Автоматизированный линеаментный анализ космоснимков – эффективный метод прогноза потенциальных рудоносных структур

Читалин А.Ф.
ООО «Институт геотехнологий»

2023 г

Автоматизированный линеаментный анализ

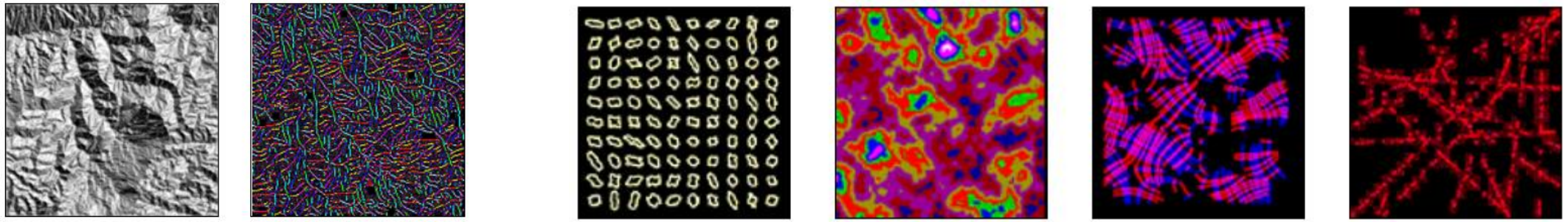
Цель: выделение потенциально рудоконтролирующих разрывов и зон трещиноватости, штокверков. Прогноз структурных ловушек.

Ручное выделение линеаментов при обычном дешифрировании субъективно:

- опыт показывает, что разными геологами по одним и тем же космоснимкам или аэрофотоснимкам могут быть отдешифрированы различные линеаменты и структуры;

- нередко выделяются кольцевые структуры, которые реально не существуют и не подтверждаются полевыми исследованиями.

Методика автоматизированного линеаментного анализа LESSA



● Используется компьютерная технология автоматизированного линеаментного анализа LESSA (**Lineament extraction and stripe statistical analysis**), разработанная в СССР в 80-х годах прошлого века и в дальнейшем усовершенствованная (*Златопольский, Малкин, 2005).* Существуют также зарубежные программы компьютерного анализа линеаментов.

● С помощью LESSA выявляются линейные элементы изображения и количественно определяются их основные свойства: ориентировка на розах-диаграммах, плотность линейных элементов. Выделяются протяженные линеаменты .

● Дополнительные структурные характеристики: характеристики формы роз-диаграмм, вектора и линии вытянутости, сходство соседних роз-диаграмм и др.

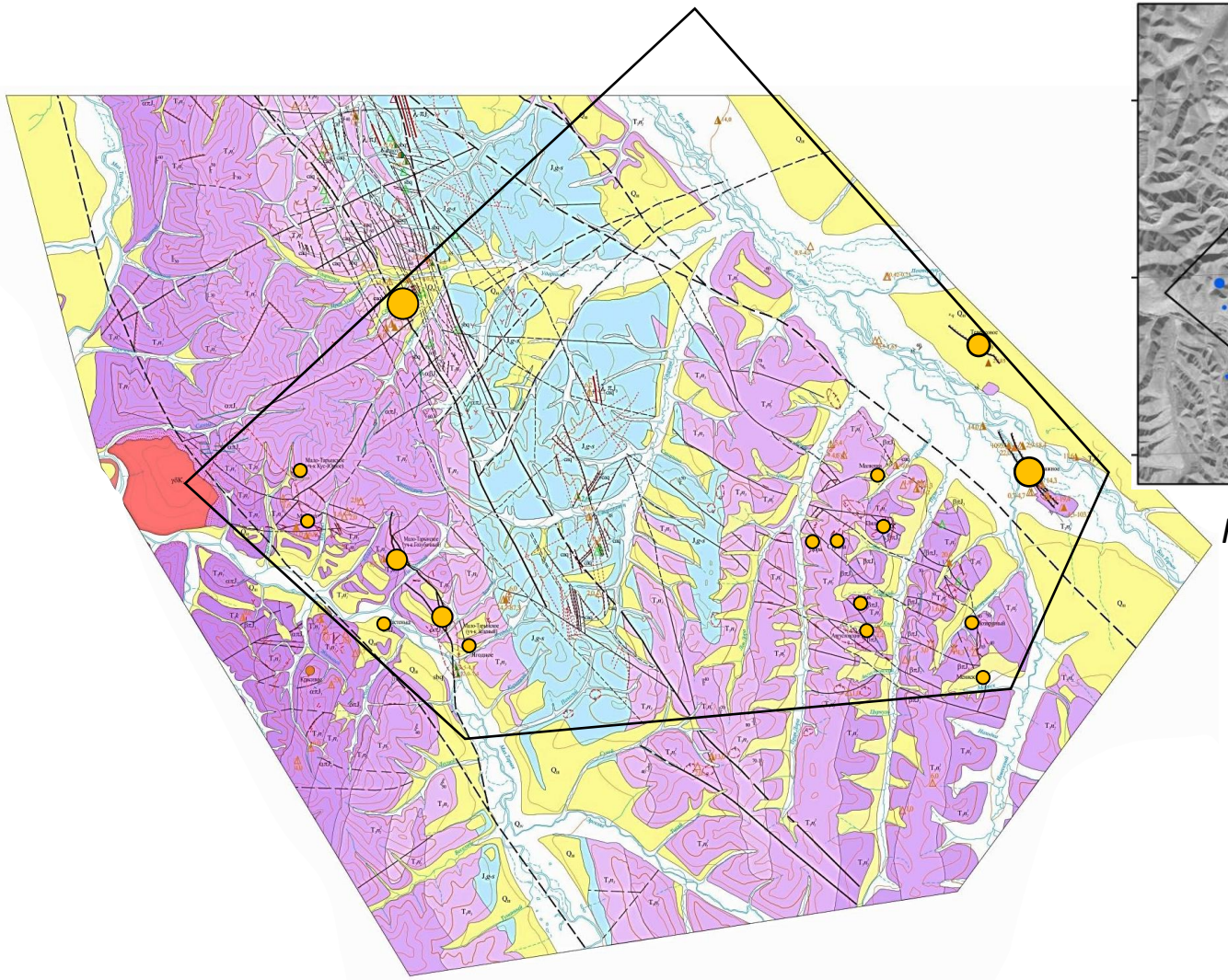
● LESSA предоставляет специалисту объективные данные об исследуемой территории, помогая ему принять решение. Методика анализа и примеры использования подробно описаны на сайте разработчика (www.lineament.ru).

● LESSA существенно дополняет и заменяет ручное дешифрирование.

● Заверка полевыми методами структурного анализа повышает достоверность интерпретации

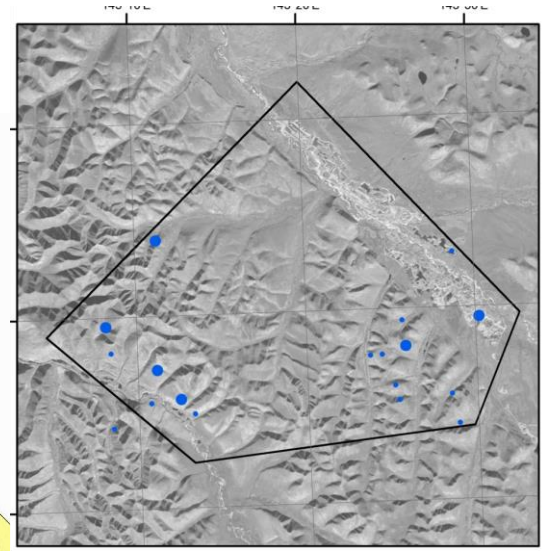
Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Тырынское рудное поле. Якутия

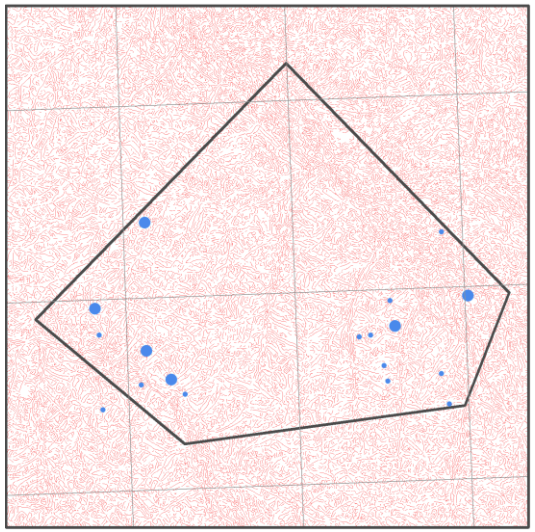


Месторождения, проявления и пункты минерализации золота

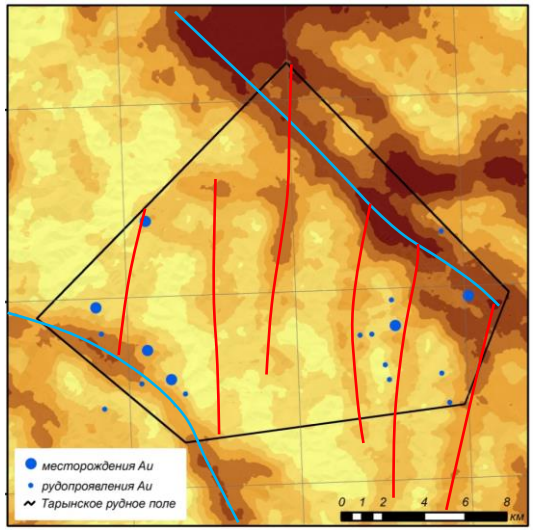
Панхроматическое изображение Landsat 8



Штрихи, выделенные LESSA



Карта удельной плотности всех линеаментов

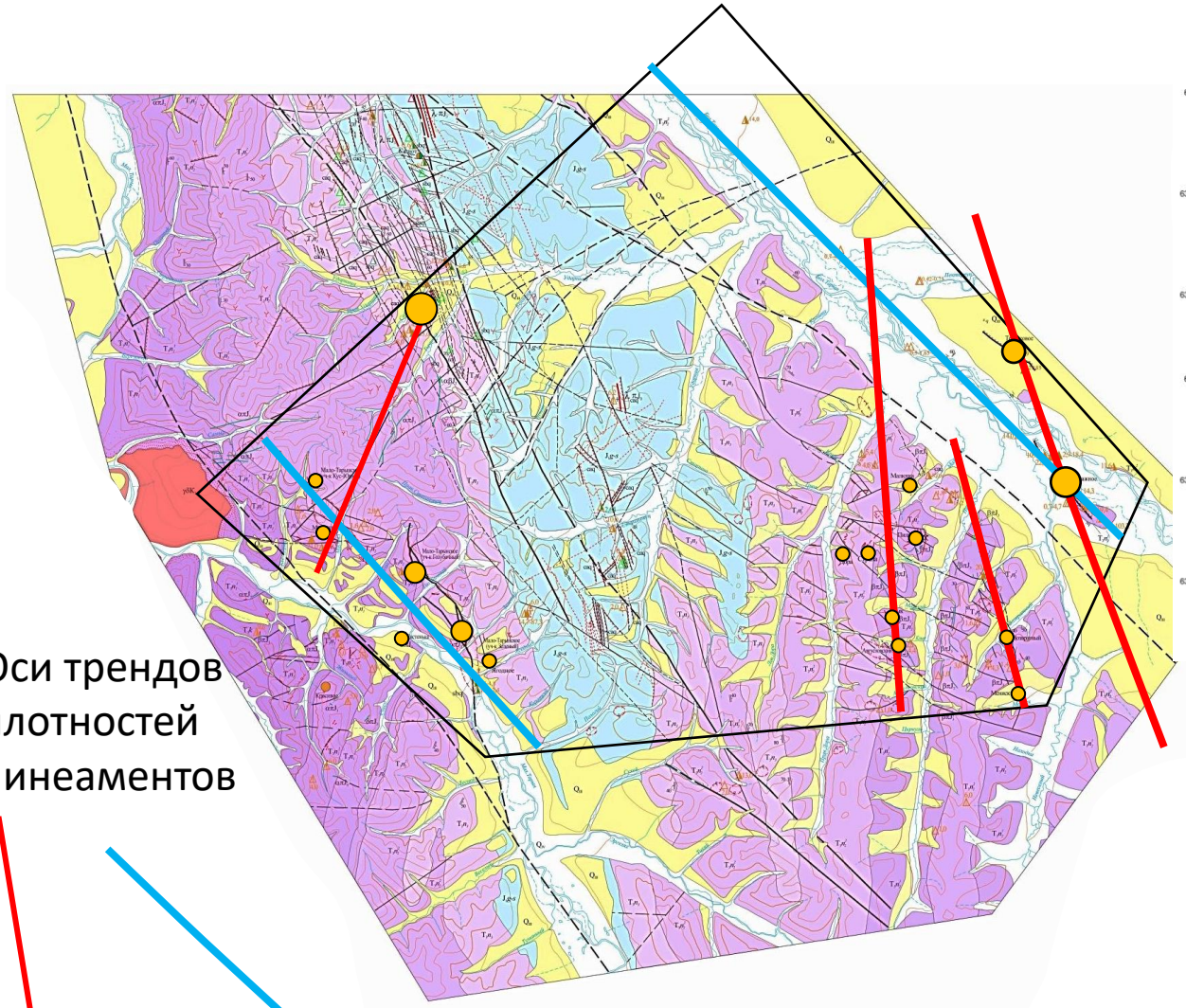


Золоторудные месторождения и проявления контролируются зонами разрывных нарушений СЗ и С-Ю простирания

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Структурная интерпретация линеаментов

