

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ ВЫЯВЛЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЮЖНОЙ АВСТРАЛИИ

Читалин А.Ф., Агапитов Д.Д
ООО «Институт геотехнологий»

*Конференция ФГБУ ВИМС
«Актуальные проблемы поисковой геологии*

20 ноября 2024 г

Москва



ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2020 г в штате Южная Австралия проводился открытый конкурс **ExploreSA The Gawler Challenge** по методам прогнозирования рудных месторождений с использованием алгоритмов машинного обучения.

Команда специалистов Института геотехнологий и Digital Petroleum принимала участие в конкурсе.

Было 2000 участников из более чем 100 стран. Жюри определило 8 призеров. **Команда ИГТ заняла 9 место.** По некоторым причинам команда из России не могла занять призовое место.

Призеры

1		First Prize: A\$100,000 Per-OZ
2		Second Prize: A\$50,000 Caldera Analytics
3		Student Prize: A\$20,000 Sparveon
4		Breaking New Ground Prize: A\$15,000 Avant Data Solutions
5		Future Data Prize: A\$15,000 Sam Bost
6		Rock Licker Prize: A\$15,000 Jack Maughan
7		Under Cover Prize: A\$15,000 DeMIST
8		Data Prep Prizes: 4x A\$5,000 Caldera Analytics Incerto Data Jack Maughan TriPandas

9



Многими призерами были использованы похожие на наши методы предсказания (использование нейронных сетей с соединением множества карт). В некоторых случаях дополнительно использовались результаты геохимического моделирования и иной набор данных.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Компетентное Жюри конкурса положительно оценило общий подход ИГТ, основанный на сбалансированном использовании геологии и машинного обучения, эвристический подход при анализе различных карт, использование линеаментного анализа геофизических карт:

Comments from the judging panel are presented verbatim:

«Your approach used a diverse set of data and models show good correlations with known deposits and locations with high similarity.

Good overall approach, balancing geology and ML. Front-end of heuristics into maps and lineaments was an interesting choice»

Geological Analysis and Machine Learning for deposits prediction

By:

Andrey F. Chitalin¹, Evgeny E. Baraboshkin², Dmitry V. Sivkov¹, Evgeny V. Fomichev¹,
Andrey S. Mikhaylov¹, Viktoriya Yu. Chikatueva¹, Sergey S. Popov¹, Evgeny M. Grishin¹

(1) Institute of Geotechnology LLC, Moscow Russia

(2) Skoltech, Digital Petroleum, Moscow Russia

Prepared for

ExploreSA
The Gawler Challenge



INSTITUTE OF GEOTECHNOLOGY

Moscow, Russia

July 29, 2020

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

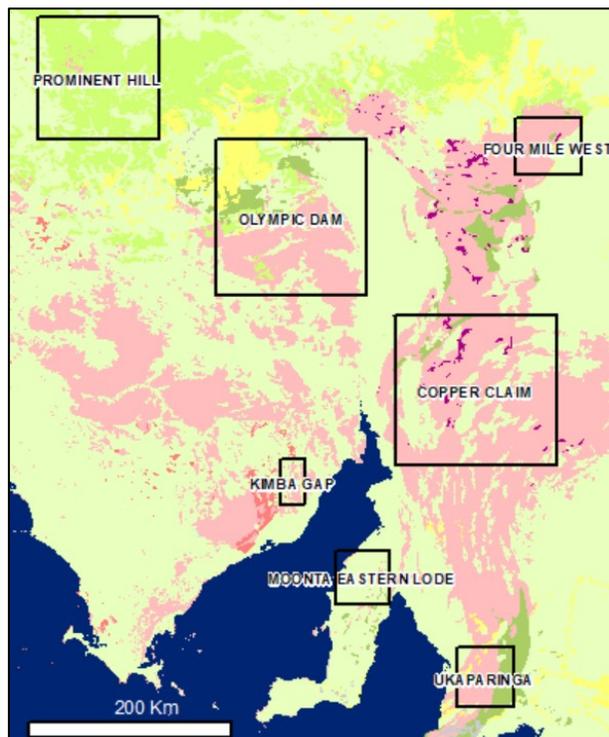
Для использования ИИ важно определить ключевые признаки месторождений и использовать для обучения только те карты и данные, на которых эти признаки проявлены (прямо или косвенно)

1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

- Классификация месторождений
- Определение главных особенностей месторождений
 - Минеральный тип оруденения
 - Метасоматоз
 - Морфология рудных тел - жилы, залежи, штокверки
 - Структурный контроль рудной минерализации
 - рудоконтролирующие структурные парагенезы
 - структурные ловушки
 - структурные тренды минерализации
 - Вторичный контроль рудной минерализации: литологический, стратиграфический, геохимический
 - Геохимические аномалии
 - Геофизические аномалии
- Выбор карт, отражающих главные особенности месторождений



Кластеры изученных месторождений



2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

- Выбор подходящего алгоритма ИИ
- Машинное обучение по картам, валидация
- Машинный прогноз



3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

- Оценка машинного прогноза
- Геологическое таргетирование > выбор перспективных поисковых объектов

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Из Базы Данных

Deposit types	Amount	Deposit classes
Fe	129	
Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions	4	Fe deposits (129)
Deposits related to regionally metamorphosed rocks	118	
Fe skarn deposits	7	
Au	994	
Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions	95	Au deposits (994)
Deposits related to regionally metamorphosed rocks	593	
Deposits related to surficial processes and unconformities	198	
Polymetallic veins	108	
Cu	1377	
Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions	136	Cu deposits (1337)
Deposits related to mafic and ultramafic intrusions in stable environments	67	
Deposits related to regionally metamorphosed rocks	185	
Deposits related to surficial processes and unconformities	871	
Cu-Fe skarn deposits	4	
Olympic Dam Cu-U-Au	24	
Polymetallic replacement deposits	26	
Polymetallic veins	37	
Sediment-hosted Cu	27	
Pb-Zn	267	
Deposits related to regionally metamorphosed rocks	77	Pb-Zn deposits (267)
Deposits related to surficial processes and unconformities	149	
Sandstone-hosted Pb-Zn	3	
Sedimentary exhalative Zn-Pb	15	
Southeast Missouri Pb-Zn	23	
U	188	
Deposits related to felsic phanerocrystalline intrusive rocks	3	U deposits (188)
Deposits related to felsic porphyroaphanitic intrusions	58	
Deposits related to surficial processes and unconformities	57	
Sandstone U	70	

Для геологической классификации месторождений была проанализирована База данных месторождений штата Южная Австралия (3828 записей) и 30 публикаций по австралийским месторождениям в журнале Economic Geology за 2009-2020 г.

Классы месторождений использовались для машинного обучения

Из публикаций:

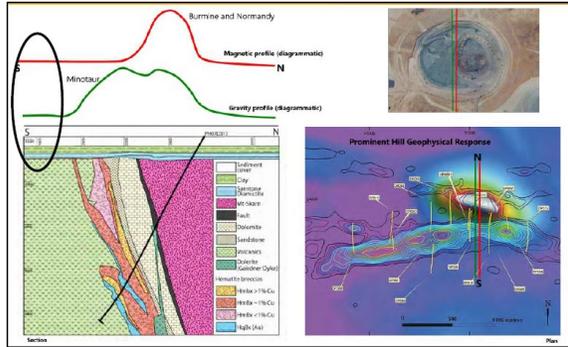
В Австралии известно **8 ОСНОВНЫХ ТИПОВ** гипогенных месторождений:

- IOCG-type (Olympic Dam, Prominent Hill, Moola)
- Orogenic Gold type (Ballarat East)
- Metamorphosed Sedimentary-Exhalative Pb-Zn type (Broken Hill)
- Sandstone-Hosted Uranium type (Beverley)
- Ni-Cu-PGE Sulfide type (Nebo-Babel)
- VMS type (Austin)
- Granulite-Hosted Gold type (Tropicana)
- Epithermal Gold type (Endeavour 41)

