Прямая задача магнитотеллурического зондирования заключается в определении на поверхности Земли ($z = 0$) импеданса $Z_0(y, \omega)$. После решения уравнения (1) с граничными условиями (2)–(3) импеданс вычисляется по формуле:

$$Z_0(y, \omega) = \frac{E_x(y, 0)}{H_y(y, 0)} = i\omega\mu \cdot \frac{E_x(y, 0)}{\frac{\partial E_x}{\partial z}(y, 0)}.$$

Обратная задача магнитотеллурического зондирования заключается в восстановлении распределения электропроводности $\sigma(y, z)$ по известному комплексному импедансу $Z_0(y, \omega)$.

$$J(\sigma) = \sum_{\omega=\omega_0}^{\omega_N} \int_{-l}^l (Z_0(y, \omega) \cdot u_z(y, 0; \sigma) - i\omega\mu \cdot u(y, 0; \sigma))^2 dy$$

Для численного решения обратной задачи она формулируется как задача оптимизации, в которой минимизируется специально заданный целевой функционал. Эффективность и сходимость решения при этом существенно зависят от выбранного метода оптимизации. В настоящем исследовании применяется метод Нестерова, зарекомендовавший себя как один из наиболее быстрых и устойчивых градиентных методов. Этот подход обладает высоким порядком сходимости и обеспечивает ускоренную сходимость по сравнению с классическим градиентным спуском, что особенно важно при решении вычислительно затратных задач, возникающих в магнитотеллурических инверсиях.

Алгоритм обратной задачи метод Нестерева

Для осуществления метода Нестерева задаем следующие параметры: $\lambda_0 = 1$, $\alpha_0 = 1/L$, где L – константа Липшица градиента.

1. Выбираем начальное приближение q_0 и присваиваем $p_0 = q_0$;
2. Численно решаем прямую задачу для p_0 ;
3. Вычисляем значение функционала $J(p_0)$;
4. Если значение целевого функционала не достаточно мало, тогда решаем сопряженную задачу;
5. Вычисляем градиент функционала $J'p_0$;
6. Вычисляем приближение $q_1 = p_0 - \alpha_0 J'p_0$;
7. Предположим, что q_n и q_{n-1} известно, тогда вычисляем параметры

$$\lambda_n = \frac{\left(1 + \sqrt{1 + 4\lambda_{n-1}^2}\right)}{2}, \quad \gamma_{n-1} = \frac{(1 - \lambda_{n-1})}{\lambda_n}$$

8. Вычисляем $p_n = (1 - \gamma_{n-1})q_n + \gamma_{n-1}q_{n-1}$;
9. Численно решаем прямую задачу для p_n ;
10. Вычисляем значение функционала $J(p_n)$;
11. Если значение целевого функционала не достаточно мало, тогда решаем сопряженную задачу;
12. Вычисляем градиент функционала $J'p_n$;
13. Вычисляем следующее приближение $q_{n+1} = p_n - \alpha_n J'p_n$ и переходим к пункту 7;

Сравнительный анализ вейвлет-базисов для решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода

В геофизике определение распределения аномальных масс сводится к решению интегральных уравнений Фредгольма первого рода с неизвестной функцией $y(s)$.

Рассмотрим интегральное уравнение Фредгольма*:

$$\int_a^b K(x, s)y(s)ds = f(x), \quad x \in [a, b],$$

где

$y(s)$ — неизвестная функция,

$K(x, s)$ — ядро,

$f(x)$ — известная функция.

Ищем решение в подпространстве $X_n \subset X$, где $X = L^2[a, b]$.

Приближаем решение $y(s)$ с помощью базисных функций:

$$y_n(s) = \sum_{j=1}^n c_j b_j(s),$$

где $b_j(s)$ — базис в виде вейвлетов, а c_j — неизвестные коэффициенты.

*Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. – 2004. (<https://samarskii.ru/books/book2009.pdf>)

Выводы

Применяется метод Бубнова–Галёркина, при котором в качестве базисных функций используются вейвлеты различных типов: Альперт, Чебышев, Эрмит, Лагерр, Лежандр, CAS и полиномиальный базис. При $k = 2, M = 2$ получены высокие показатели точности. При увеличении параметра M в целом наблюдается снижение погрешностей, при этом для некоторых типов базисных функций улучшение проявляется более заметно. Наименьшие значения погрешности на обоих уровнях параметров показали глобальные ортогональные системы Чебышев, Эрмит и полиномиальный базис в виде степенной функции, где ошибки достигали порядка $10^{-10}, 10^{-12}$. Для сравнения, наибольшие погрешности наблюдались у CAS-вейвлетов, составляя порядка 10^{-1} , что связано с их локализованной и колебательной структурой.