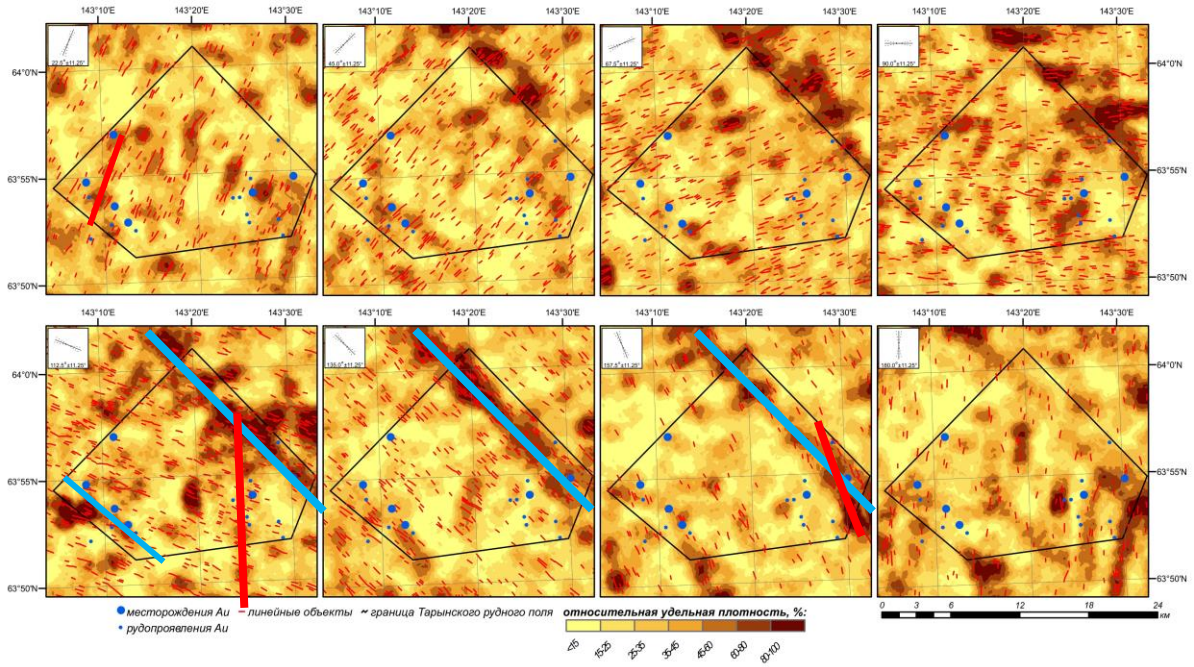
Тырынское рудное поле. Якутия



Оси трендов плотностей линеаментов

Месторождения, проявления и пункты минерализации золота

Карты удельной плотности линеаментов по направлениям



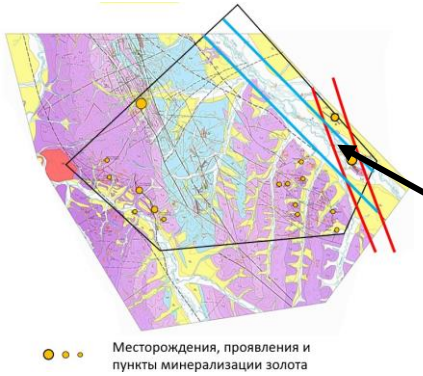
- СЗ и С-Ю тренды минерализации совпадают с трендами плотностей линеаментов (зоны трещиноватости).
- Разрывы на геологической карте часто не совпадают с трендами плотностей. Многие разрывы дорудные и пострудные.

ТРЕНДЫ ПЛОТНОСТЕЙ ЛИНЕАМЕНТОВ - ПОИСКОВЫЕ КОРИДОРЫ

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Структурная интерпретация линеаментов

Тырынское рудное поле. Якутия

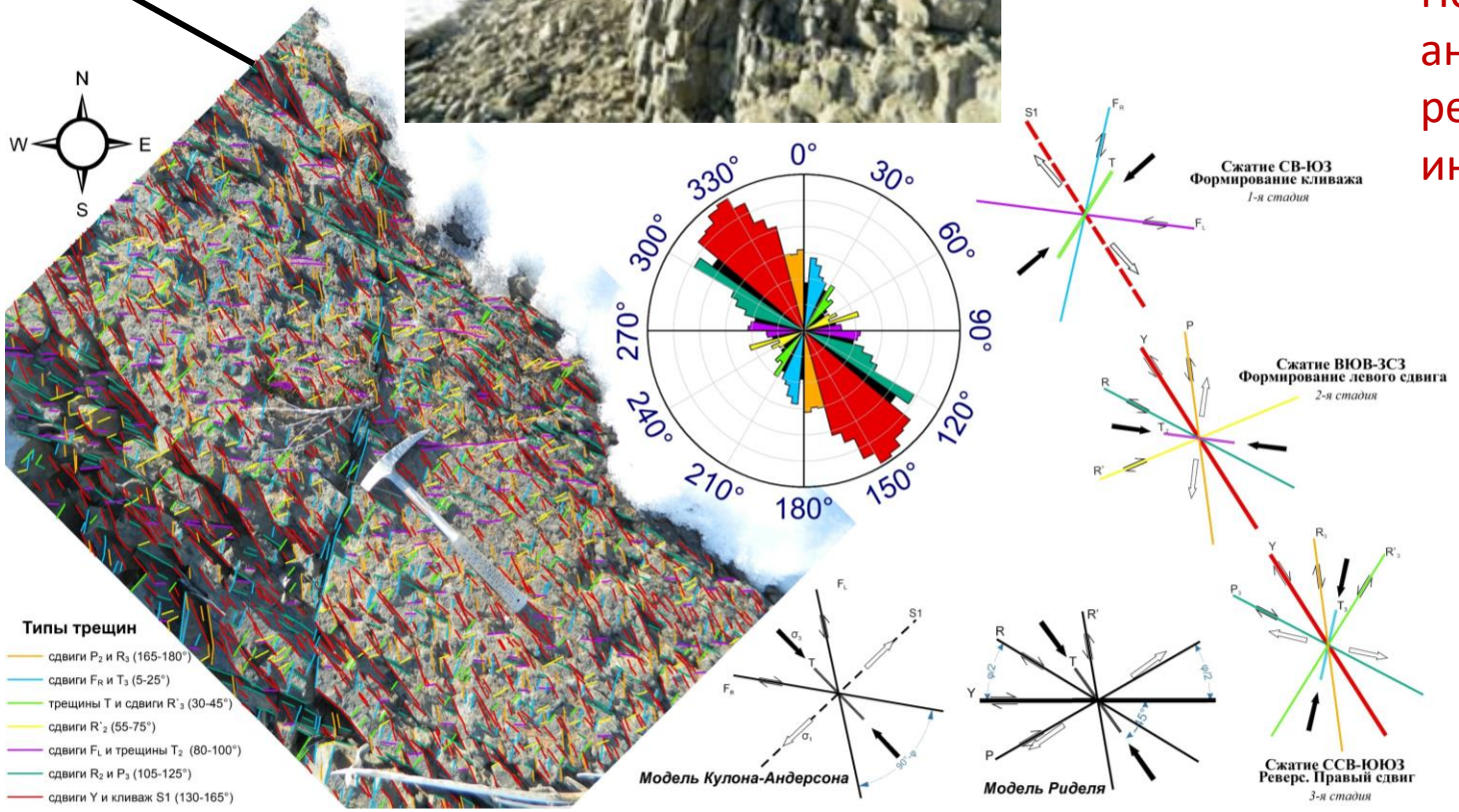


Тектоническая трещиноватость в обнажениях долины р. Б. Тарын

Горизонтальные трещины скалывания перпендикулярные осевому кливажу S1

Полевой структурный анализ – основа для реалистичной интерпретаций линеаментов

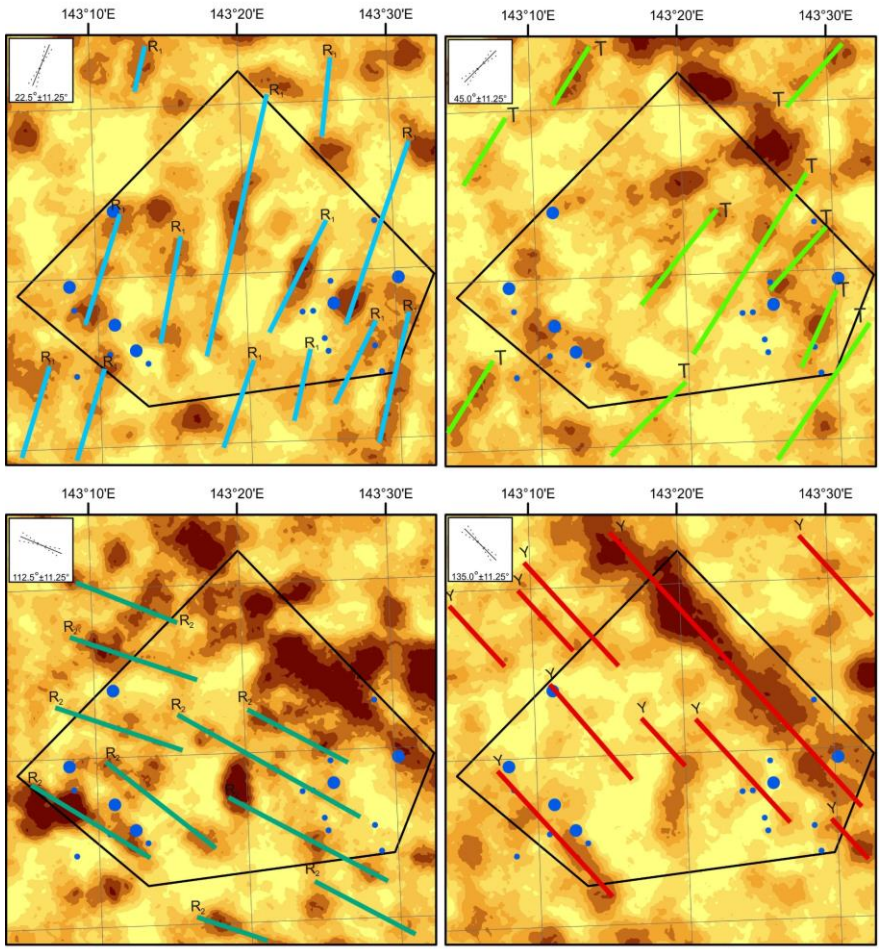
Горизонтальное обнажение алевропесчаников. Соскладчатые трещины: густой осевой кливаж и трещины скалывания



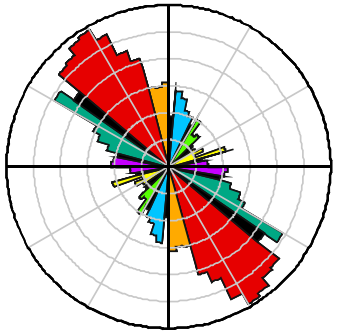
Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Структурная интерпретация линеаментов