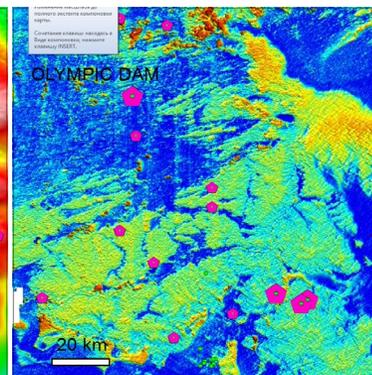
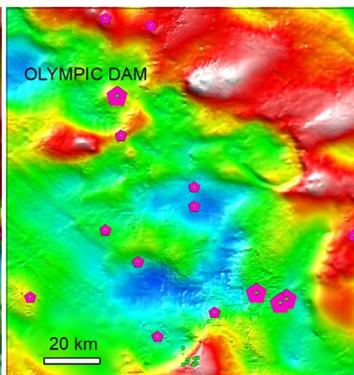
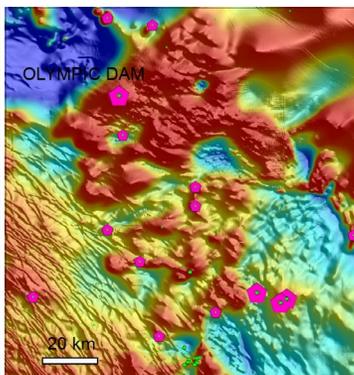
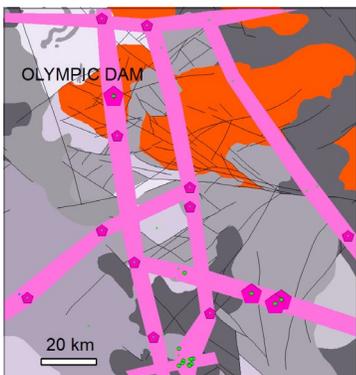
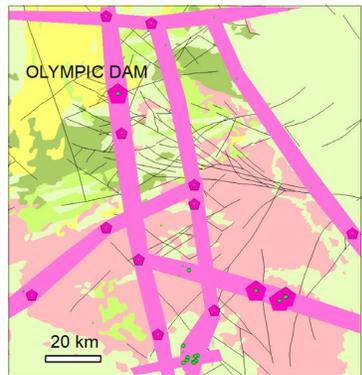
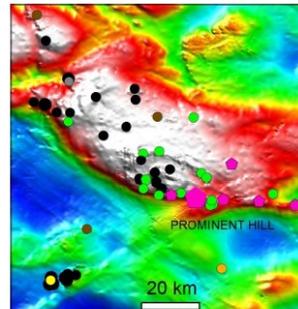
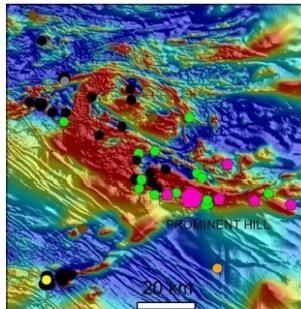
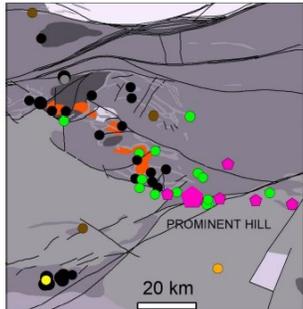
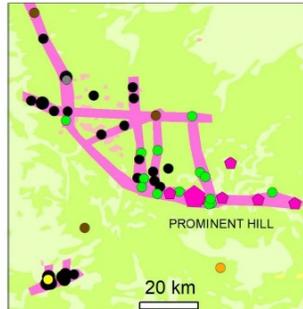
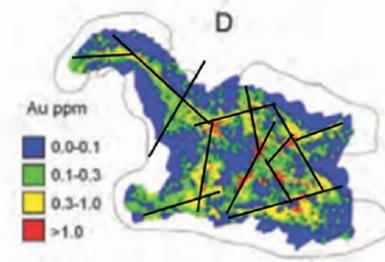
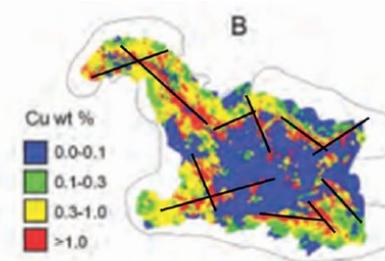
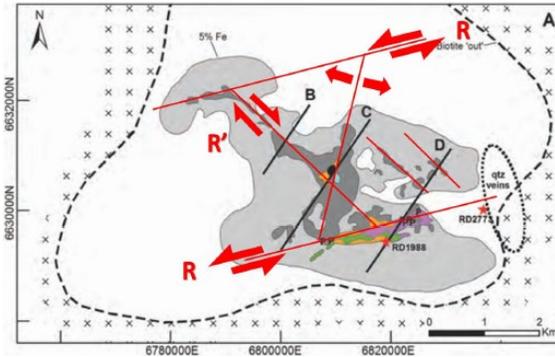


ГЛАВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Prominent Hill



Olympic Dam



- Геологический анализ всех материалов в БД штата Южная Австралия

БД включает информацию по месторождениям и проявлениям, карты: геологические, геохимические, геофизические, спектральные космоснимки Landsat, ASTER, информацию по скважинам, гидрогеологию и др.

- По картам изучались структурно-геологические, геохимические, геофизические предпосылки обнаружения месторождений, проявленность прямых и косвенных признаков минерализации.

- Выделены структурные тренды минерализации

- Оценка пригодности тех или иных карт для машинного обучения и прогноза

РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Рассмотренные примеры минерализации разного типа и возраста в разных геологических провинциях позволяют сделать следующие выводы:

- Месторождения и проявления Cu, Au, Fe, U, Pb-Zn контролируются разломами разного направления, кинематики и возраста, а также структурными трендами (зоны трещиноватости, проницаемости);
- Максимальная концентрация минерализации – в узлах пересечения разломов и структурных трендов минерализации;
- Стратиграфический и литологический контроль минерализации имеет подчиненное значение или отсутствует;
- В магнитном поле и поле силы тяжести минерализация связана как с локальными максимумами (магнетит), так и минимумами (метасоматоз, демагнетизация, зоны разломов);
- На картах магнитных линеаментов выделяются 4 основных направления – N-S, W-E, NW, NE, с которыми связаны проявления и месторождения. Преобладают меридиональные рудоконтролирующие структуры;
- На картах радиогенного калия и урана месторождения могут как ассоциировать с локальными аномалиями положительного и отрицательного знака, так и не обнаруживать видимой связи с аномалиями;
- На карте радиогенного урана месторождения и проявления урана и уран-содержащие месторождения меди отчетливо выделяются положительными аномалиями разной интенсивности. Эти аномалии часто линейные и отражают рудоконтролирующие разломы в фундаменте;

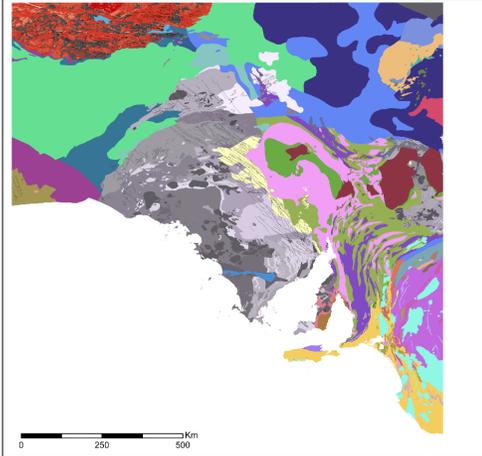
Рассмотренные особенности месторождений и проявлений отражены косвенно на геологических и геофизических картах, которые были использованы нами для машинного обучения и прогноза месторождений.

ГЛАВНЫЙ РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИЙ ФАКТОР – СТРУКТУРНЫЙ !

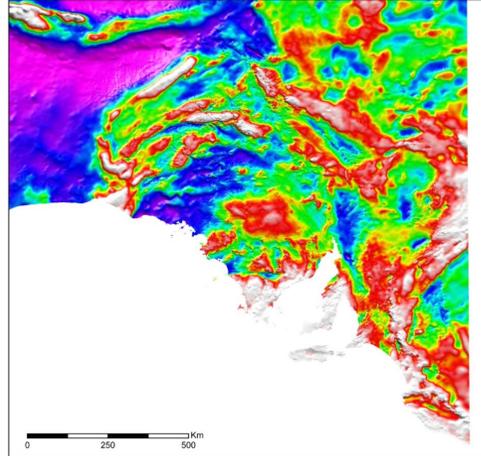
ВЫБОР КАРТ ДЛЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Карты, выбранные для машинного обучения