Вычислительный алгоритм продолжения потенциальных полей в сторону гравитирующих масс

Гравитационный потенциал и поле приближается через потенциал простого поля на некоторой поверхности γ , заданной ниже поверхности наблюдения Γ (рисунок 1)*:

$$u(x) = \int_{\gamma} \mu(y)K(x, y)ds(y), x \in \Gamma$$

с ядром $K(x, y) = G \frac{1}{|x-y|}$, $|x|^2 = \sum_{i=1}^3 x_i^2$, G – универсальная гравитационная постоянная.

Интегральное уравнение при известных наблюдениях

$$\int_{\gamma} \mu(y)\tilde{K}(x, y)dy = g(x), x \in \Gamma$$

$\tilde{K}(x, \cdot) = \frac{\partial K}{\partial l}(x, \cdot)$ – дифференцированное ядро, $g(x) = \frac{\partial u}{\partial l}(x)$ – производная потенциала по вертикали.

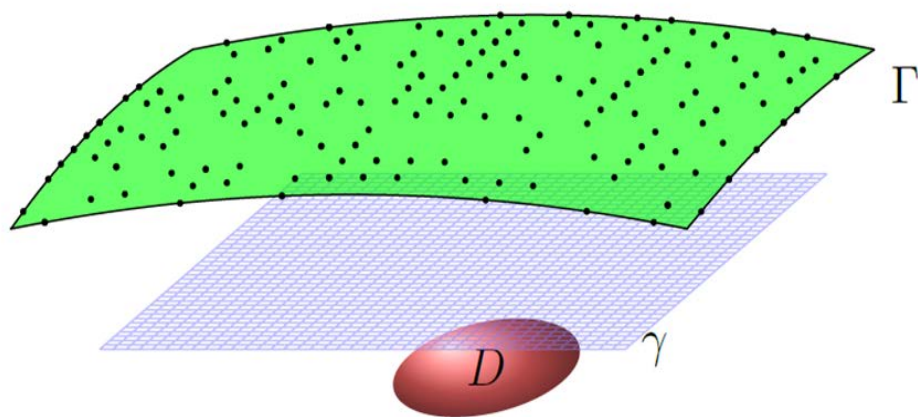


Рисунок 1: D - аномальное геоплотностное тело, Γ – поверхность наблюдения, γ – поверхность продолжения.

Постановка задачи продолжения: необходимо найти функцию $\mu(x)$, приближенно удовлетворяющую интегральному уравнению:

$$\int_{\gamma} \mu(y) \tilde{K}(x, y) ds(y) = g(x), \quad x \in \Gamma.$$

При условии неотрицательности плотности $\mu(x)$:

$$\mu(x) \geq 0, \quad x \in \gamma.$$

Ограничение класса допустимых решений неотрицательными значениями обеспечивается априорной информации о положительности плотности аномалий. Данное свойство играет ключевую роль в разработке вычислительного алгоритма для устойчивого решения задачи. Вычислительный алгоритм базируется на решении СЛАУ, полученной приближением интегрального уравнения квадратурной формулы прямоугольников, в классе неотрицательных решений методом наименьших квадратов NNLS. Примеры расчетов на модельных задачах приведены на рисунке 2.

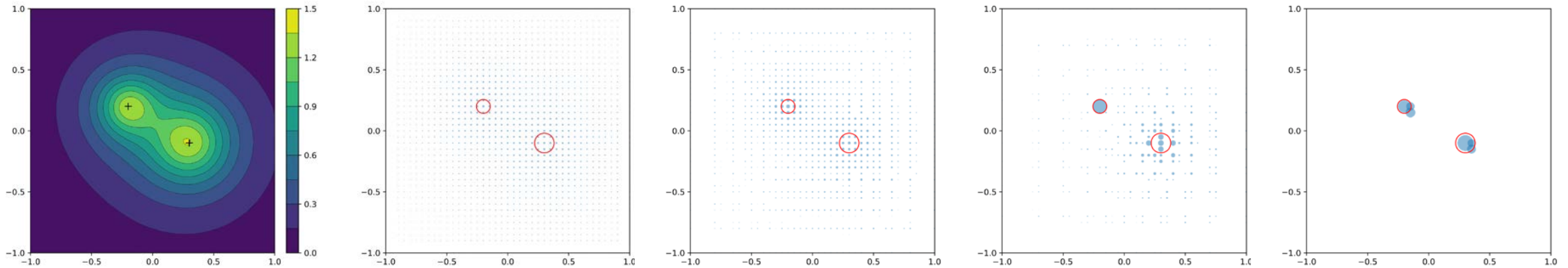


Рисунок 2: Гравитационное поле $g(x)$, результаты решения $\mu(x)$ на высотах $h = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$. Точные массы источников отображены красной окружностью.

Вычисляется зависимость невязки $\chi(h) = \|A_h \varphi(h) - f\|$ от глубины продолжения при различных глубинах, где $\varphi(h)$ - приближенное решение задачи продолжения на глубину h (рисунок 3). Точка локального минимума, где происходит резкое изменение, совпадает с глубиной наиболее близко расположенного источника.