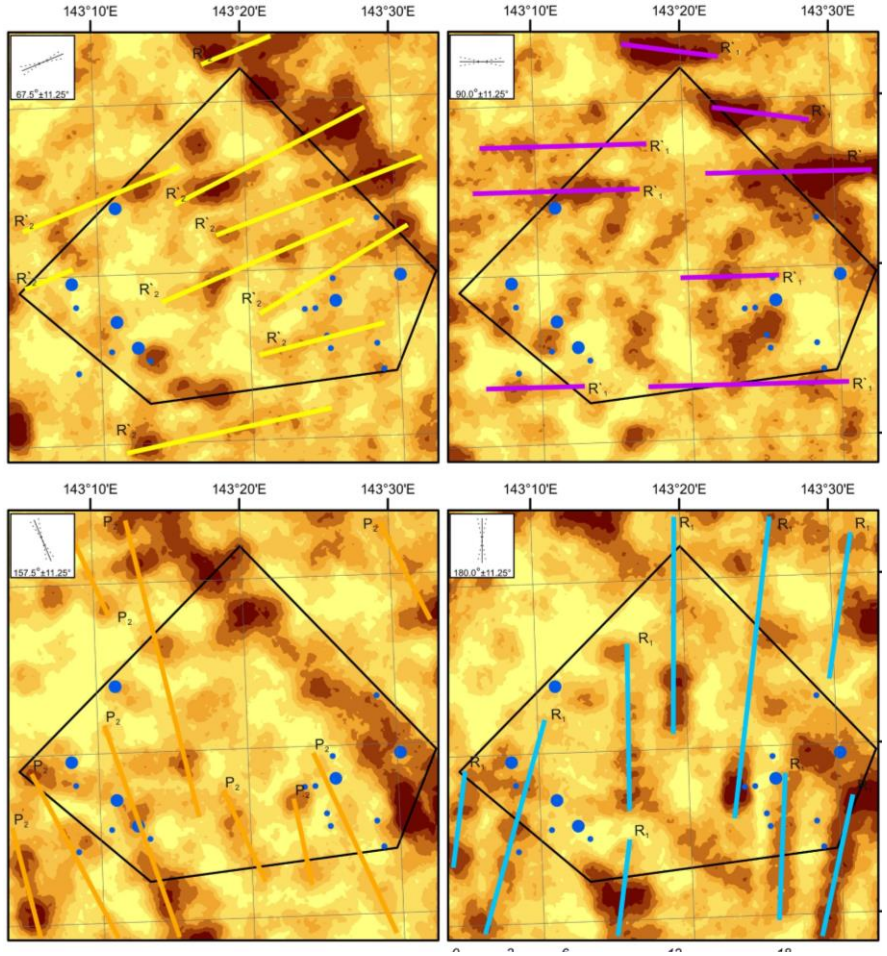
Тырынское рудное поле. Якутия



Тренды плотностей линеаментов разных направлений



Роза-диаграмма трещин в обнажении



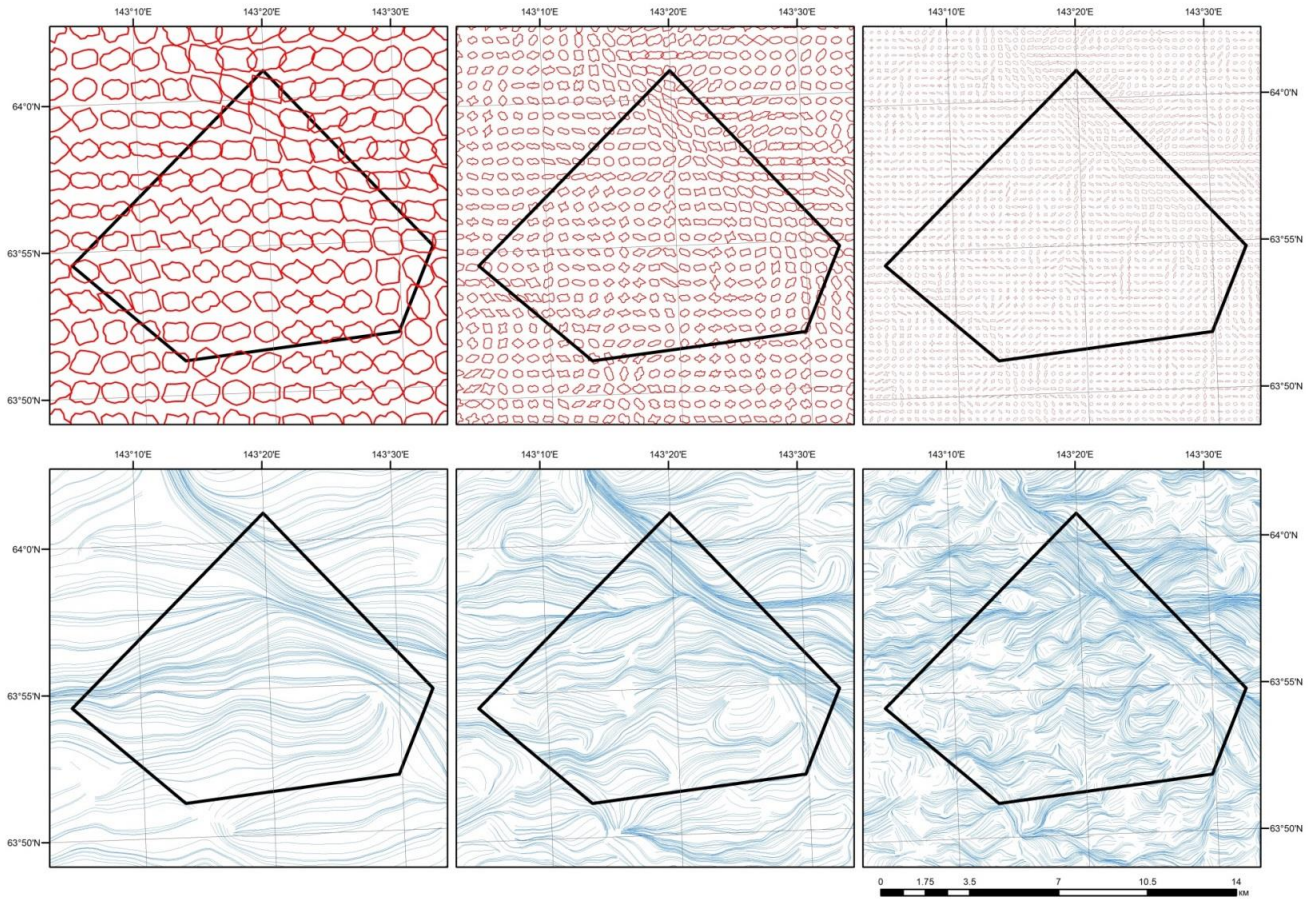
Системы линеаментов соответствуют системам тектонических трещин в обнажениях

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

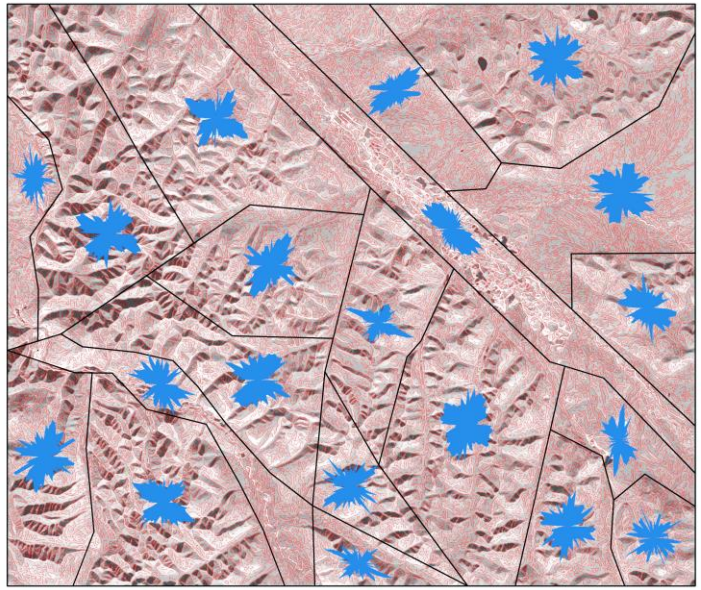
Структурная интерпретация линеаментов

Тырынское рудное поле. Якутия

Выделение участков с однородной ориентировкой линейных объектов



Выделение структурных доменов



Домены, выделенные по линиям вытянутости роз-диаграмм

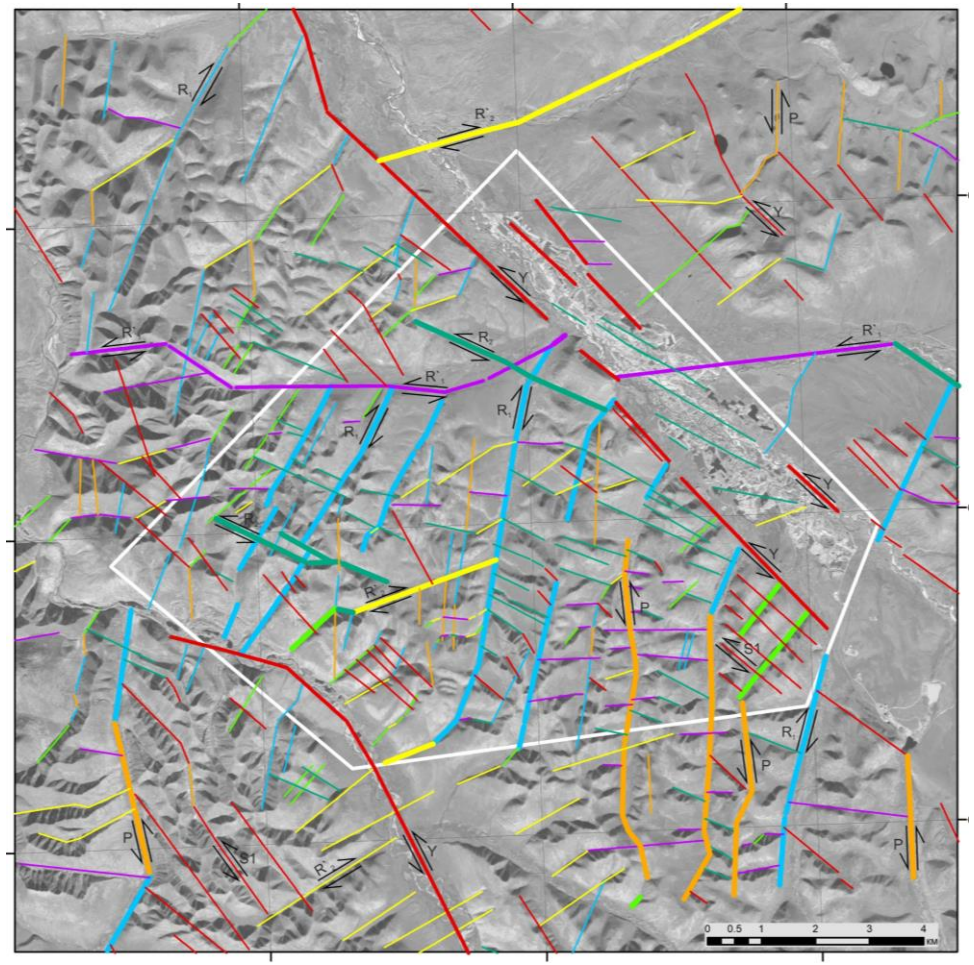
Выделение структурных доменов - для районирования и анализа закономерностей распределения рудной минерализации и т.д.

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Структурная интерпретация линеаментов

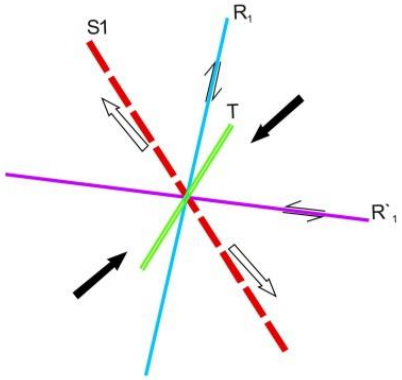
Тырынское рудное поле. Якутия

Отдешифрированные вручную линеаменты. Интерпретация: разрывы разного возраста и кинематики



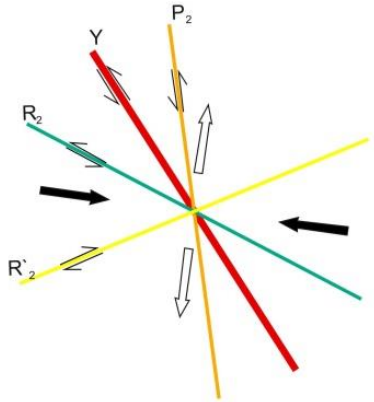
Этапы развития разрывной структуры Адыча-Тарынского разлома и контроль золоторудной минерализации

1-й этап. Кливаж



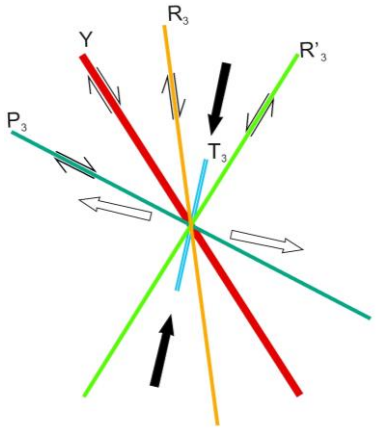
Сжатие СВ-ЮЗ
Формирование кливажа
1-ая стадия

2-й этап. Левый сдвиг



Сжатие ВЮВ-ЗСЗ
Формирование левого сдвига
2-ая стадия

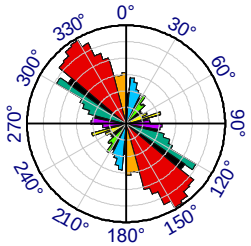
3-й этап. Правый сдвиг



Сжатие ССВ-ЮЮЗ
Реверс. Правый сдвиг
3-я стадия

Системы «ручных» линеаментов совпадают с системами «компьютерных» линеаментов

Au
Золоторудная минерализация связана с разрывами второго этапа деформации.

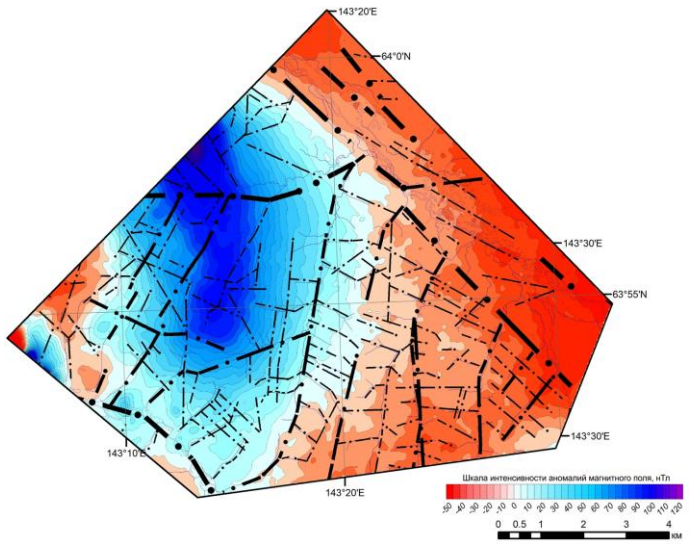


Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

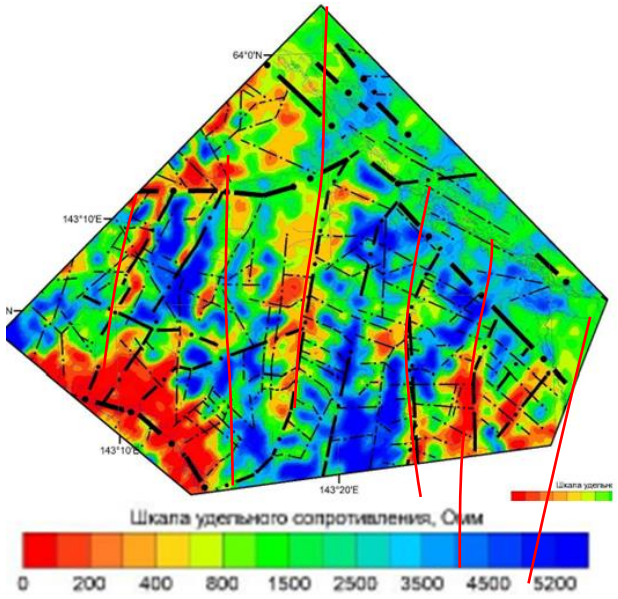
Выраженность линеаментов в геофизических полях