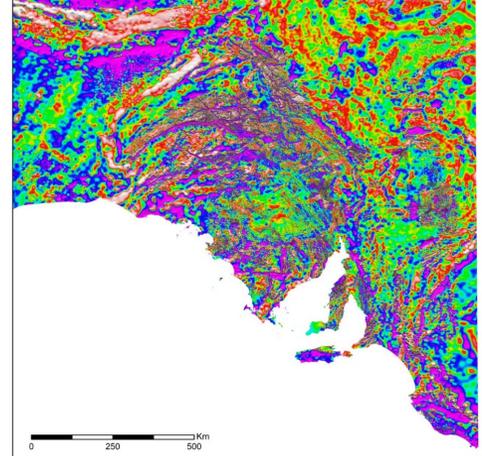
Геологическая карта
фундамента



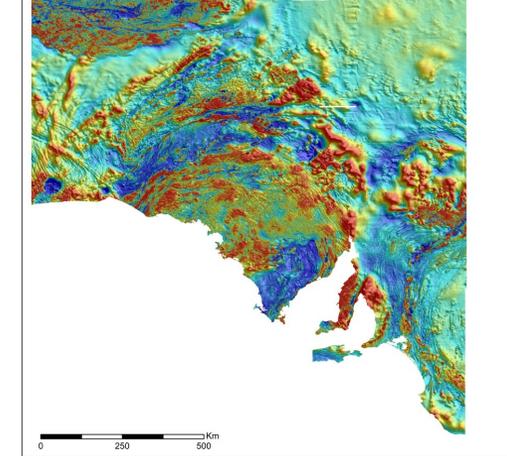
Карта поля силы тяжести



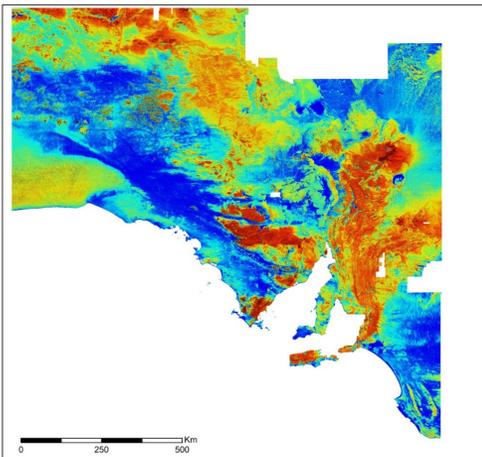
Карта 1-й производной
поля силы тяжести



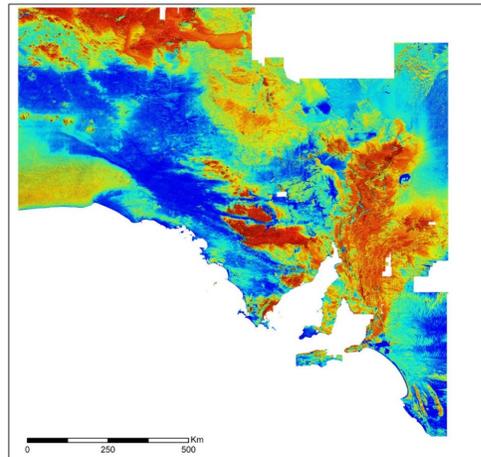
Карта аномального
магнитного поля



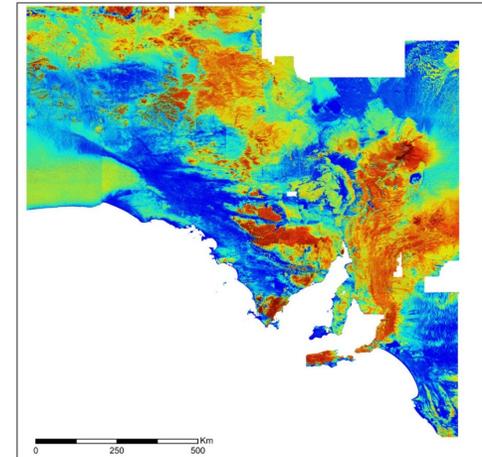
Карта концентрации U



Карта концентрации K



Карта концентрации Th



Также использовались карты месторождений и рудопроявлений различных металлов и типов, сгруппированные по классам металлов.

Для каждого класса точки минерализации показаны черными кружками одинакового диаметра, соответствующим на местности радиусу 720 м. *Средние-крупные месторождения имеют площадь не менее 1 кв. км.*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЛИНЕАМЕНТЫ

Геофизические линеаменты = разломы и контакты геологических тел

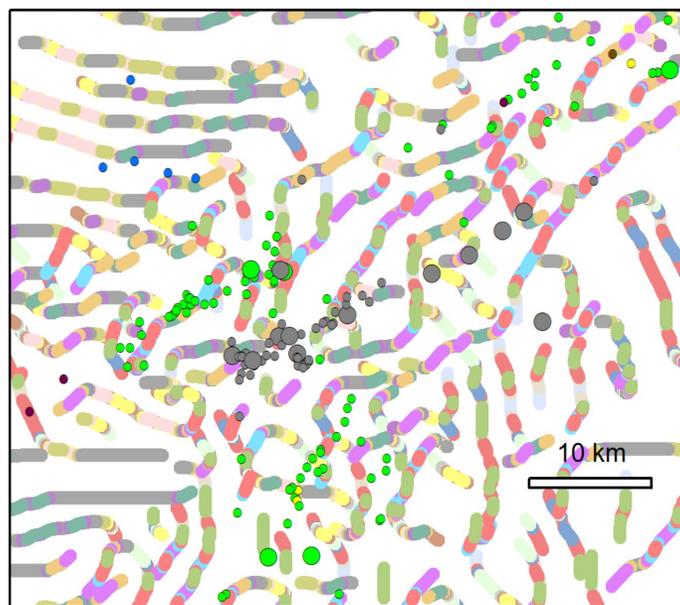
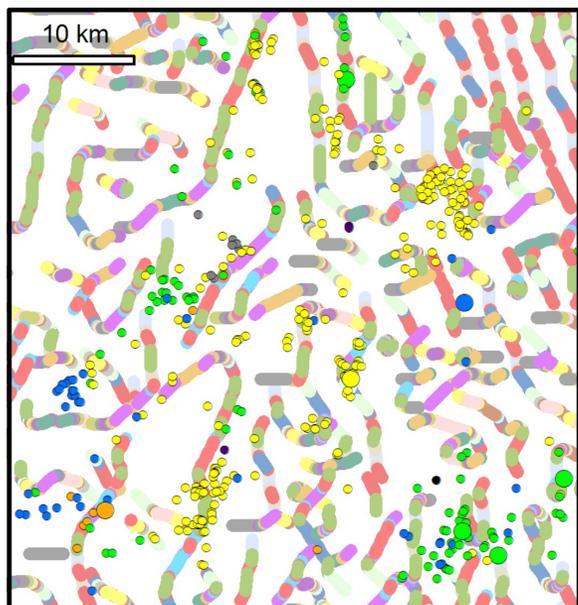
Для оценки связи рудной минерализации разломами и контактами на карте общей интенсивности магнитного поля были выделены

«геофизические» линеаменты по градиентам и линейным аномалиям

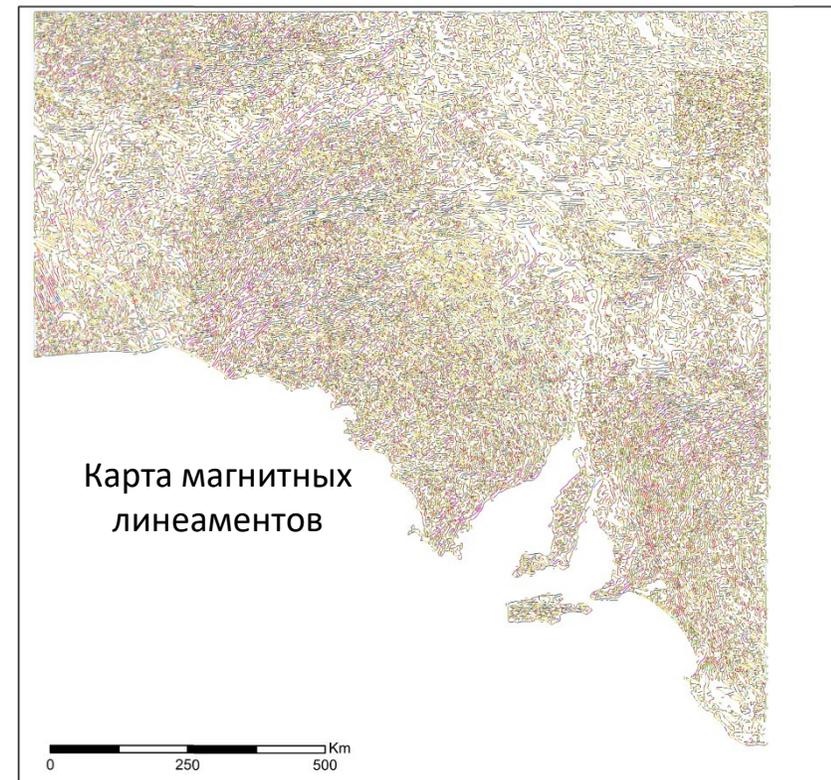
Использовалась программа LESSA

(Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis)

Карта штрихов магнитных линеаментов по азимутам и рудопроявления



- Cu
- Au
- Ag
- Pb
- Zn
- Fe
- U
- ◆ IOCG



Разными цветами показаны участки линеаментов с разными азимутами.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ПРЕДСКАЗАНИЕ

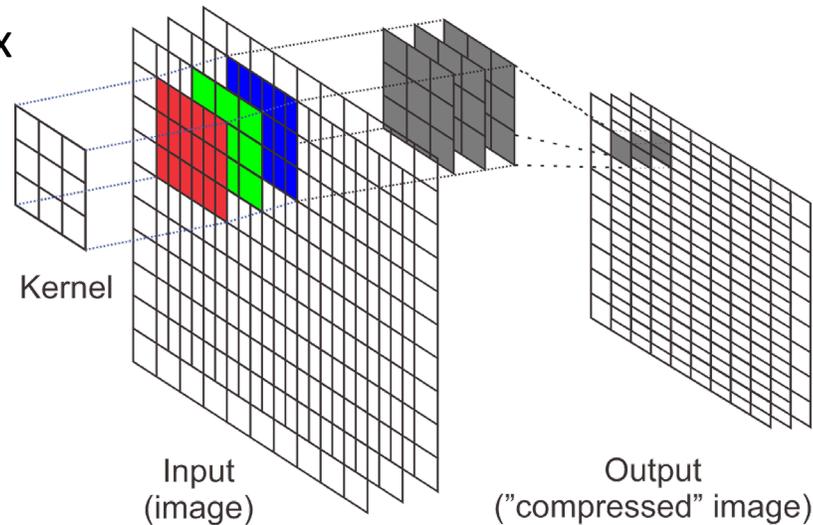
- Литературный обзор
- Выбор лучшего алгоритма СНС
- Подготовка входных данных
- Обучение
- Валидация
- Предсказание

- Используются свёрточные нейронные сети (СНС). В качестве архитектуры СНС была выбрана архитектура AlexNet

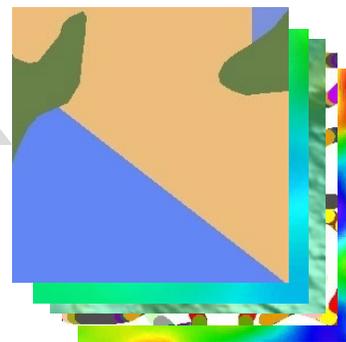
- Применяется методология прогноза месторождений с использованием информации с геологических и геофизических карт.

