

## Оптимизация наземной геофизики для поиска кварцевых золотоносных жил в республике Саха (Якутия)

*Е.Ю. Ермолин<sup>1</sup>, А.В. Мельников<sup>1</sup>, Г.К. Григорьев<sup>1,2</sup>*  
[geophysmethod@gmail.com](mailto:geophysmethod@gmail.com)

<sup>1</sup>г. Санкт-Петербург, ООО «ДЖИ М Сервис», <sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет,

### Summary

A successful example of the discovery of an industrial gold-silver quartz vein zone in Yakutia was presented in the article. The studies were completed on a small area in a short time within a small budget. The cost-effectiveness of the work was achieved through the use of optimal field methods and a versatile approach to interpreting materials. The forecast based on the results of geophysical work was confirmed by drilling.

**Key words:** gold-silver quartz veins, formal forecast, magnetotelluric, gravity and magnetic exploration, formal forecast, neural networks.

### Введение

Работа посвящена оптимизации геофизических исследований при поисках на небольших площадях. Тема данной работы актуальна, поскольку помимо крупных золотодобывающих корпораций на территории России на данный момент существуют и относительно малые предприятия, занимающиеся добычей золота. Как правило, эти компании ведут свою деятельность на небольших лицензионных участках, площадь которых исчисляется первыми квадратными километрами. Бюджеты на проведение геологоразведочных работ у них ограничены. В этом случае адекватный подход к оптимизации работ позволит привлечь новые технологии и повысить шансы для заказчика найти месторождение. Вся идея оптимизации заключается в том, чтобы разделить полевые работы на две стадии и на промежуточном этапе интерпретации применить алгоритмы машинного обучения в дополнение к стандартным технологиям анализа и интерпретации данных.

Авторы не рассматривают свою работу как уникальный случай применения новых технологий, а лишь представляют оптимальное их использование с целью минимизации затрат на нахождение промышленных объектов.

Первая часть оптимизации заключается в том, что в осенне-весенние периоды сервисные геофизические компании имеют малую нагрузку, в этом случае стоимость работ для ряда методов, которые можно применять в зимний период, будет минимальной. После получения данных на первом этапе можно оптимально спланировать второй этап работ на летний период.

Зимой 2021 года перед авторами была поставлена задача выполнить поиск золотоносных кварцевых жил на участке площадью 2 квадратных километра в республике Саха (Якутия). Поисковым объектом в этой области являются так называемые рудные столбы, представляющие собой кварцево-жильные тела, образованные вдоль зоны надвига, имеющей СВ падение под углом от 40 до 70 градусов. Таким образом, целью работ было картирование зоны надвига, определение особенностей проявления в геофизических полях рудных столбов (на основании работ на эталонном объекте), дать прогноз положения рудных столбов в пределах закартированной зоны надвига, назначить детальные работы на участках, в пределах которых наиболее вероятно нахождение рудных столбов, предложить положение буровых скважин.

## Методика работ

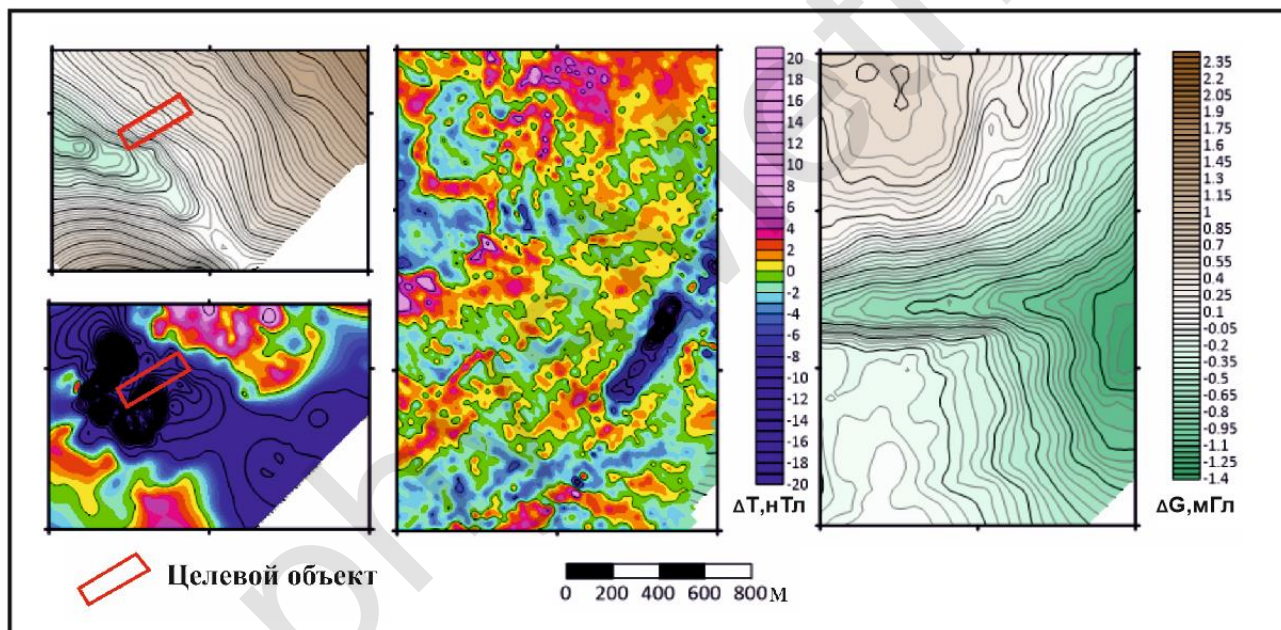
Было предложено разбить исследования на 2 этапа.