Тырынское рудное поле. Якутия

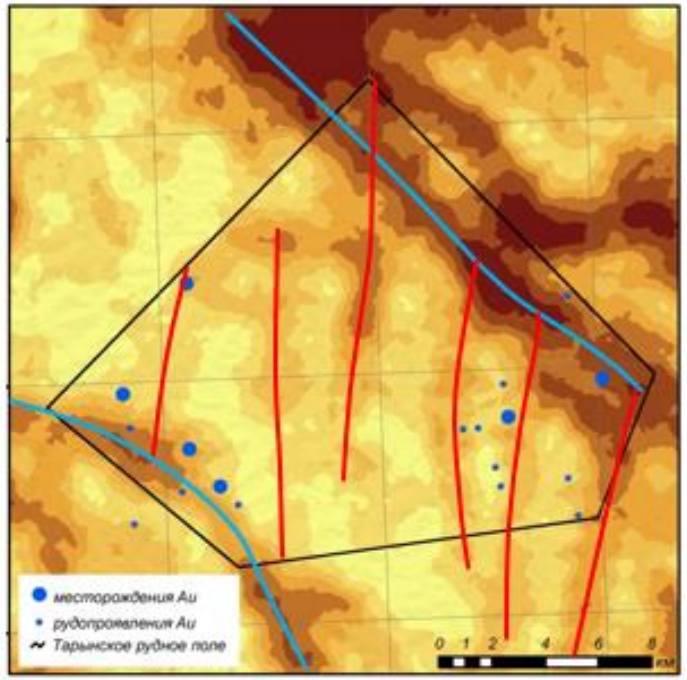
Карта аномального магнитного поля



Карта удельного сопротивленеия на глубине 150 м



Карта удельной плотности всех линеаментов

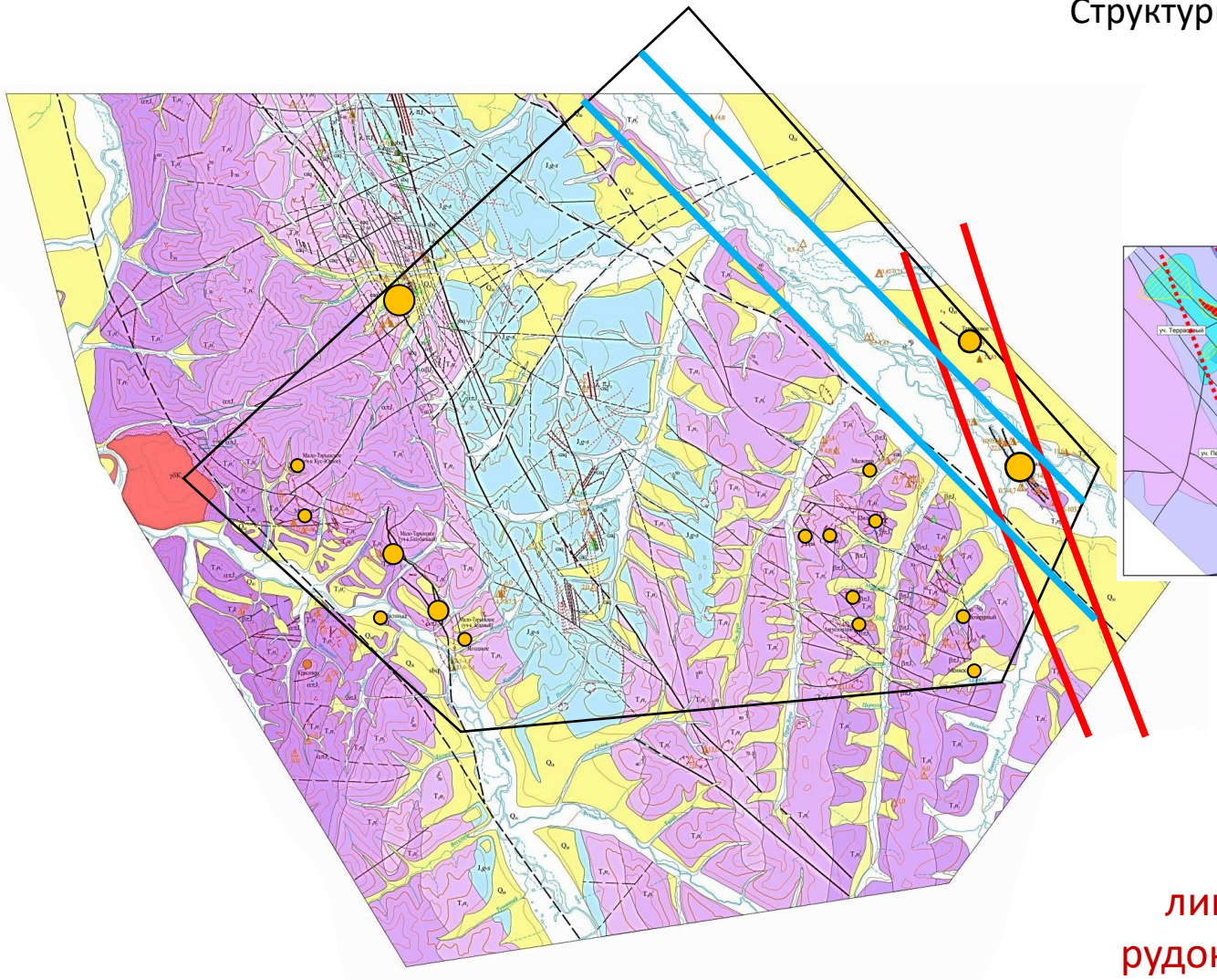


Многие линейные аномалии проводимости совпадают с линеаментами и трендами плотностей линеаментов и отражают потенциально рудоносные структуры – ПОИСКОВЫЕ КОРИДОРЫ !

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

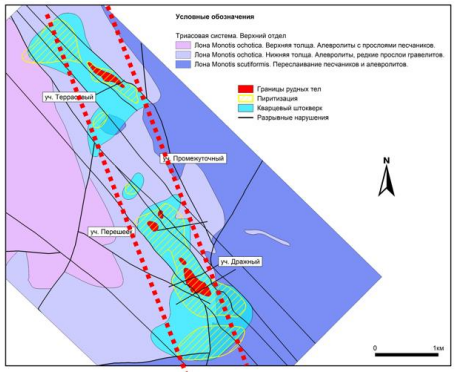
Интерпретация линеаментов с учетом известных структурных моделей

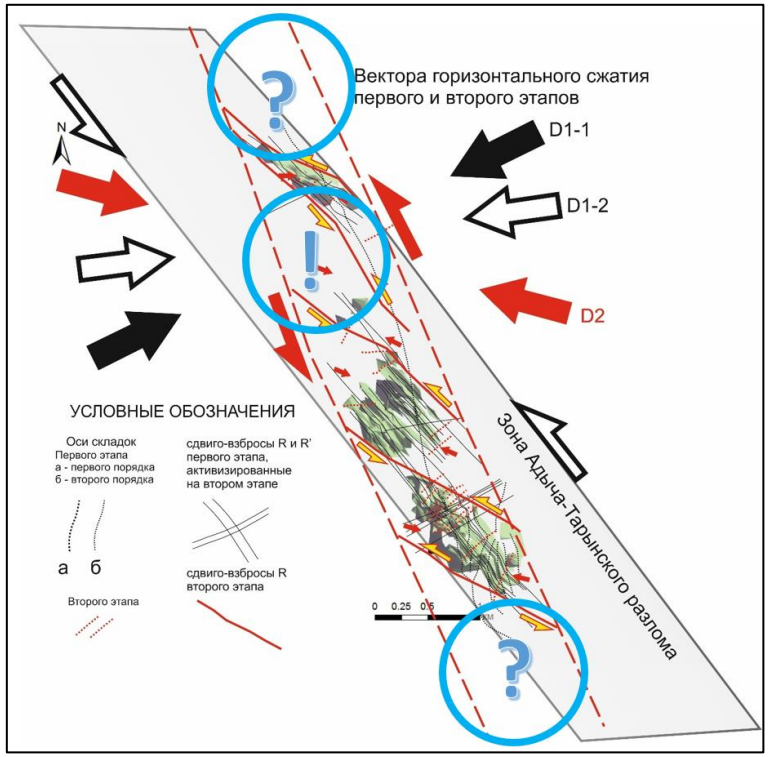
Тырынское рудное поле. Якутия



Структурно-кинематическая модель месторождения Дражное

(Читалин и др, 2018)





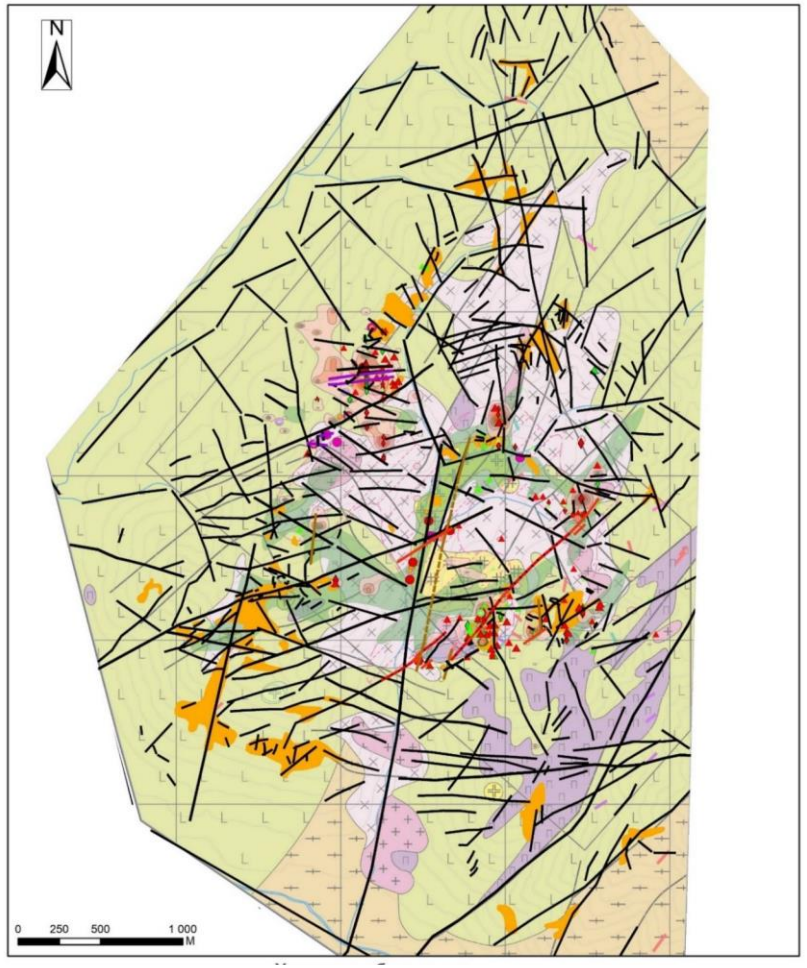
ССЗ тренд плотностей линеаментов соответствует рудоносной зоне левого сдвига, пересекающей зону Адыча-Тарынского разлома

Месторождения, проявления и пункты минерализации золота

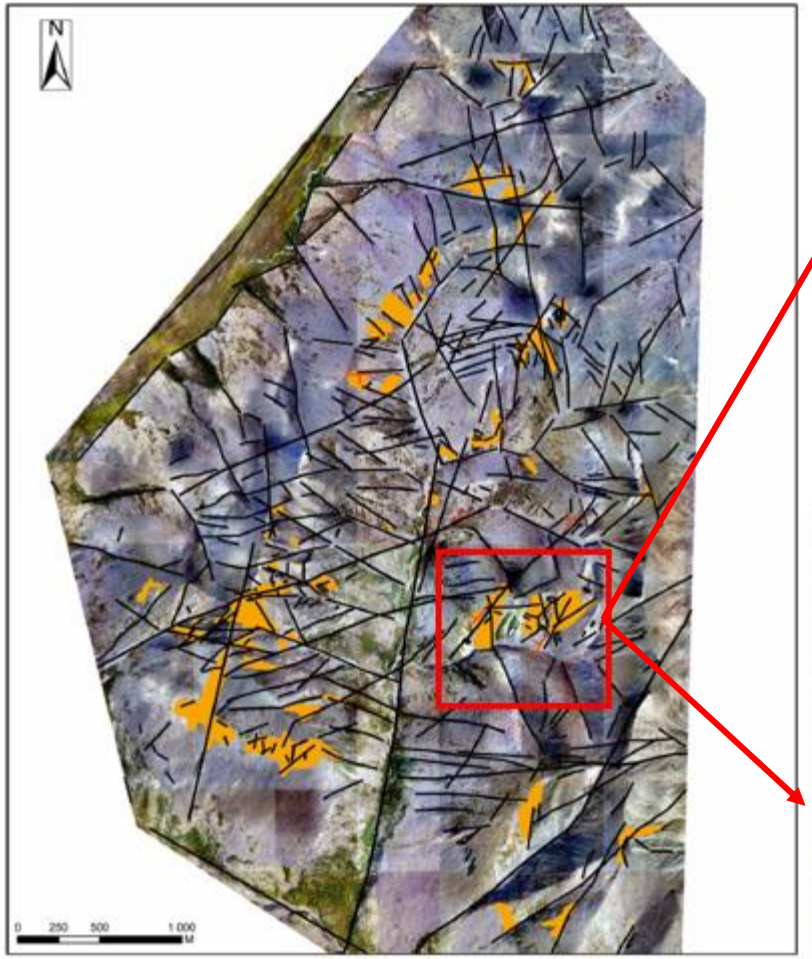
Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Золото-медно-порфировая система в Восточной Бурятии

Геолого-поисковый план по результатам полевых работ



Ортофотоплан БПЛА с отдешифрированными вручную линеаментами и зонами лимонитизации