Granek, J. (2016). Application of Machine Learning Algorithms to Mineral Prospectivity Mapping. University of British Columbia.

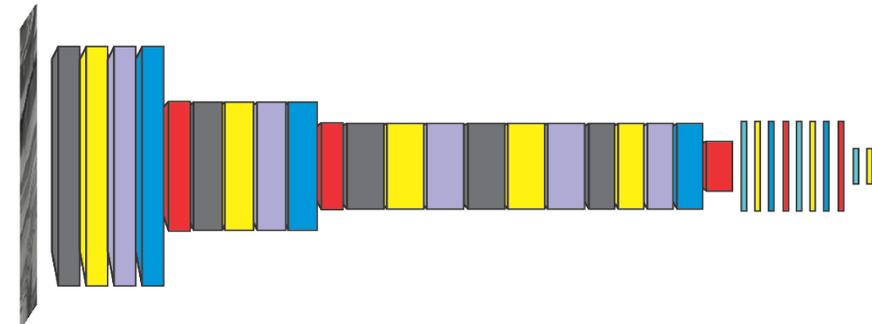
<https://doi.org/10.14288/1.0340340>



Объединение выбранных карт



Tiles extraction



Model training (AlexNet sketch)

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ПРЕДСКАЗАНИЕ

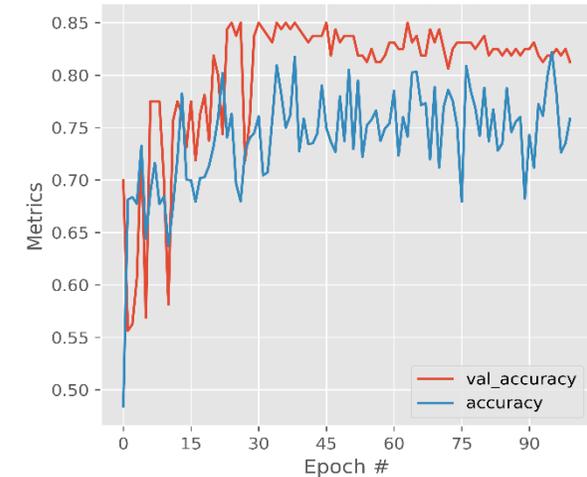
Обучение алгоритма

- Для обучения алгоритма представленные карты были разбиты на одинакового размера участки 256x256px (~22x22 км);
- Из них были отобраны участки с известными месторождениями и рудопроявлениями;
- В результате было получено 447 изображения для класса «месторождение»;
- Аналогичное число изображений было случайным образом отобрано из оставшихся изображений для класса «без месторождений»;
- Финальный размер базы данных для обучения составил **894 изображения**.

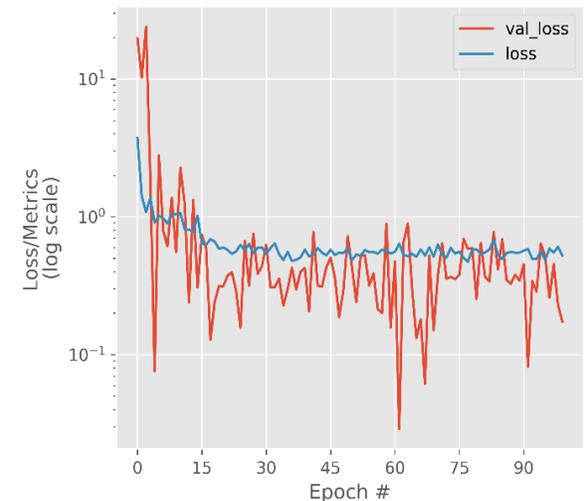
Результат обучения алгоритма

- В результате обучения был достигнут результат в 80% точности на обучающей выборке и 78% на тестовой;
- Это говорит о том, что нейронная сеть не успела переобучиться и при этом хорошо обобщила данные.

Training and validation accuracy plot



Training and validation loss



РЕЗУЛЬТАТЫ МАШИННОГО ПРОГНОЗА

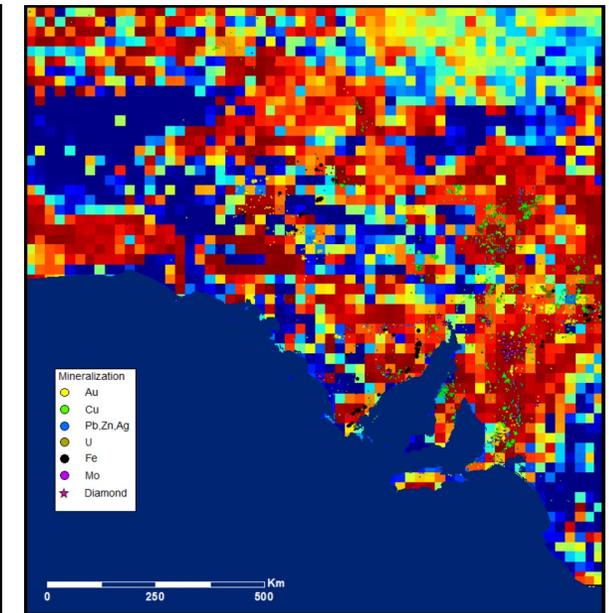
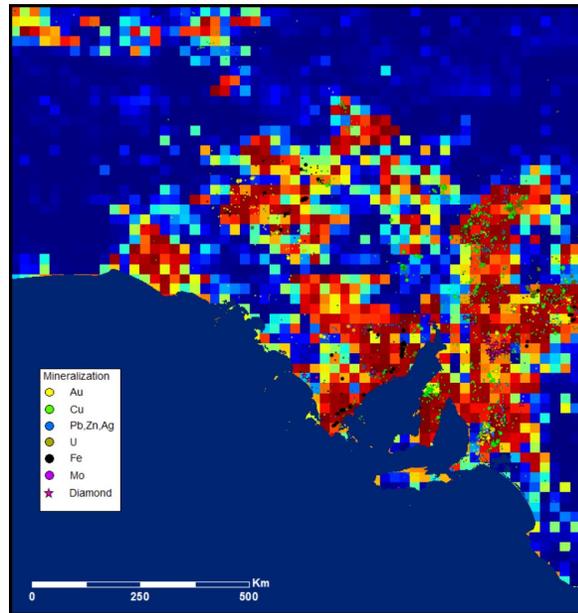
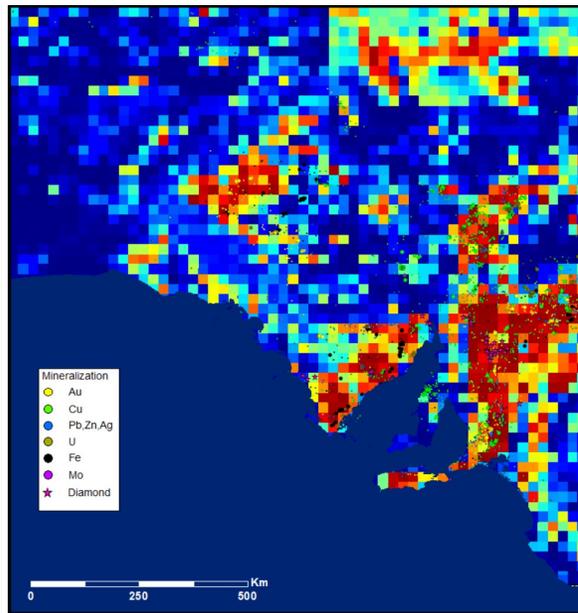
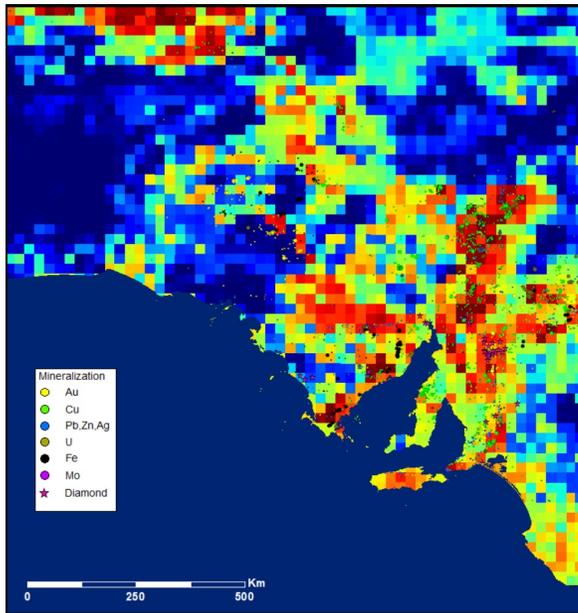
Карты вероятности (региональный прогноз). Окно прогноза 256x256 пикселей (20x20 км).