Первый этап предполагалось выполнить в ранневесенний период с использованием наземной магниторазведки и гравиразведки.

По результатам интерпретации первого этапа планировалось назначить ограниченное количество электроразведочных профилей с применением методов аудиоманнитотеллуческого зондирования, магнитовариационного профилирования (АМТ-МВП) [1,3,4] и электротомографии с измерением вызванной поляризации (ЭТ-ВП) [2].

Полевые работы методом наземной магнитной и гравиметрической съёмки были выполнены в краткие сроки (со 2 марта по 5 апреля 2021 года включая мобилизацию и демобилизацию команды из г. Санкт-Петербург) тремя сотрудниками сервисной геолого-геофизической компании ООО «ДЖИ М Сервис». Съёмка проводилась на эталонном объекте и на поисковом участке.

Магниторазведочные исследования на поисковом участке выполнены по сети с расстоянием между пикетами – 5 метров и расстоянием между профилями – 25 метров. В качестве рядовых измерителей и магнитовариационной станции (МВС) использовались четыре магнитометра ММРОС-1. На рисунке 1 показана итоговая карта аномального магнитного поля для эталонного (слева) и поискового участка (справа). Объём наземной магнитной съёмки составил 112 погонных километров. Точность съёмки составила 0.7 нТл.



**Рисунок 1.** Карта аномального магнитного и гравитационного поля эталонного объекта (слева) и поискового участка (справа).

Наземные гравиметрические наблюдения также выполнялись на двух участках. На поисковом участке съёмка была выполнена по сети 50 метров на 50 метров (расстояние между пикетами – 50 метров, расстояние между профилями – 50 метров). На эталонном участке с целью покрытия большей площади на периферии от рудного столба сеть была разрежена до 200 метров. Общее количество физических наблюдений (ф.н.) гравиметрической съёмки составляет 1092 ф.н.