Линеаменты при разных порогах выраженности

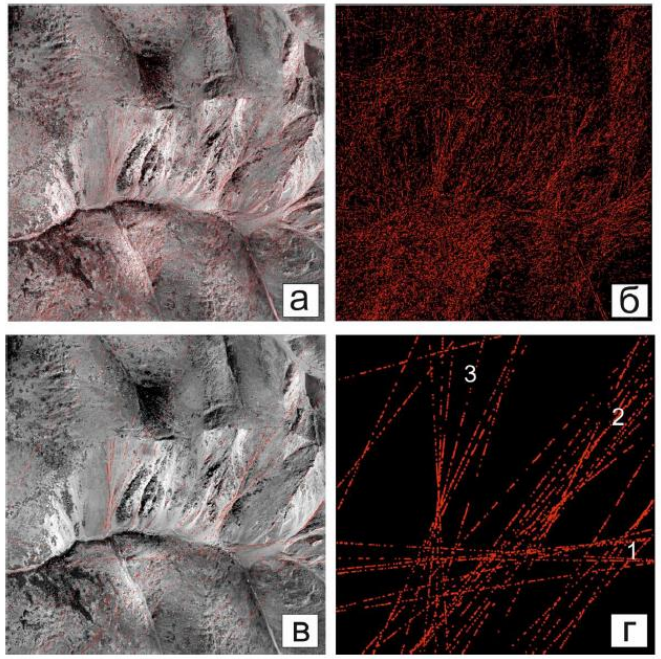
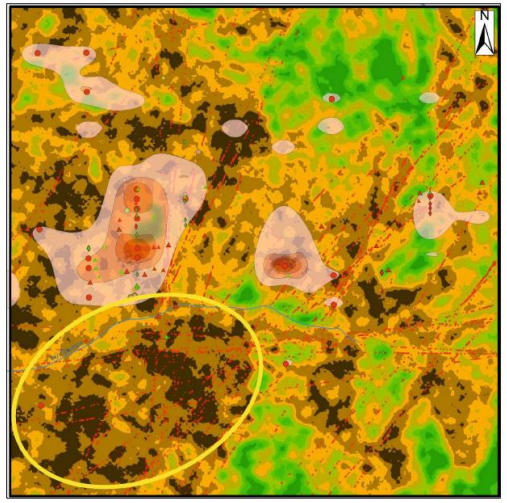


Схема плотностей линеаментов и почвенные аномалии золота



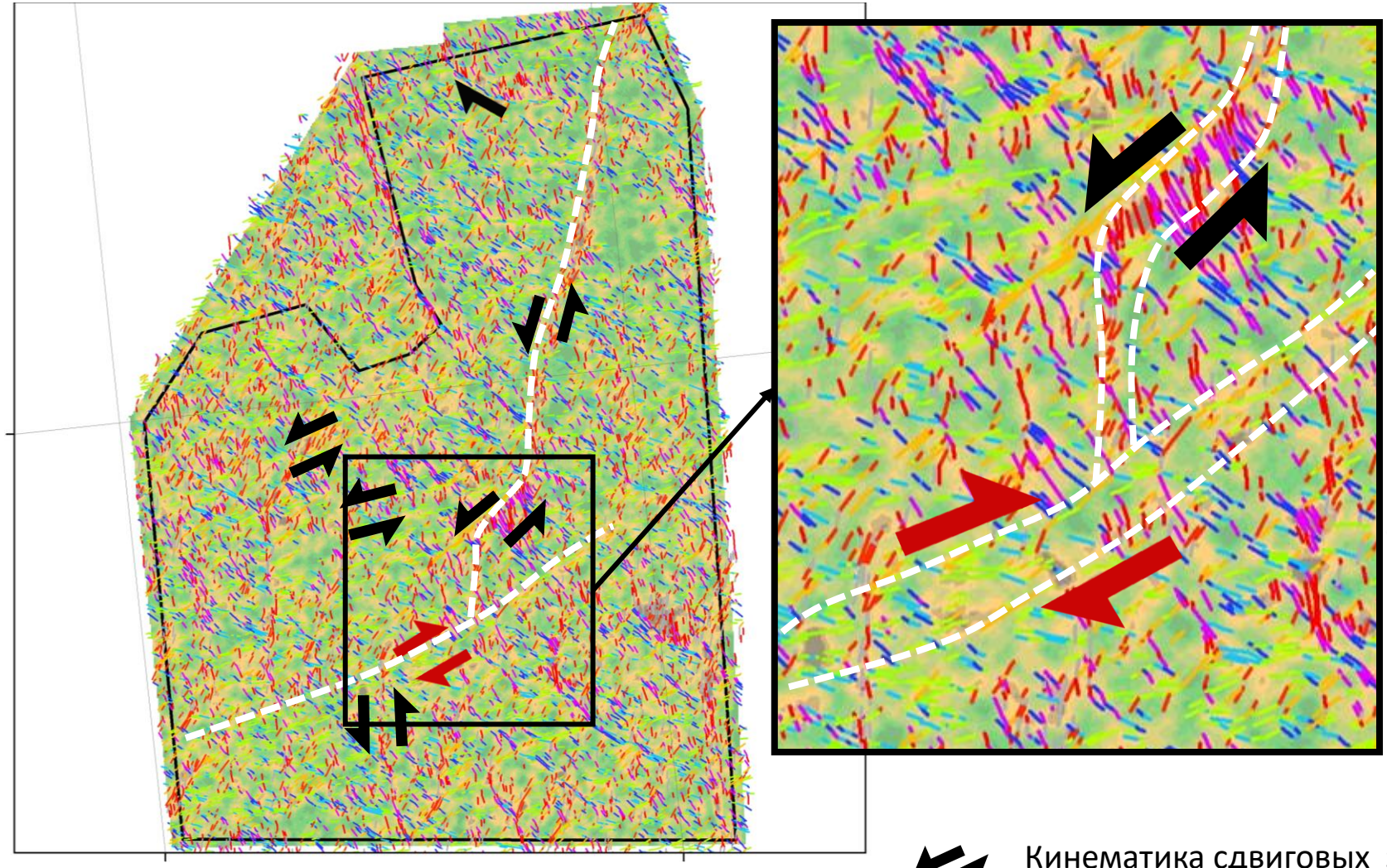
Желтым цветом выделен контур предполагаемого рудного штокверка

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Золоторудный участок в Южной Якутии

Определение кинематики сдвиговых зон

Линеаменты на карте удельных плотностей



относительная удельная плотность, %:

<15 | 15-25 | 25-35 | 35-45 | 45-60 | 60-80 | 80-100

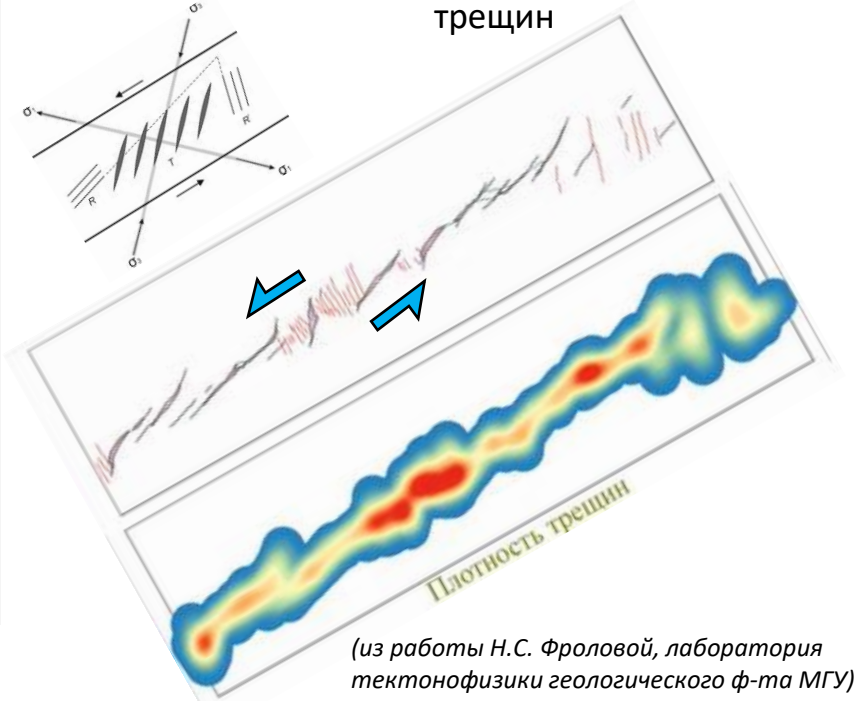
0 1 2 4 6 8 км

Кинематика сдвиговых зон:
дорудных и пострудных,
синрудных

Определение сдвиговой кинематики трендов плотностей линеаментов на основе модели сопряженных сколов Риделя и тектонофизической модели сдвига

Трещины Риделя в зоне сдвига

Тектонофизическая модель трещин в зоне сдвига и плотность трещин

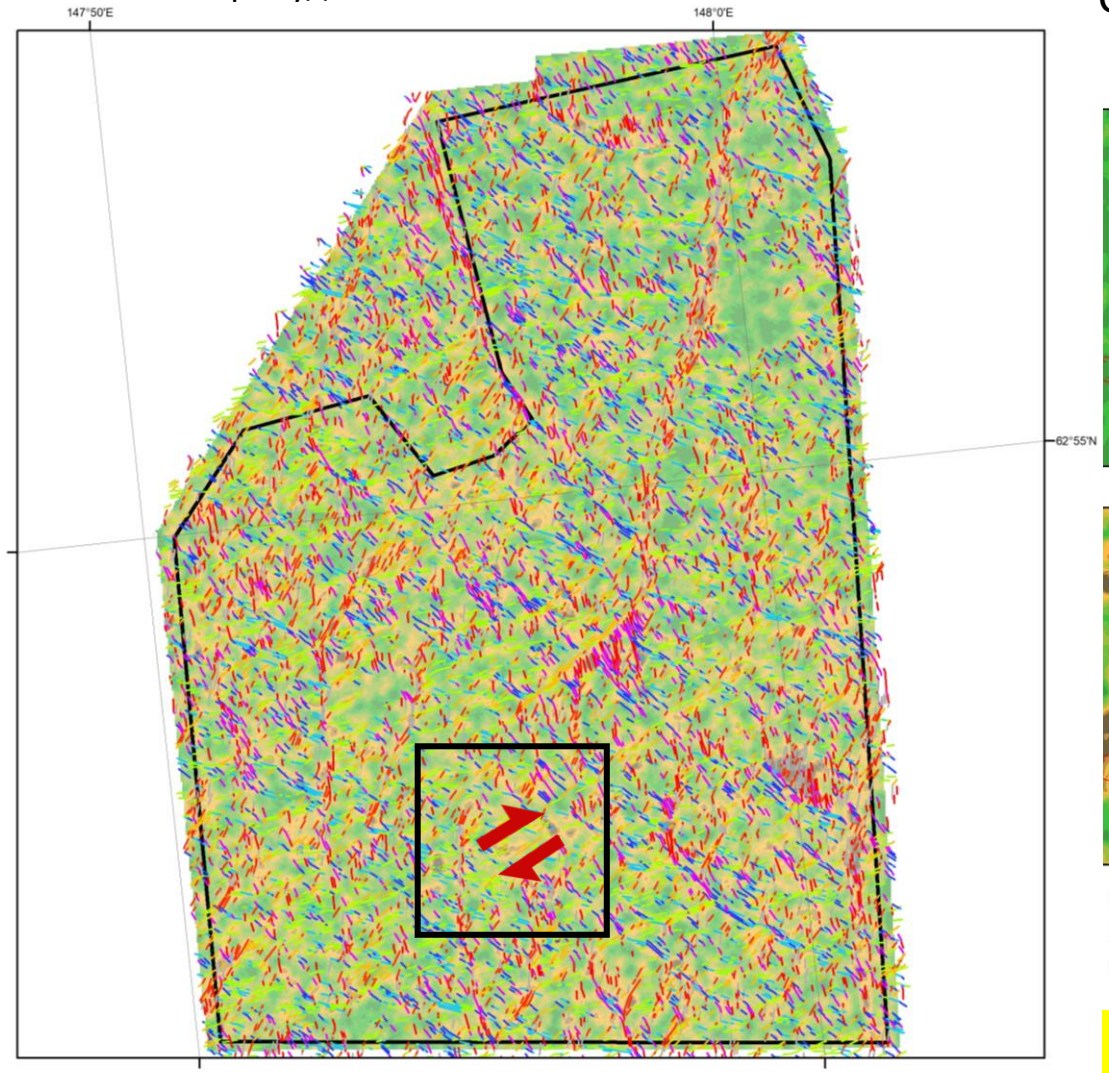


(из работы Н.С. Фроловой, лаборатория тектонофизики геологического ф-та МГУ)

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Золоторудный участок в Южной Якутии