Cu

Au

Fe

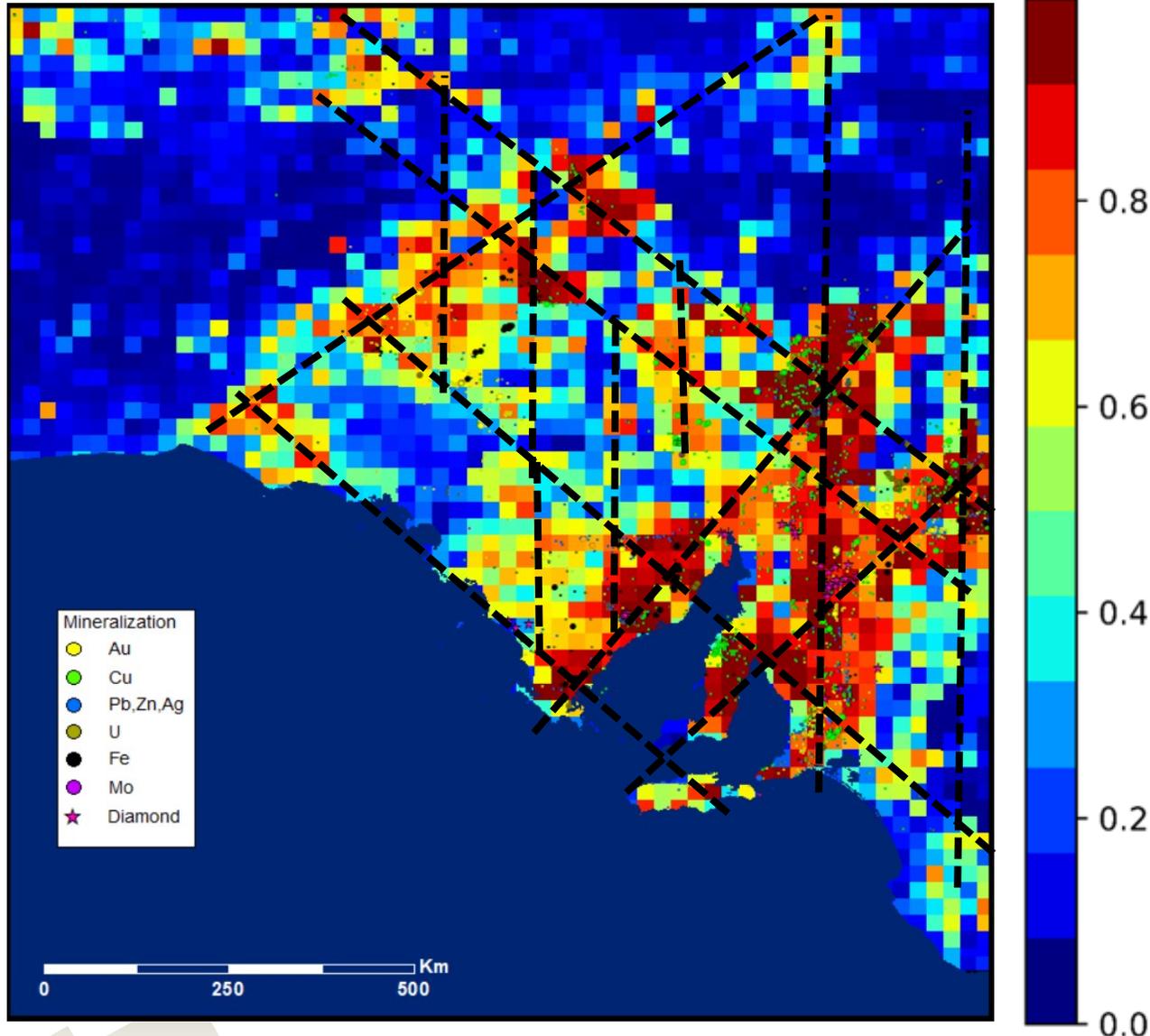
U



Шкала вероятности обнаружения месторождения



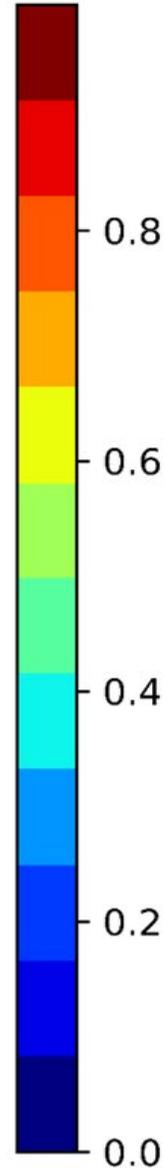
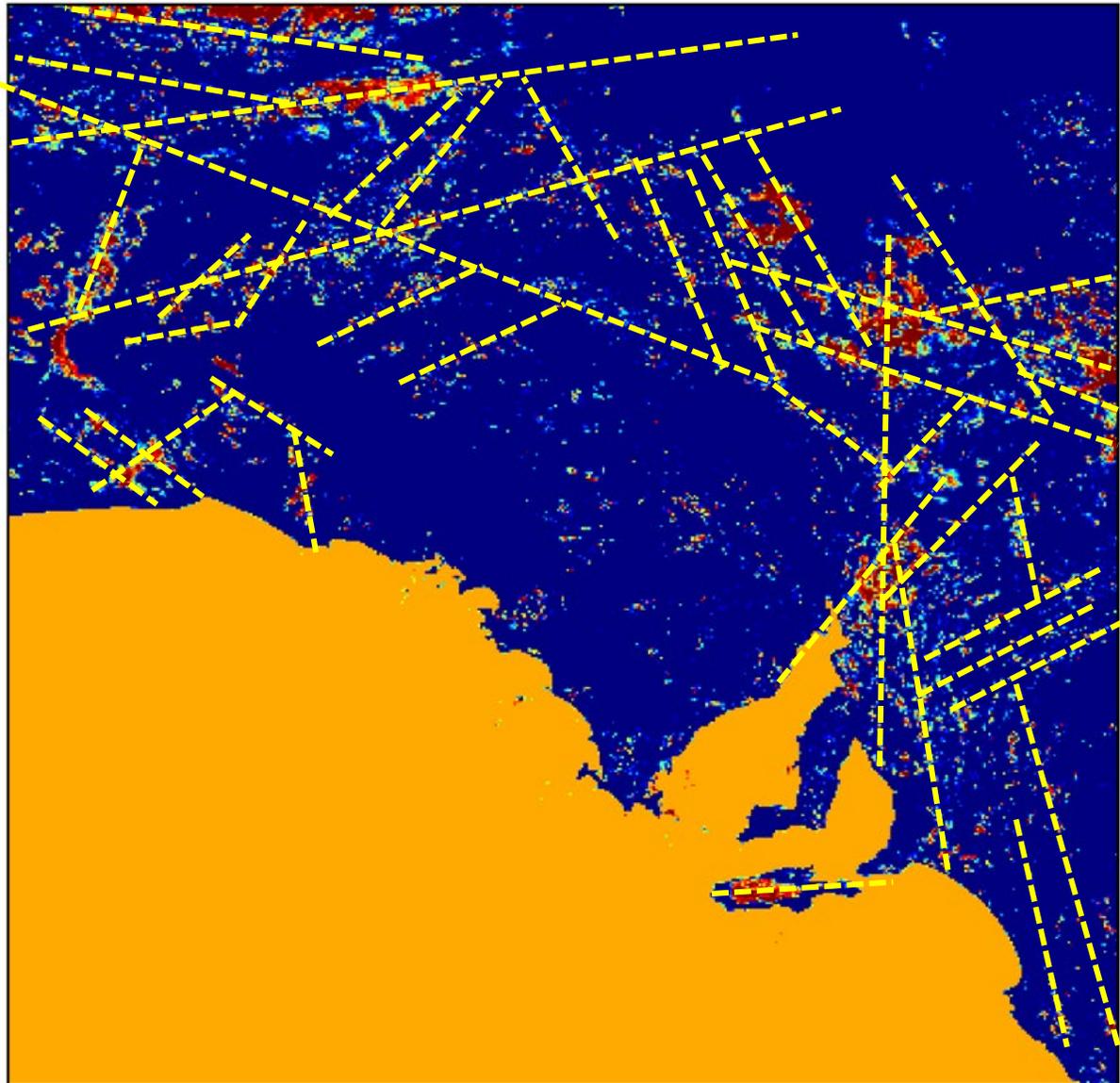
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ



В региональном масштабе при окне прогноза 256x256 пкс (20x20 км) для месторождений всех классов