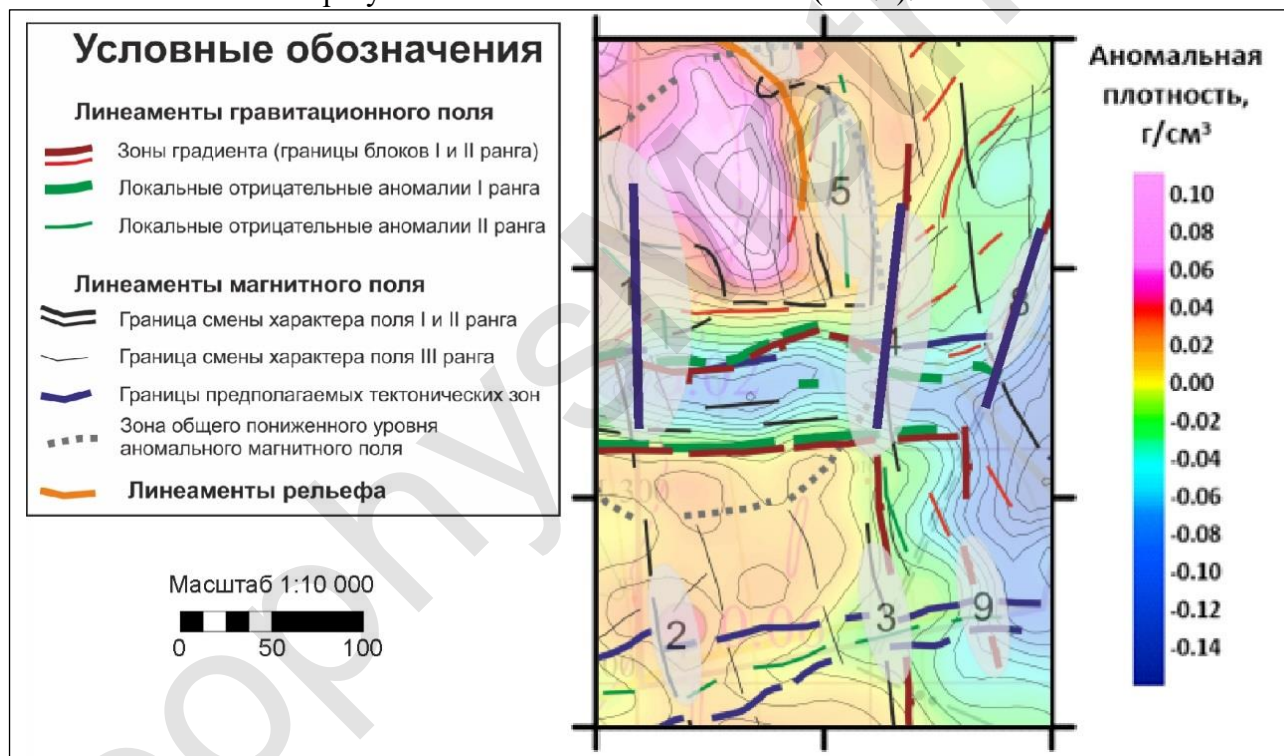
Работы выполнялись с использованием автоматического микропроцессорного гравиметра CG-5 Autograv, разработанного канадской компанией Scintrex Ltd. В ходе съёмки на каждом рядовом гравиметрическом пункте производились 3 (три) цикла измерений продолжительностью по 30 секунд каждый. Все 3 значения на рядовом пункте не отличались более чем на 15 мкГал. На опорном гравиметрическом пункте производились от 6 до 9 циклов измерений продолжительностью по 30 секунд. Значения на опорном пункте не отличались

более чем на 10 мкГал. Каждый маршрут начинался и заканчивался измерениями на ОГП. Контроль измерений осуществлялся путём выполнения повторных измерений на рядовых гравиметрических пунктах, на которых ранее уже были сделаны измерения в предыдущие дни. Среднеквадратическое отклонение составило 0.012 мГал.

Топогеодезическое обеспечение (привязка точек наблюдений) осуществлялось при помощи дифференциальной спутниковой системы Spectra Precision ProMark. Для обеспечения дифференциального режима использовалось три GPS-устройства: одно в качестве базовой станции для определения поправок, ещё два использовались для измерений на рядовых пикетах. Базовая станция устанавливалась на закреплённых на местности точках с известными заранее координатами. Поправки вводились после считывания данных с обоих устройств. Точность определения вертикальной координаты составила 1.3 см.

### Анализ и интерпретация данных

Для анализа данных использовались трансформации аномального магнитного поля и аномального гравитационного поля в редукции Буге (далее по тексту «гравитационного поля»). Для количественной интерпретации использовались только данные гравиразведки ввиду очень малых амплитуд локальных аномалий магнитного поля (до 3-4 нТл). 3D инверсия данных гравиразведки выполнена для поискового участка. В качестве итоговой структурной схемы использовались результаты линеаментного анализа (Рис.2).



**Рисунок 2.** Структурная схема поискового участка по результатам линеаментного анализа

На этом этапе оптимизация заключается в том, чтобы без увеличения стоимости интерпретации повысить контроль прогноза. Дело в том, что интерпретация в ряде случаев может быть субъективной и зависит от опыта и навыков интерпретатора. Для контроля был применён алгоритм формализованного геологического прогноза методом машинного обучения с использованием нейронных сетей (рис.3) за авторством Григорьева Г.К.

В данном алгоритме входными данными является набор матриц геофизических полей и их трансформанты, приведённых к одинаковым координатам и шагу сетки. Как следствие, на вход сети подаётся массив размером  $a \times a \times n$ , где  $a$  — размер скользящего окна,  $n$  — количество входных матриц.