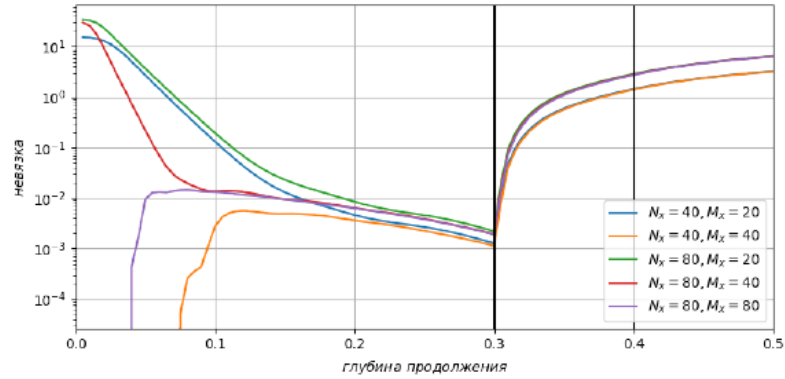


Рисунок 3: Невязка $\chi(h)$ на различных глубинах продолжения.

Для моделирования погрешности в задании входных данных добавляется шум с относительным уровнем δ . Оценивается оптимальная глубина залегания по невязке перебором по глубине, в которой находится приближенное решение задачи (рисунок 4).

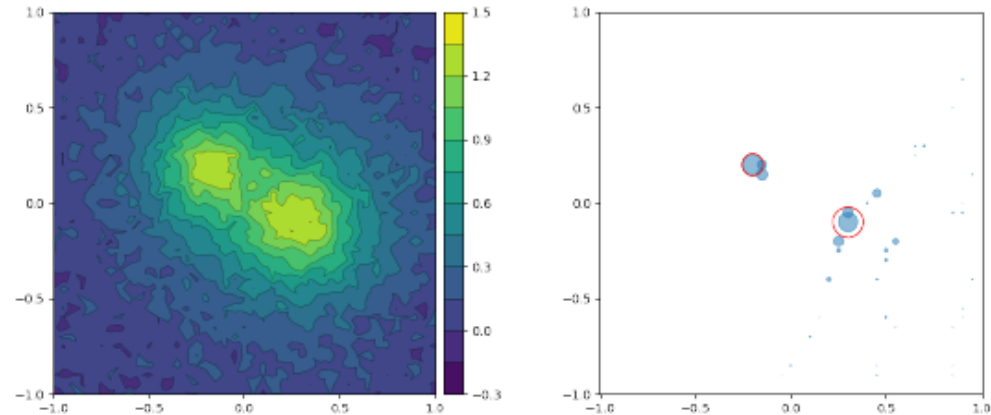
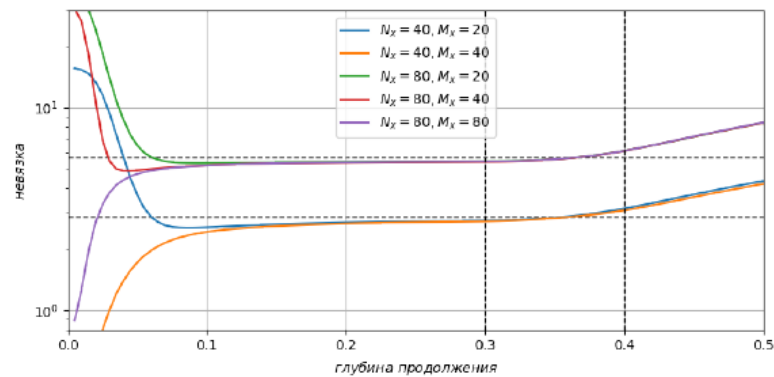


Рисунок 4: Невязка $\chi(h)$ на различных глубинах продолжения, зашумленные данные и оптимальное решение при $\delta=5\%$.

Заключение

Приближенное решение некорректной задачи продолжения потенциальных полей с поверхности Земли в сторону залегающих масс базируется на использовании потенциала простого слоя. Такой подход широко используется в разведочной геофизике.

Для задачи со знакопостоянной аномальной плотностью выделен класс априорных ограничений на искомую плотность. Вычислительный алгоритм строится на основе метода наименьших квадратов при неотрицательности решения.

Глубина залегания потенциала простого слоя выступает в качестве «регуляризирующего параметра». Его оценка выполняется на основе принципа невязки при учете погрешности измерений гравитационного поля.

Как показывают результаты численного решения модельной трехмерной задачи продолжения, предложенный вычислительный алгоритм надежен и позволяет не только локализовать аномалию по горизонтали, но и дать оценку глубины залегания аномалий.

Спасибо за внимание!