Карта удельных плотностей линеаментов



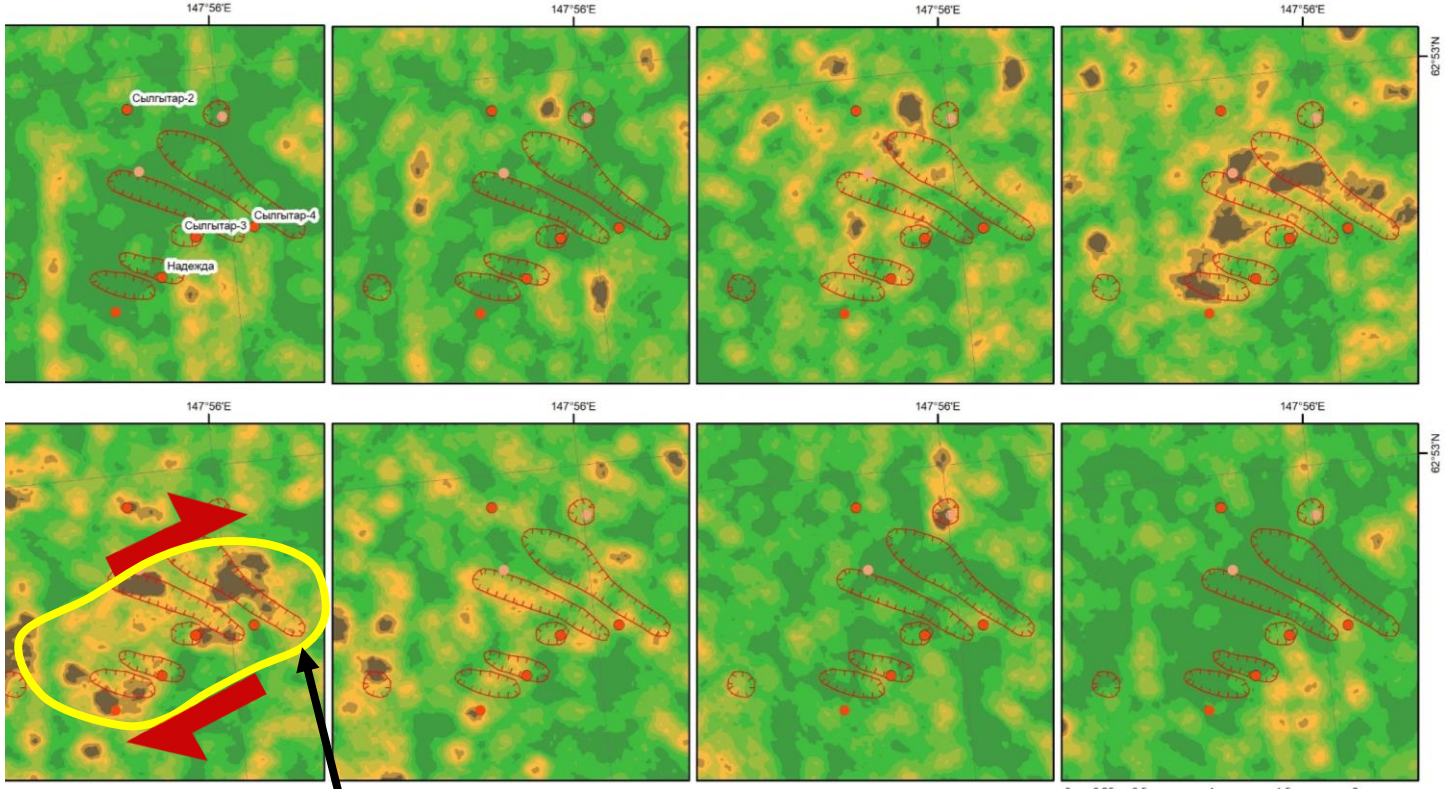
относительная удельная плотность, %:

<15 | 15-25 | 25-35 | 35-45 | 45-60 | 60-80 | 80-100

0 1 2 4 6 8 км

Прогноз структурных ловушек минерализации

Соотношение трендов плотностей линеаментов разных направлений с минерализацией и аномалиями золота



рудопроявления Au, AuAg

пункты минерализации Ag, AgAu

пункты минерализации Au, AuAg

контуры геохимических аномалий Au

относительная удельная плотность, %:

<15 | 15-25 | 25-35 | 35-45 | 45-60 | 60-80 | 80-100

0 0.25 0.5 1 1.5 2 км

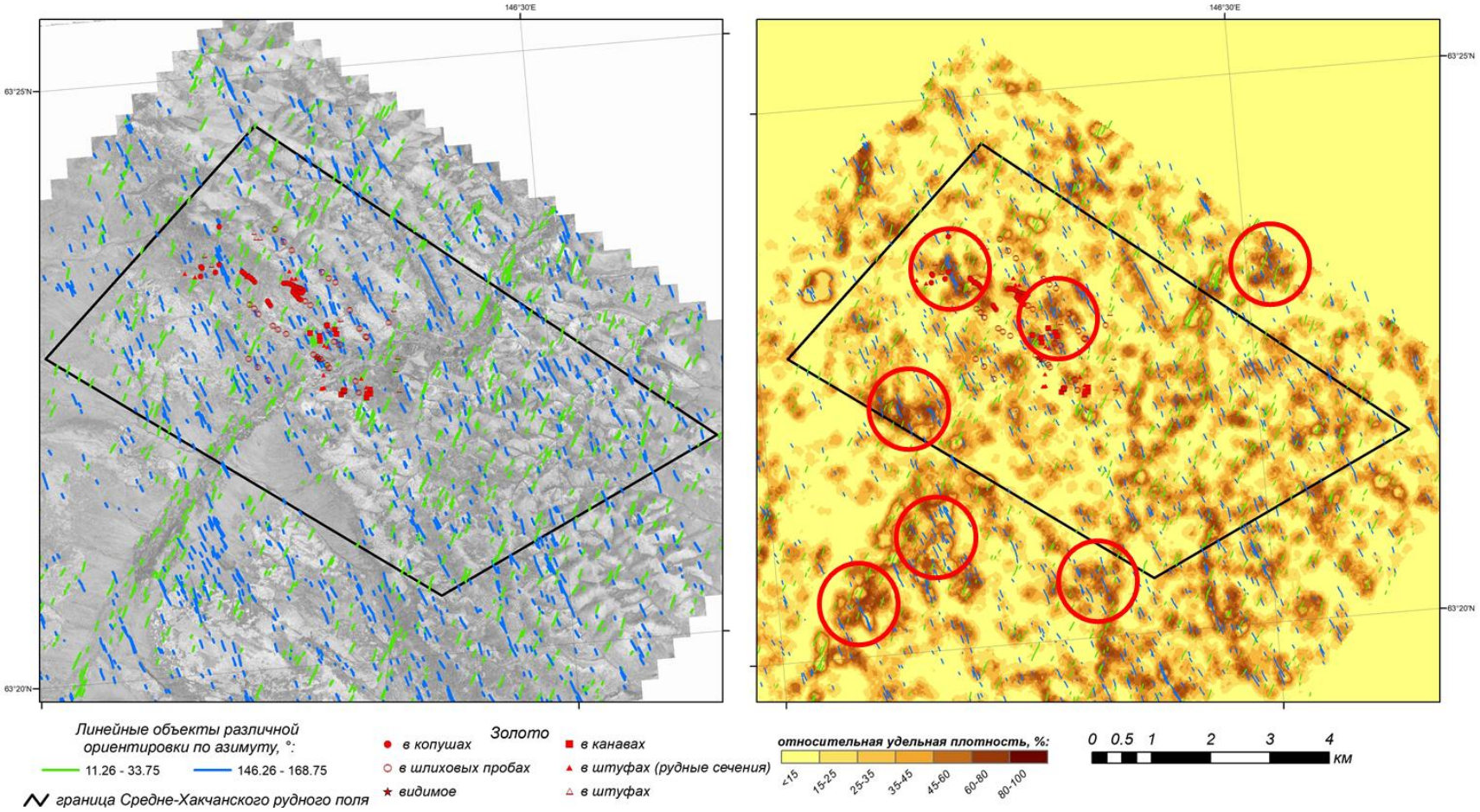
Прогнозируемый золоторудный штокверк

Зона рудоконтролирующего сдвига

Автоматизированный анализ линеаментов при геологическом таргетировании и поисках месторождений

Золоторудное поле в Южной Якутии.

Линеаменты ориентировок 22.5±11.25° (зеленые) и 157.5±11.25° (синие) на материалах спутниковой съемки системы WorldView (слева) и на карте удельных плотностей (справа).



Прогноз рудных штокверков

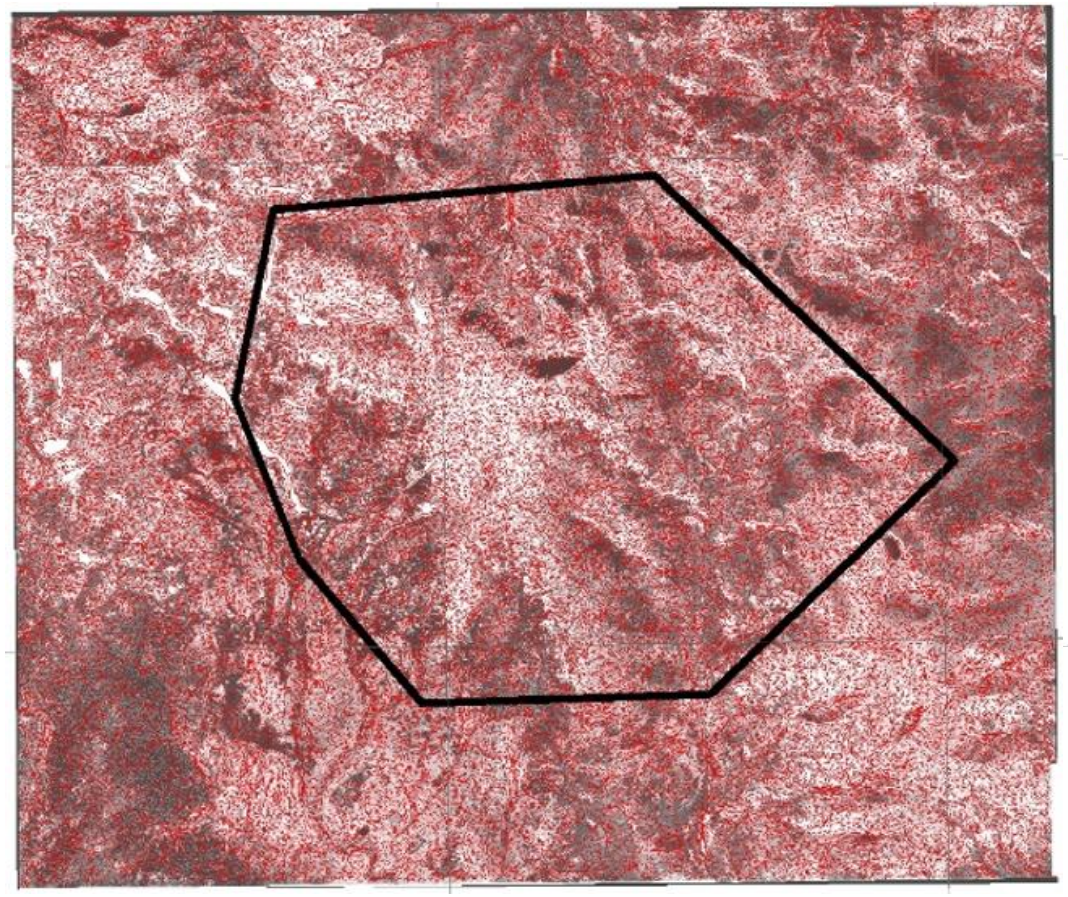
Аномалии золота и кварцевые штокверки часто совпадают с узлами пересечения трендов высокой плотности линеаментов ССВ и ЮВ простирания.

Красными кружками выделены узлы пересечения трендов, перспективные для поисков золоторудных штокверков

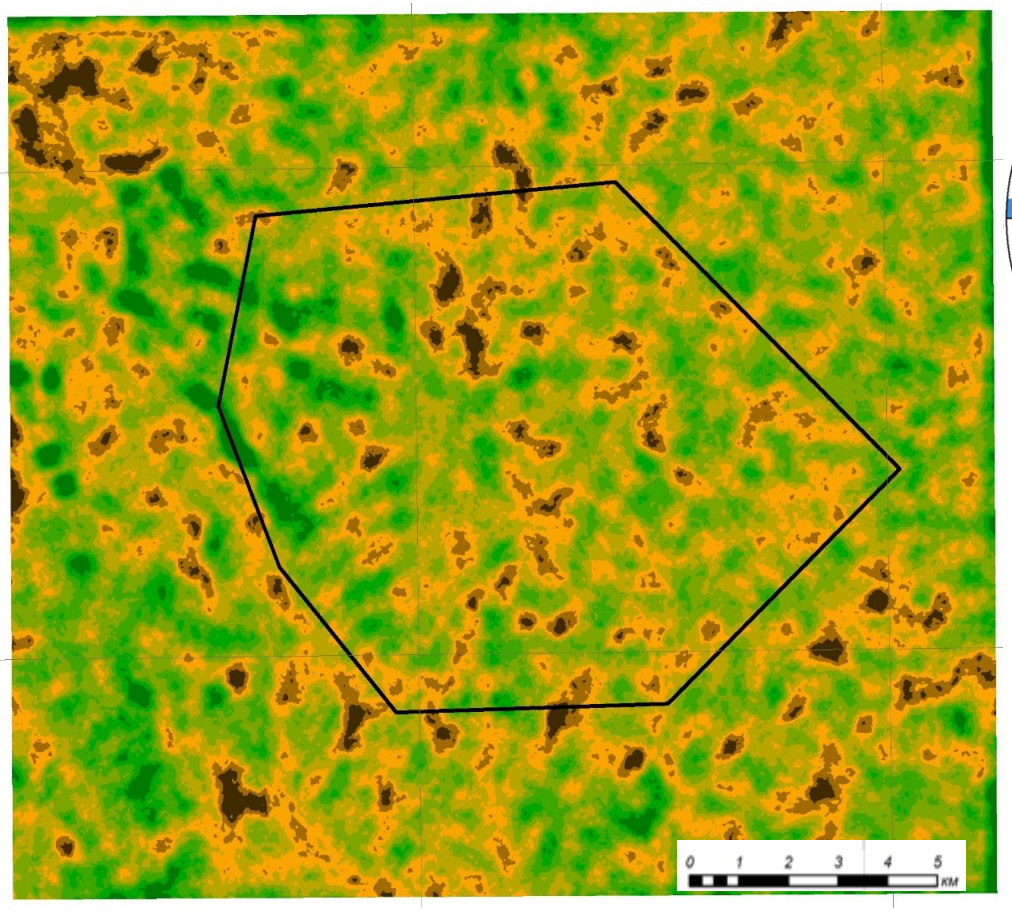
Автоматизированный анализ линеаментов при поисках и разведке меторождений

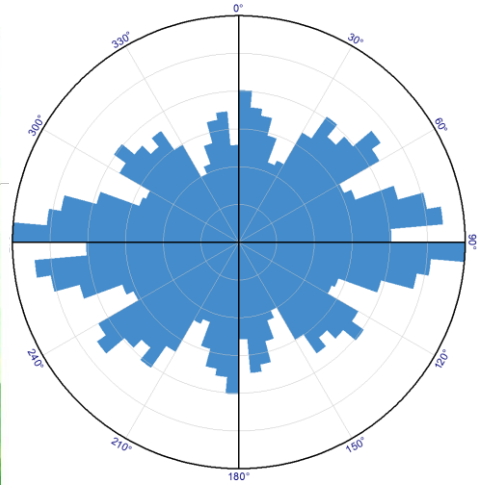
Участок с медно-порфировой минерализацией. Магаданская область

Штрихи, выделенные на спутниковом снимке с порогом длины штриха 20 м



Карта удельной плотности штрихов, рассчитанная в скользящем окне диаметром 500 м.