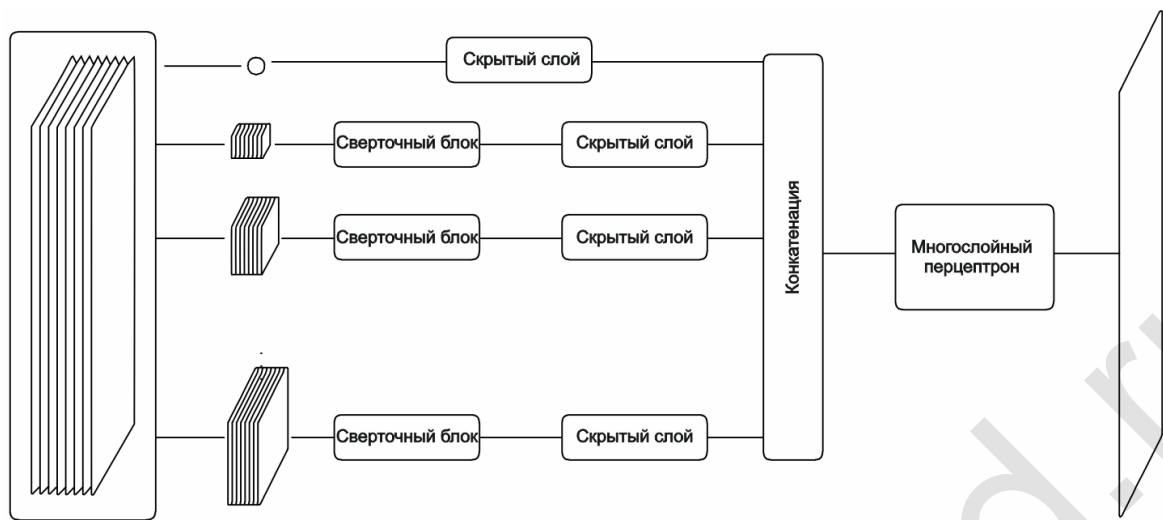


Рисунок 3. Блок-схема архитектуры нейронной сети.

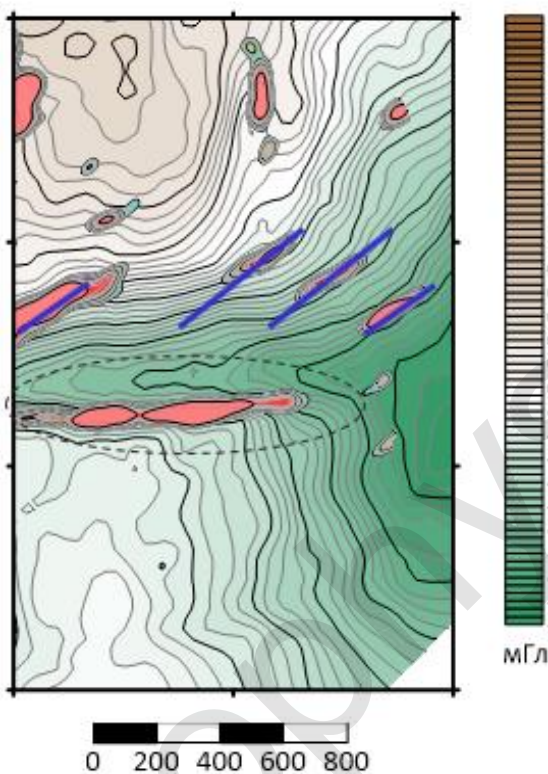


Рисунок 4. Результаты формализованного прогноза

Данные входного окна параллельно подаются на различные свёрточные блоки, где обрезаются до различных размеров и усредняются. Затем в скрытых блоках формируются наборы последовательных дискретных фильтров (ядра свёртки), формируя тем самым различные зависимости для каждого масштаба. Данный подход позволяет учитывать морфологию входных признаков для аномалий различного масштаба. Параллельно данные признаков из центральной точки окна обрабатываются на отдельном перцептроне, добавляя зависимость для учёта точечных данных.