- Прогнозные площади с высокой вероятностью обнаружения включают известные месторождения и проявления, а также примыкающие к ним области или отдельные области без выявленной минерализации;
- Области высокой вероятности показывают линейно-узловое распределение, отражая региональный структурный план распределение рудоконтролирующих разломов и зон проницаемости;
- Отмечается зональное строение крупных областей вероятностей – выделяется центральная часть более высокой вероятности и периферийная зона более низкой вероятности;
- Преобладает меридиональная ориентировка прогнозных площадей, что соответствует преобладанию меридиональных рудоконтролирующих структур (трендов минерализации).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ



В детальном масштабе при окне прогноза 32x32 пкс. (2x2 км) для месторождений всех классов

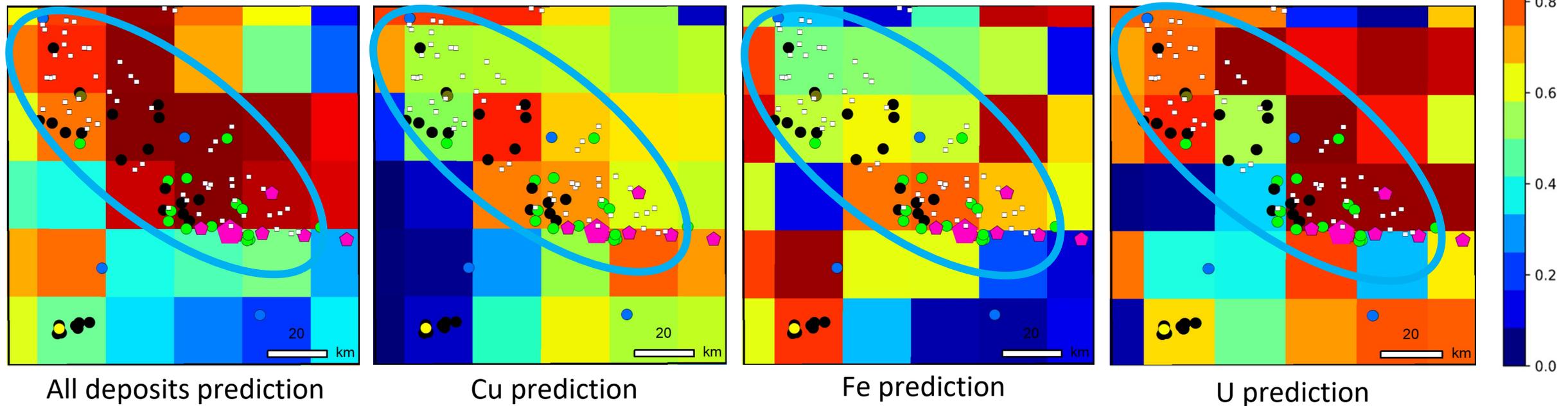
- Области высокой вероятности также включают большинство известных месторождений и проявлений и выходят за пределы их распространения, указывая участки поисков новых месторождений.
- Образуют тренды и кулисные зоны, которые можно интерпретировать как зоны растяжения связанные с региональными сдвигами.
- Отмечаются несовпадения областей высокой вероятности для окна 256 и 32 пкс. Это может быть объяснено исключением карты магнитных линеаментов при обучении с окном 32 пкс, возможны также и другие причины.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение экспертного и машинного прогнозов:

Для участка Prominent Hill в 2019 г А.Ф. Читалиным по результатам экспертного анализа всех данных были намечены скважины (белые квадратики) для поисков месторождений типа IOCG.

С выделенной «вручную» перспективной площадью (голубой эллипс) совпали области высокой вероятности обнаружения месторождений по результатам машинного прогноза:

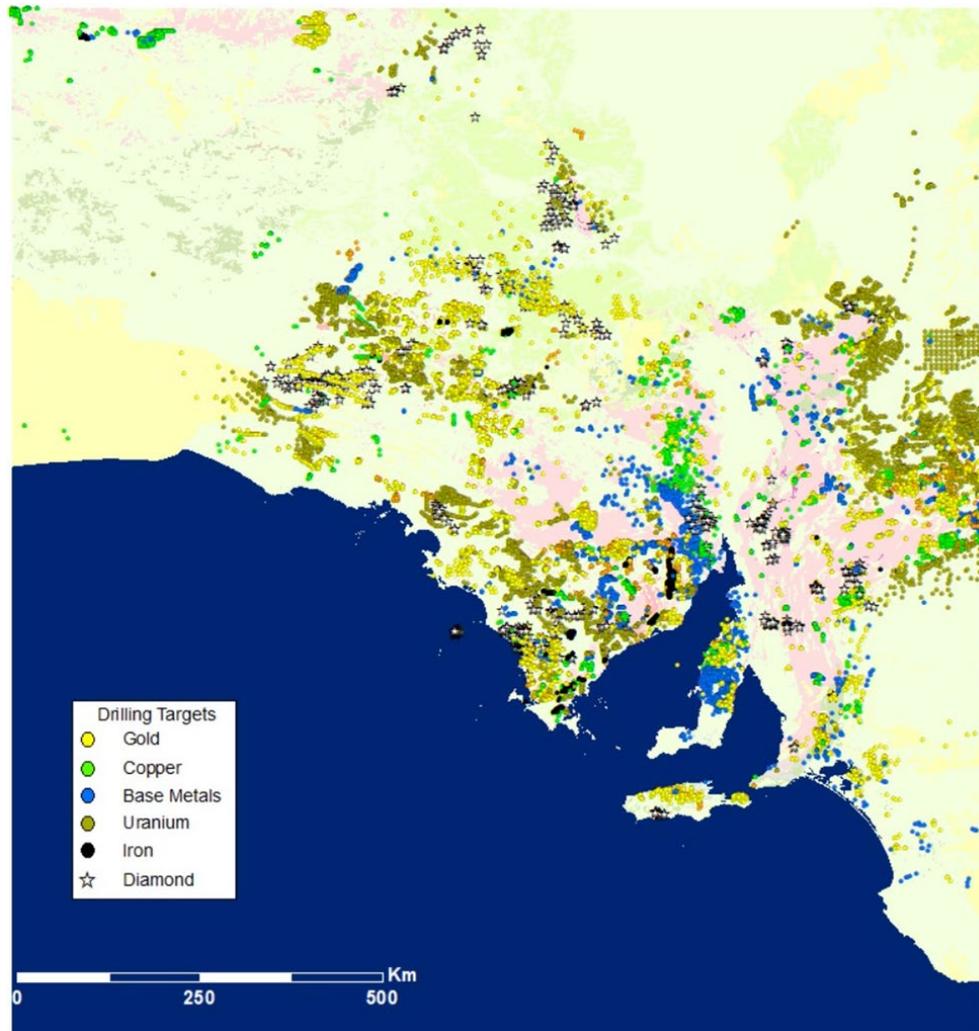


● Cu ● Au ● Ag ● Pb ● Zn ● Fe ● U ● IOCG

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ТАРГЕТИРОВАНИЕ

Таргетирование – выделение наиболее перспективных участков для поисков месторождений

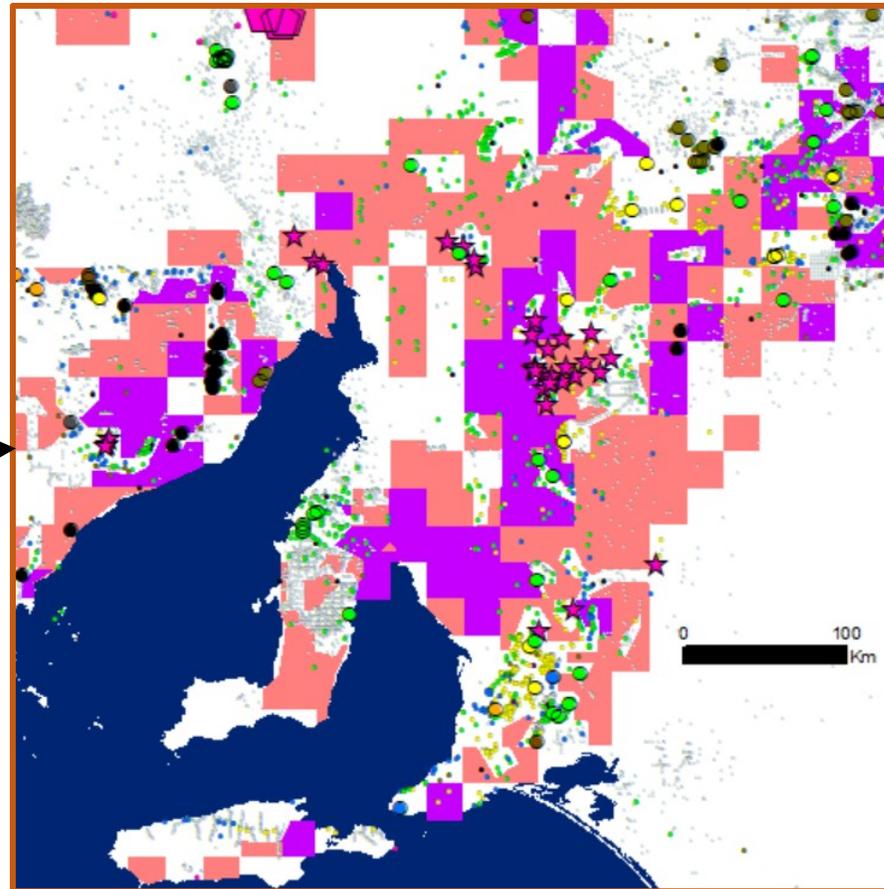
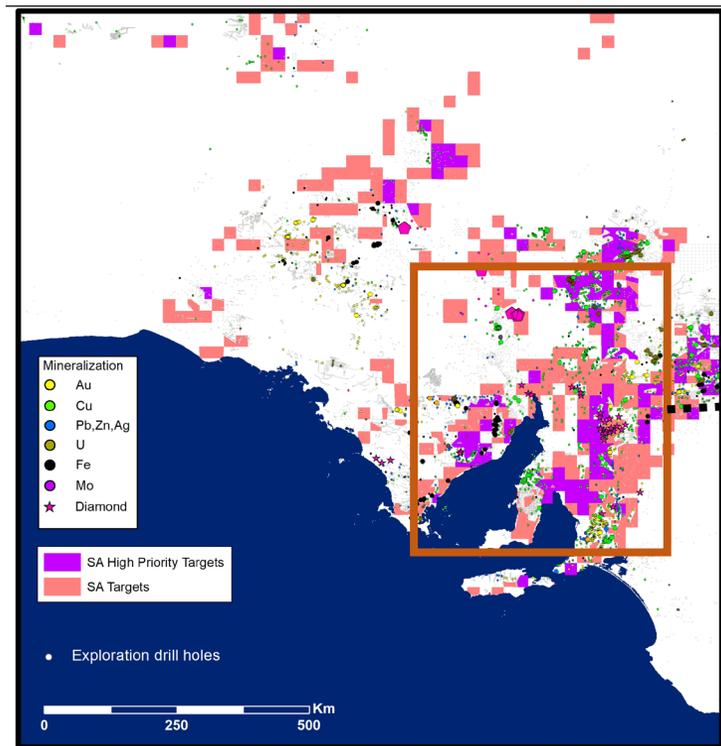
Поисковые и разведочные скважины на геологической карте