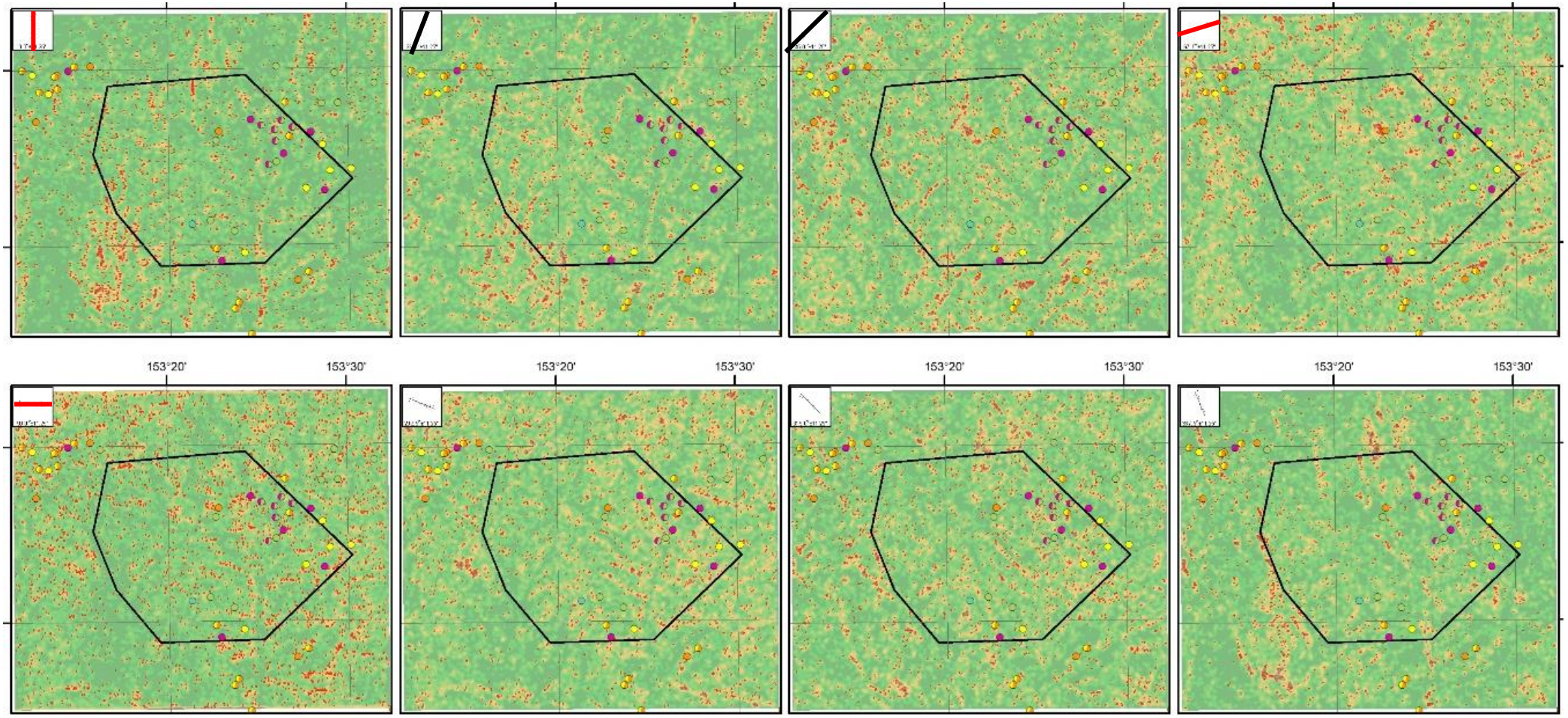
Роза-диаграмма простирания штрихов линеаментов

Автоматизированный анализ линеаментов при поисках и разведке меторождений

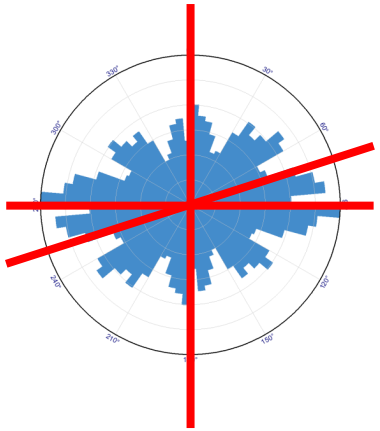
Участок с медно-порфировой минерализацией. Магаданская область

Анализ направлений линеаментов. Выделение рудоконтролирующих структур

Рудопроявления и штрихи-линеаменты на картах плотностей линеаментов восьми различных ориентировок (диаметр окна сглаживания 125 м)



Рудоконтролирующие тренды



Автоматизированный анализ линеаментов при поисках и разведке меторождений

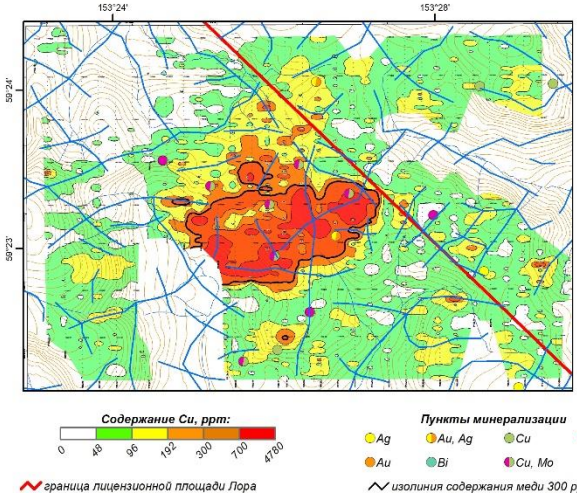
Участок с медно-порфировой минерализацией. Магаданская область

Анализ направлений линеаментов
Выявление структурных трендов минерализации

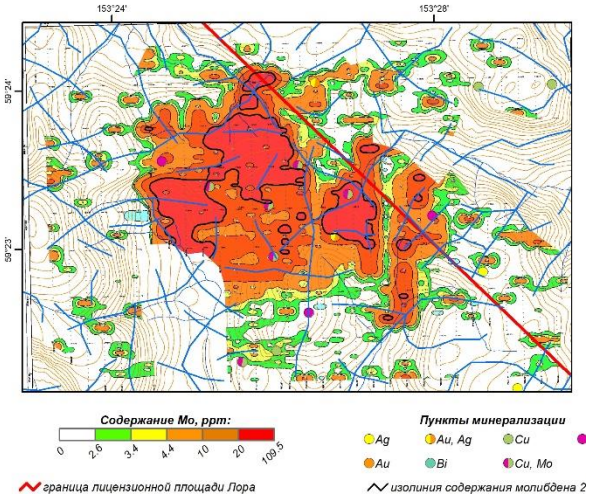
Почвенные аномалии меди, молибдена, золота и проявления молибден-медно-порфировой минерализации.

Тренды удельных плотностей линеаментов и рудопроявления

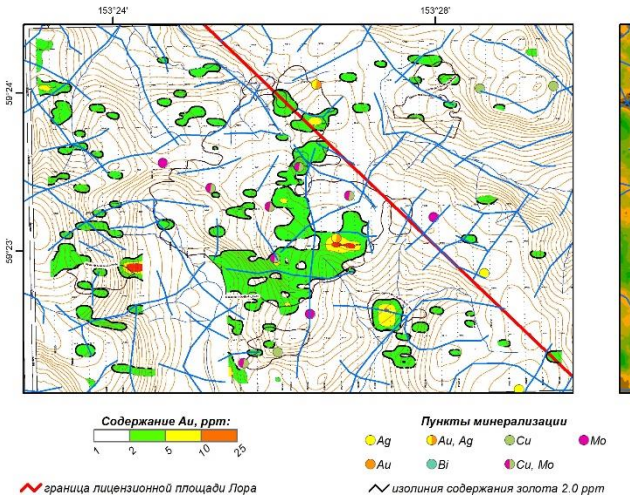
Cu

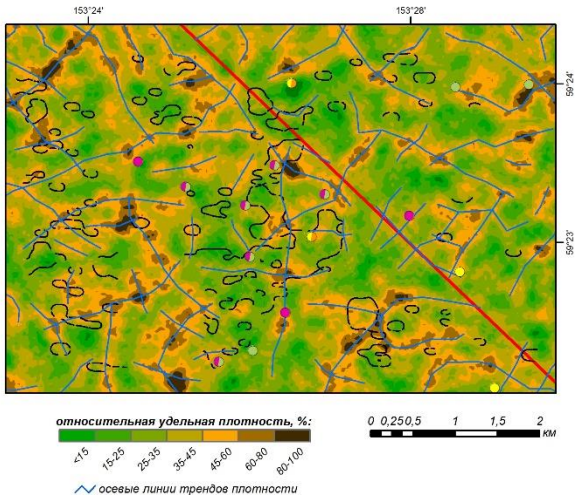


Mo

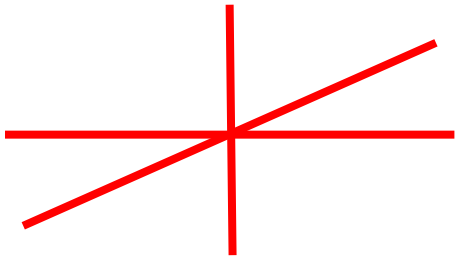


Au





Ядерные части почвенных аномалий совпадают с трендами плотностей линеаментов С-Ю, З-В, СВ простираний



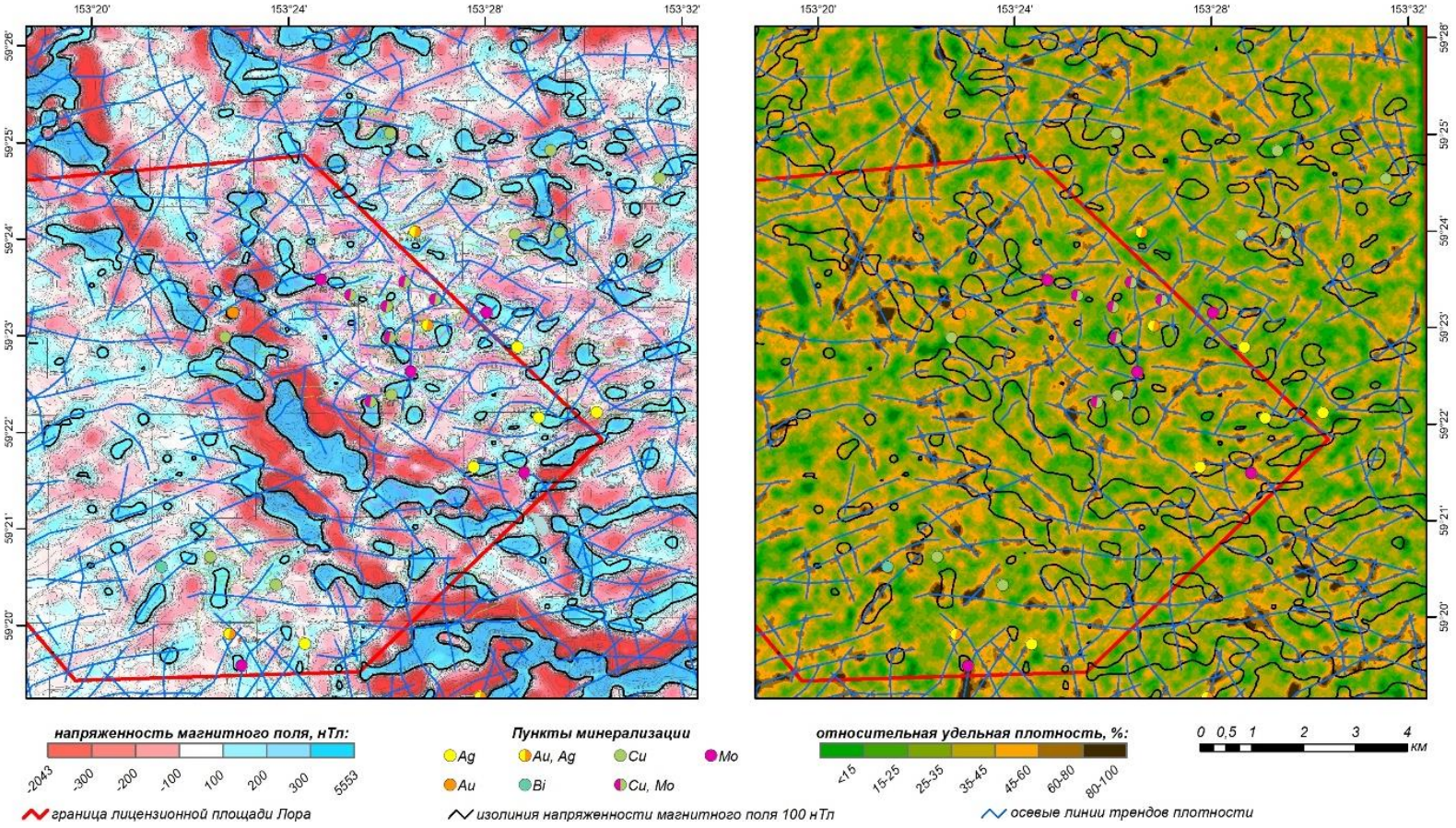
Оси трендов плотностей линеаментов

Рудоконтролирующие зоны трещиноватости –
структурные тренды минерализации = ПОИСКОВЫЕ КОРИДОРЫ