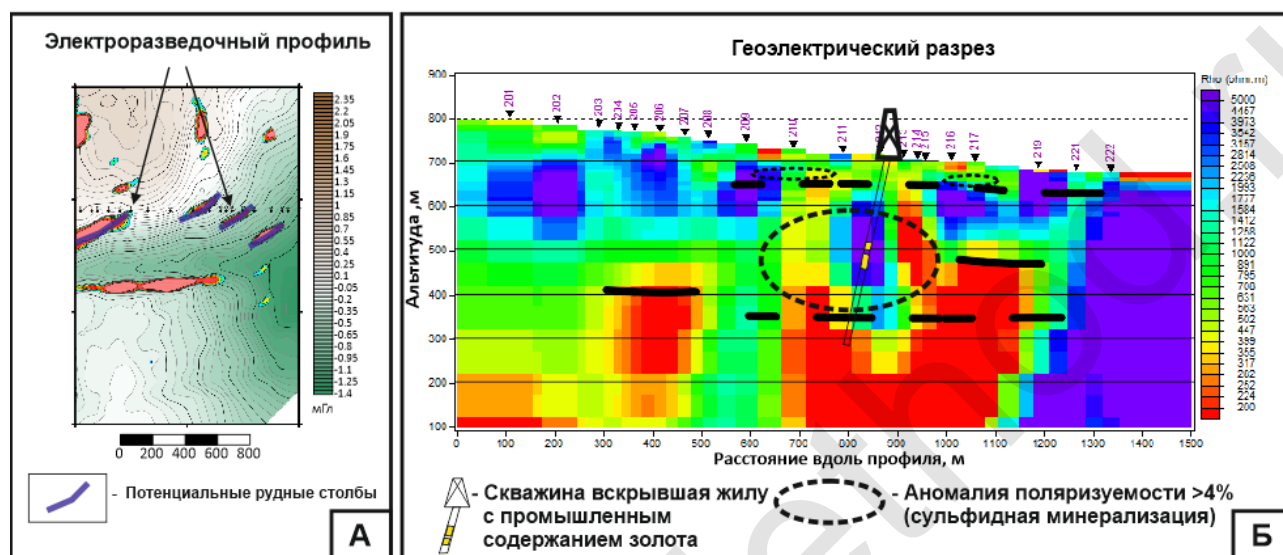
Выходные данные вышеописанных блоков сети подаются на единый многослойный перцептрон, который находит общую для них зависимость и имеет одно выходное значение от 0 до 1.

В результате севернее явного надвига мы обнаружили зоны, которые по структурным признакам более схожи с известным объектом (Рис.4). (синие линии). На рисунке 4 пунктирным овалом обозначена предполагаемая зона надвига, розовыми контурами выделены зоны со степенью схожести с эталонным объектом более 0.8.

По окончании первого этапа, в рамках оставшегося бюджета мы наметили и выполнили профиль электроразведочных работ. Это была комбинация методов аудиоманнитотеллурического зондирования, магнитовариационного профилирования, метода сопротивлений и вызванной поляризации. Магнитотеллурические исследования выполнялись с использованием аппаратуры канадской компании Phoenix Geophysics. Работы методом сопротивлений и вызванной поляризации выполнены по методике вертикального электрического зондирования с разносами  $AB/2$  до 300 метров. Использовался генератор Астра 100 и измеритель MARY SMART производства компании Северо-Запад (Москва). Положение профиля показано на рисунке 5А.

## Результаты

В результате совместной 2D инверсии данных АМТ, метода сопротивлений и вызванной поляризации был получен геоэлектрический разрез с явно выраженной зоной повышенного сопротивления (Рис. 5Б). Мы рекомендовали эту зону для заверки бурением. В начале 2022 года в этой перспективной области были проведены буровые работы, по результатам которых найдена кварцево-жильная зона с промышленными содержаниями золота.



**Рисунок 5.** А - Намеченный профиль по результатам первого этапа работ (слева).  
Б - геоэлектрический разрез с фактическим расположением заверочной скважины.

## Заключение

В труднодоступном районе России (республика Саха) в краткие сроки сервисной геолого-геофизической компанией «Джи М Сервис» выполнен комплекс геофизических исследований на небольшом лицензионном участке. Работы включали наземную магниторазведку, гравиразведку, аудиоманнитотеллурическое зондирования, магнитовариационное профилирование, метод сопротивлений и вызванной поляризации. Особенностью интерпретации данных было применение метода формализованного прогноза. Результат демонстрирует ситуацию, когда грамотный подход к оптимизации проведения полевых работ и интерпретации данных позволил успешно решить задачу за малый бюджет. По прогнозу геофизических данных была пробурена скважина, которая вскрыла кварцево-жильную зону с промышленным содержанием золота.

## Библиография

1. Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I. [2008] Models and methods of magnetotellurics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
2. Ermolin, E., Kulikov, V., Melnikov, A., Asoskov, A. [2020] Features of experimental-methodical electrical exploration studies at the MSU training area (Aleksandrovka village). Engineering and Mining Geophysics 2020 - 16th Conference and Exhibition (Abstract)
3. Ermolin, E., Savichev, A. and Ingerov, I. [2016] Additional exploration of gold deposit in Chukotka by AMT and MVP. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP (Abstract)
4. Ermolin, E., Ingerov, O. and Savichev, A. [2018] Integration of the AMT in Ls-epithermal Au-Ag Veins exploration in Chukotka region. Engineering and Mining Geophysics 2018 - 14th Conference and Exhibition (Abstract)