- Выделенные перспективные участки с высокой вероятностью прогноза (>70%) открытия месторождений ранжировались по степени изученности бурением;
- На карты прогноза были наложены точки скважин из БД (125 752 поисковых и разведочных скважин на Cu, Au, Ag, Pb, Zn, Fe, U, алмазы);
- К таргетам (наиболее перспективным поисковым участкам) отнесены участки с высокой вероятностью прогноза, но слабо изученные бурением.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ТАРГЕТИРОВАНИЕ

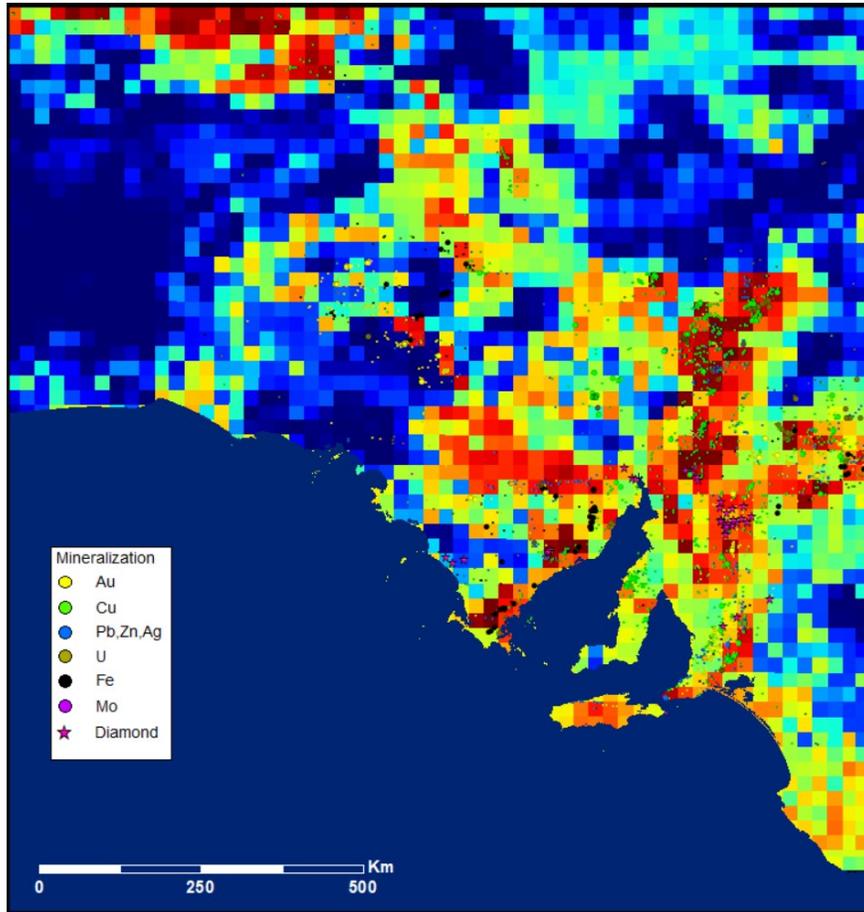
Карта региональных таргетов (рудные узлы, зоны)
для поисков месторождений Cu, Au, Pb-Zn-Ag, Fe, U



- К таргетам отнесены слабо изученные участки с высокой вероятностью прогноза (>70%)
- К таргетам 1-й очереди отнесены участки с высокой вероятностью прогноза (>90%). Они включают месторождения и кластеры рудопроявлений или к ним примыкают
- К таргетам 2-й очереди отнесены обособленные прогнозируемые участки, но без выявленной минерализации и с большой мощностью (>1000 м) МЗ-КЗ чехла.

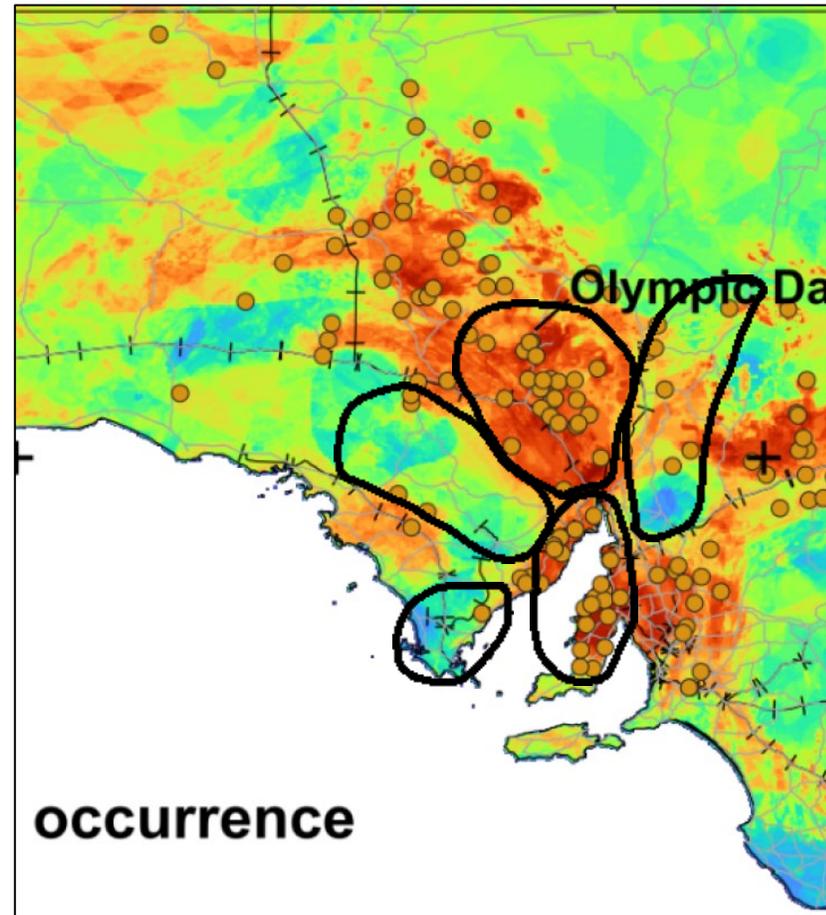
СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МАШИННЫМИ ПРОГНОЗАМИ

Cu



Прогноз по геологическим данным
(Chitalin et al, 2020)

Cu



Прогноз по сейсмическим данным
Jack Muir, Gerrit Olivier, Anthony Reid, 2024. End-to-End Mineral Exploration with Artificial Intelligence and Ambient Noise Tomography