Автоматизированный анализ линеаментов при поисках и разведке меторождений

Участок с медно-порфировой минерализацией. Магаданская область

Сопоставление аномалий локальной составляющей аномального магнитного поля по данным аэромагниторазведки и аномалий удельной плотности штрихов



Выявление структурных трендов минерализации, интерпретация магнитных аномалий

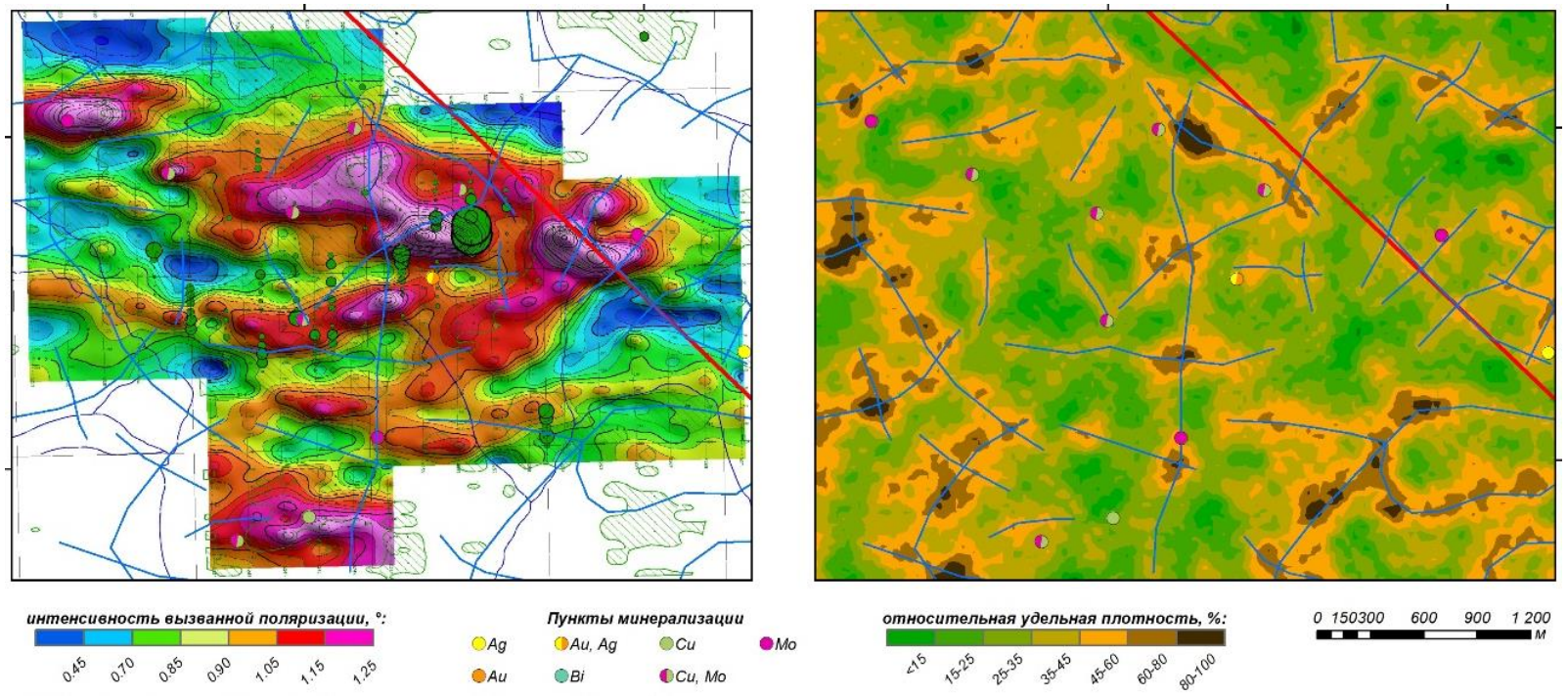
- Многие структурные тренды (зоны сгущения трещин и разрывов) совпадает с линейными магнитными аномалиями или их градиентными зонами.
- Рудопроявления **Cu**, **Mo**, Au, Ag локализованы в отрицательных локальных аномалиях магнитного поля, совпадающих со структурными трендами повышенной и высокой плотности линеаментов , где предполагаются метасоматические изменения и замещение первичного магматического магнетита в интрузивных породах (демагнетизация), возможная медно-порфировая минерализация.
- **Отрицательные магнитные аномалии и тренды плотностей линеаментов – поисковые коридоры**

Оси трендов плотностей линеаментов

Автоматизированный анализ линеаментов при поисках и разведке меторождений

Участок с медно-порфировой минерализацией. Магаданская область

Сопоставление аномалий вызванной поляризации (ВП)
и аномалий удельной плотности штрихов.
Синими линиями показаны оси трендов повышенной и высокой плотности линеаментов



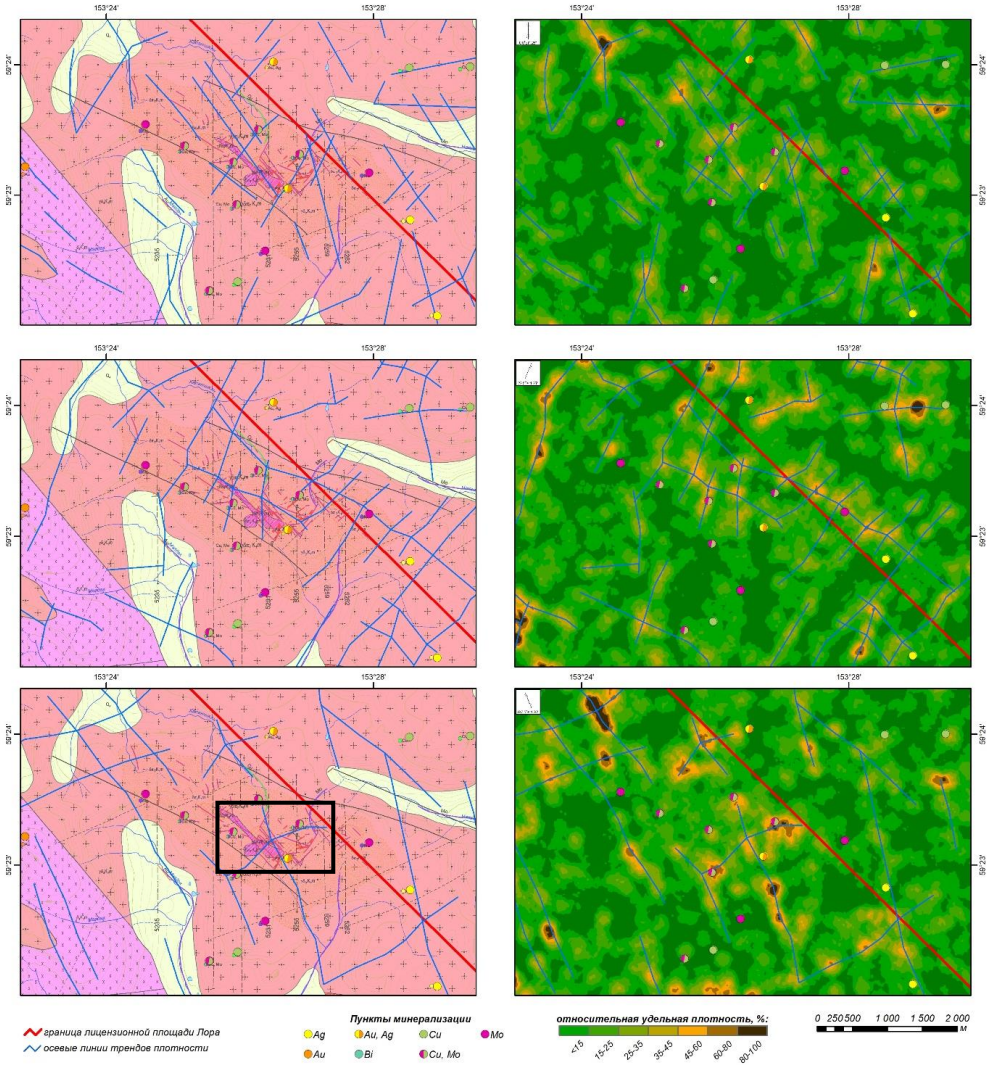
Выявление структурных трендов минерализации, интерпретация аномалий ВП

- Тренды высокой и повышенной плотности линеаментов (структурные тренды – зоны трещиноватости), как правило, пересекают линейные аномалии ВП
- Рудопроявления **Cu**, **Mo**, Au, Ag локализованы в контурах аномалий ВП
- Узлы пересечения структурных трендов совпадают с аномалиями ВП. Наблюдаемые соотношения структурных трендов и аномалий ВП можно объяснить наложением рудоносных структур (отраженных аномалиями ВП) на дорудную структуру разломов и трещин;
- Только некоторые дорудные структуры стали рудоносными.
- **Тренды плотностей линеаментов в контурах аномалий ВП – поисковые коридоры**

Автоматизированный анализ линеаментов при поисках и разведке меторождений

Участок с медно-порфировой минерализацией. Магаданская область

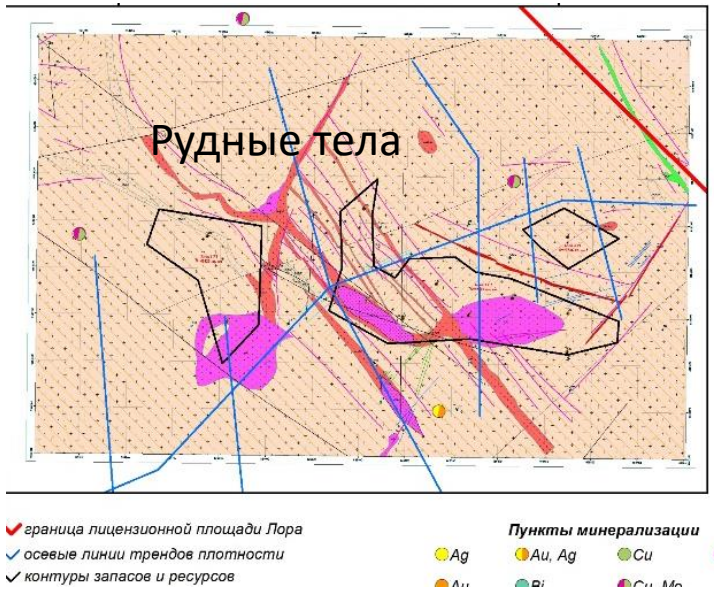
Сопоставление рудоконтролирующих трендов удельных плотностей штрихов с дайками и разрывами

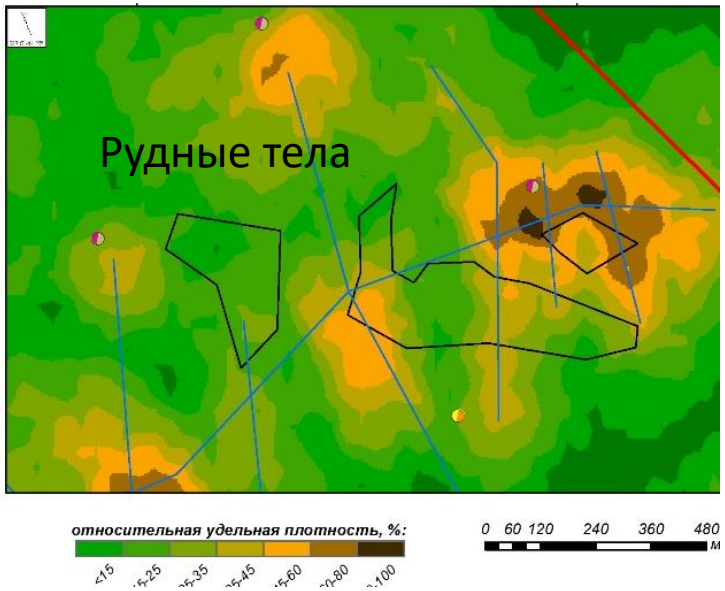


Синими линиями показаны оси трендов удельных плотностей штрихов

Корректировка разведочной сети

- Тренды плотности линеаментов субмеридионального и ССВ простираний совпадают с дайками, разрывными нарушениями СЗ и СВ простираний, контролирующих рудопроявления.
- Эти тренды и узлы их пересечения могут контролировать рудную минерализацию.





- Меридиональные структурные тренды, возможно контролирующие богатую минерализацию, пересекают широтное рудное тело
- При разведке меридиональной сетью вертикальных скважин могла быть пропущена богатая минерализация. Рекомендуется веерное бурение для проверки гипотезы
- Выбрать оптимальные параметры разведочной сети при доразведке рудопроявления

Автоматизированный линеаментный анализ

Заключение

- Автоматизированный линеаментный анализ – эффективный структурный метод при геологическом таргетировании, поисках и разведке рудных месторождений

- Результат - выделение потенциально рудоконтролирующих разрывов и зон трещиноватости, прогнозирование структурных ловушек рудной минерализации, богатых руд.

- Для интерпретации линеаментов используются структурно-геологические, геохимические и геофизические данные

- Результаты интерпретации заверяются в поле геологическим картированием и структурными методами