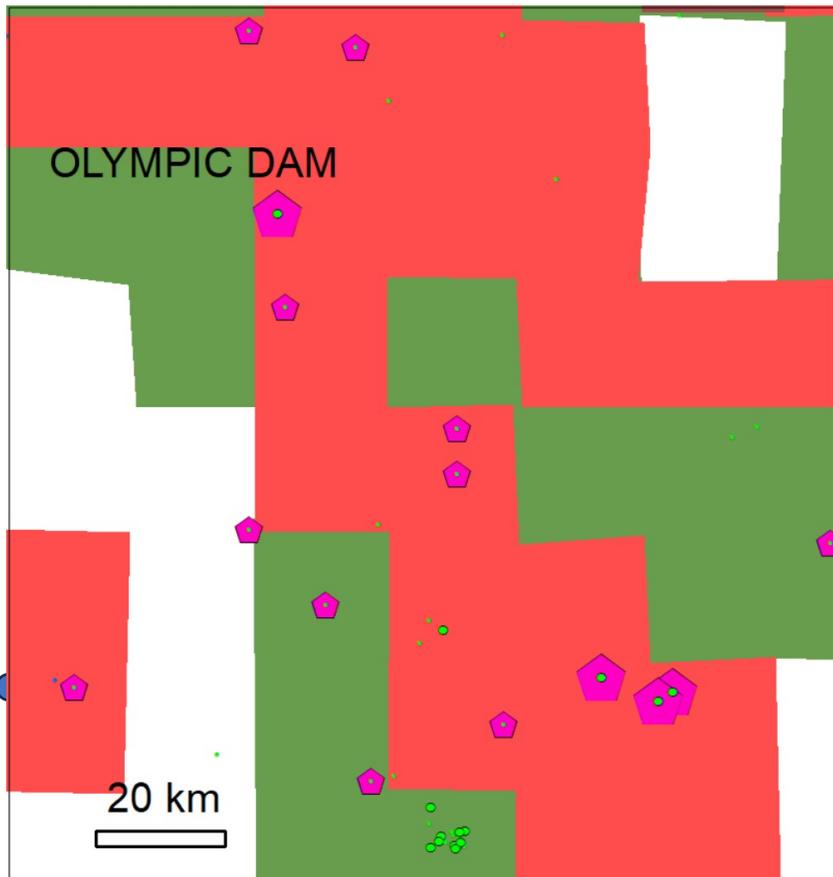


Участки несовпадения геологического и геофизического прогнозов

Прогнозы, выполненные на разных исходных данных, на отдельных площадях сильно различаются!

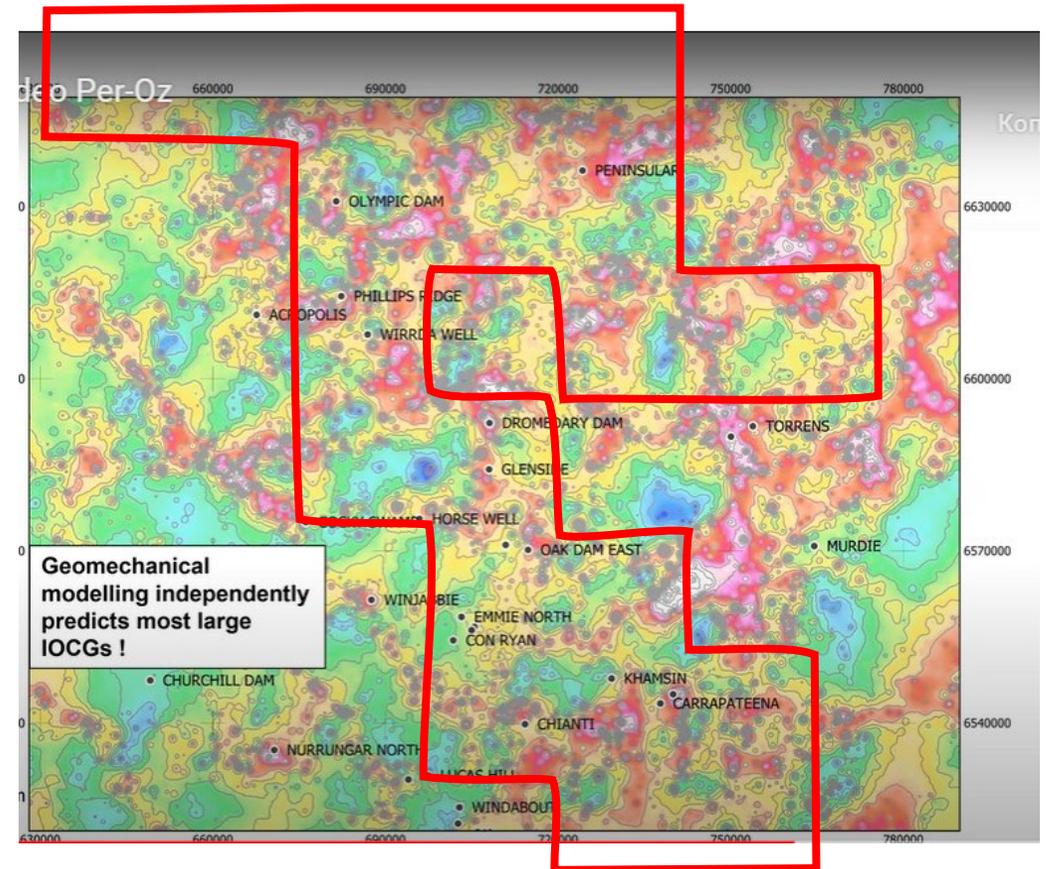
СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МАШИННЫМИ ПРОГНОЗАМИ

IOSG



Прогноз по геологическим данным
(Chitalin et al, 2020)

IOSG



Прогноз по геохимическим данным
(PER OZ, 2020).

Хорошо виден каркас структурных трендов минерализации

- Описанный метод машинного прогноза один из предлагаемых и практикуемых сейчас несколькими десятками компаний в мире;
- **Качественная База Данных – необходимое условие** (верифицированные данные);
- Обязательна комбинация данных полученных с помощью различных методов;
- **Основа эффективного прогноза - геологический экспертный анализ** при подготовке данных для машинного обучения, корректировке в процессе работы и для оценки результатов работы ИИ – привлечение на каждом этапе только опытных экспертов;
- Для выполнения прогноза только данные анализа ДЗЗ практически не имеют прикладного значения, необходима комбинация с геологическими данными;
- ИИ очень быстро развивается и нельзя игнорировать его возможности обработки значительных массивов мультимодальной информации;
- Ошибка – когда во главе решения задачи стоят не геологи, а программисты;
- Волшебной палочки нет. **ИИ пока только перспективный инструмент**, который необходимо учить и контролировать на каждом этапе.



ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИГТ GEO TARGET

ИГТ развивает тему цифрового геологического таргетирования и прогноза распространения зон повышенной минерализации. За основу была взята апробированная нами в Австралии методика комбинированного прогноза с помощью ИИ.

В 2023 г. ИГТ-сервис и ИГТ-Скай Групп вошли в перечень малых технологических предприятий.

GeoTarget состоит из 8 базовых модулей, находящихся на разных этапах разработки.

Gnome Assist *(модуль векторизации);

GeoLog Assist * (модуль документации и верификации первичных данных);

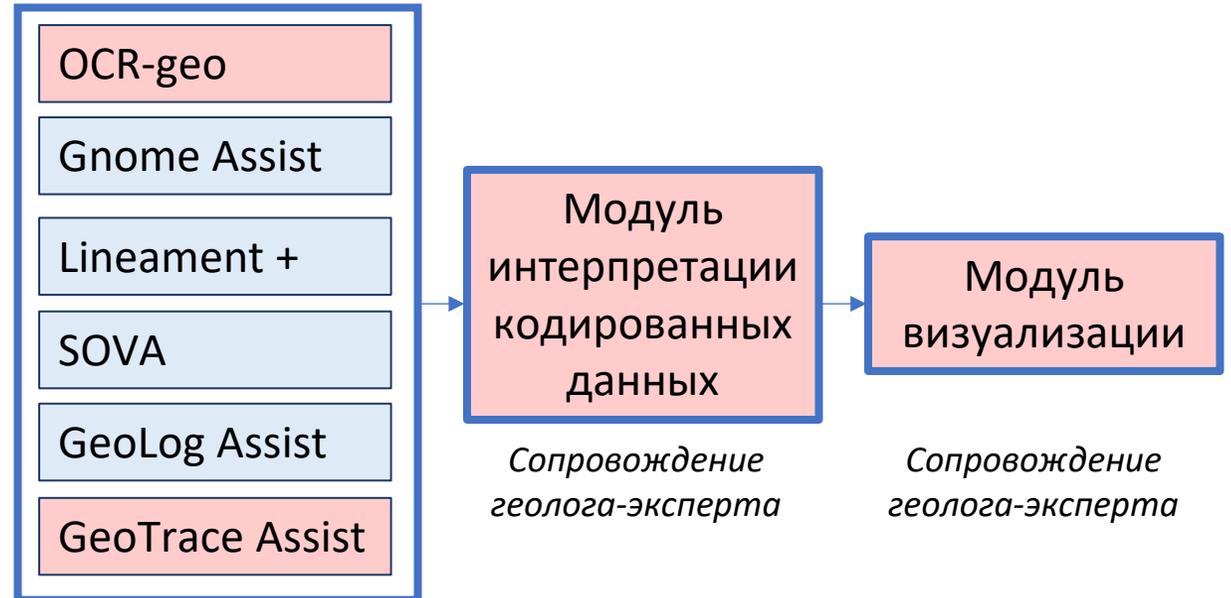
GT Lineament+*(модуль линеаментного анализа космоснимков, БПЛА ортофотопланов и геофизических карт);

SOVA* (модуль мультиспектрального анализа);

4 модуля в разработке

* - зарегистрировано в Росреестр

Сопровождение геолога-оператора





Спасибо за внимание!