

Рациональное планирование геологоразведочных работ при поисках медно-порфировых объектов на территории Мэлдэкской интрузивно-купольной структуры (Магаданская область) на основе трёхмерного геолого-геофизического моделирования и использования нейросетей

В работе приводится описание метода, позволяющего на основе трёхмерного математического моделирования, статистических методов и искусственного интеллекта принимать решение об эффективности использования различных геофизических измерений. В качестве эталона рассмотрены несколько хорошо изученных медно-порфировых рудопроявлений, для которых вычислены закономерности между петрофизическими, определяемыми по результатам геофизических измерений (магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления, вызванной поляризуемости и др.) и геолого-геохимическими параметрами.

Верификация метода осуществлялась для района Мэлдэкской купольной структуры, где сосредоточены рудопроявления разного типа, при этом данная территория специалистами оценивалась как слабоизученная в геологическом отношении. Детальные исследования проводились на участках Лора и Тальниковый. Для них построены априорные эталонные модели. Результаты моделирования свойств применены к проектированию полевого эксперимента для нового участка – Шхиперская площадь. Объекты на них в настоящее время находятся на стадии поисков и оценки.

Ключевые слова: медно-порфировые месторождения, Магаданская область, планирование полевого эксперимента, трёхмерное геолого-геофизическое моделирование, нейронные сети.

ИВАНОВА ИРИНА ИГОРЕВНА, геолог, anisimovaii@yandex.ru

Росгеология, Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» (АО «СНИИГГиМС»), г. Новосибирск

Rational planning of geological exploration for porphyry copper objects within the Meldek intrusive-dome structure in the Magadan Region, based on application of 3D geological and geophysical modeling and neural networks

I. I. IVANOVA

Rosgeologiya, Joint Stock Company "Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources" (JSC "SNIIGGIMS"), Novosibirsk

The article describes a method that makes it possible to decide, based on the 3D mathematical modeling, statistical methods, and artificial intelligence, on the effectiveness of application of various geophysical measurements. Several well-studied porphyry copper prospects were used as reference objects, for which regular relationships were calculated between the petrophysical parameters, determined using geophysical techniques (magnetic permeability, electrical resistivity, induced polarization, and others), and the geological and geochemical parameters.

Verification of the method was carried out for the region of the Meldek dome structure, where ore occurrences of various types were concentrated, the area assessed by specialists as poorly studied in terms of geology. The detailed studies were carried out at the Lora and Talnikovoy prospects. A priori reference models were developed for them. Results of the modeling of the characteristics were applied to the planning of a field experiment for a new site, namely the Shkhiperskaya area. Objects at this area are currently at the exploration and assessment phase.

Key words: porphyry copper deposits, Magadan Region, field experiment planning, 3D geological and geophysical modeling, neural networks.

Введение. Большой объём накопившихся данных по геофизическим исследованиям и результатам бурения, выполненного на рудных месторождениях, позволяет применять перспективные методы машинного обучения как для оптимизации работ, рассчитывая производительность разных схем измерения и стратегии выполнения работ, так и для интерпретации полученных материалов. Однако большинство существующих разработок применения машинного обучения предназначено для нефтегазового сектора, с другим типом данных и размером области. Расчёты для рудных объектов в них выполнять не представляется возможным. Для моделирования и использования нейронных сетей для рудных объектов разработана платформа, построенная на базе хранилища большого объёма данных. Наиболее важная опора этой системы – способность преобразовывать различные типы данных с помощью соответствующего метода в единую конечноэлементную сетку, для тесной связи их с результатами бурения. В качестве примера рассмотрим медно-порфировые месторождения, являющиеся самым важным в мире источником меди, на долю которых приходится более 60% годового мирового производства и около 65% известных ресурсов меди. Также они являются важным источником других металлов, особенно молибдена, золота и серебра, в ряде месторождений попутно извлекают рений, теллур, элементы платиновой группы, мышьяк и цинк. Несмотря на относительно низкие содержания компонентов в рудах месторождений медно-порфирового типа, они имеют значительное социальное и экономическое значение, что особенно важно для развития таких регионов, как Магаданская область. Медно-порфировые месторождения образовывались повсеместно большую часть истории Земли начиная с архея, обычно в верхней части земной коры в тектонически активных конвергентных окраинах, на глубине 5–7 км. Вулкано-плутонические пояса восточных районов России являются естественным элементом Тихоокеанского складчатого обрамления, с которым связаны крупнейшие месторождения медно-порфирового типа. Выявленные в последние годы на востоке России весьма крупные месторождения Малмыж и Песчанка позволяют высоко оценивать перспективы региона.

В качестве объекта исследований выбран район работ Мэлдэксской интрузивно-купольной структуры, располагающийся в пределах Охотско-Чу-

котского вулкано-плутонического пояса на полуострове Кони-Пьягина. В её пределах выявлены и хорошо изучены рудопроявления: Тальниковый, Лора, Рыжик, Прямой, Крутой, Верный. Данные измерений с названных объектов использованы как обучающие. Южнее вышеописанных рудопроявлений в 2021–2022 гг. выполнены полевые геолого-геофизические измерения на участках Сульфидный и Мандычан Шхиперской площади (рис. 1). Результаты данных измерений использованы как тестовые.

Общие геологические сведения о районе работ. Площадь исследований отнесена к внутренней зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Геологические особенности территории характеризуют её причастность к зоне сочленения континентальной и океанической плит (зона Беньоффа) островодужного типа и определяются принадлежностью к двум крупным геологическим структурам мезозой: Нюрчанскому вулканогенному прогибу и Кони-Пьягинскому магматогенному поднятию. Здесь развиты многофазные габбро-диорит-гранитовые интрузивы Кони-Пьягинского магматогенного поднятия, несущие молибден-медно-порфировое и золото-сульфидное оруденение и меловые вулканы среднего-основного состава с проявлениями золото-серебряного оруденения.

Интерес представляет пространственное совмещение таких факторов, как пересечение зоны Мэлдэксской интрузивно-купольной структуры с зоной разломов [3], где размещены рудопроявления Тальниковый, Рыжик, Прямой, Крутой, Верный и другие (см. рис. 1).

На территории распространены юрские и меловые отложения, разделённые на свиты и толщи, а также неогеновые и четвертичные отложения различных генетических типов. Стратиграфические образования принадлежат трём комплексам. Геосинклинальные отложения юрского возраста представлены преимущественно морскими осадочными, вулканогенно-осадочными и вулканическими образованиями. Выше, с угловым несогласием, залегают континентальные образования, которые отнесены к Охотскому отрезку ОЧВП верхнеюрско-мелового возраста. Наиболее молодые – рыхлые отложения четвертичного возраста – выполняют речные долины. Выходы интрузивных образований прорывают юрские, ранне-меловые стратифицированные и субвулканические образования и представлены раннемеловым

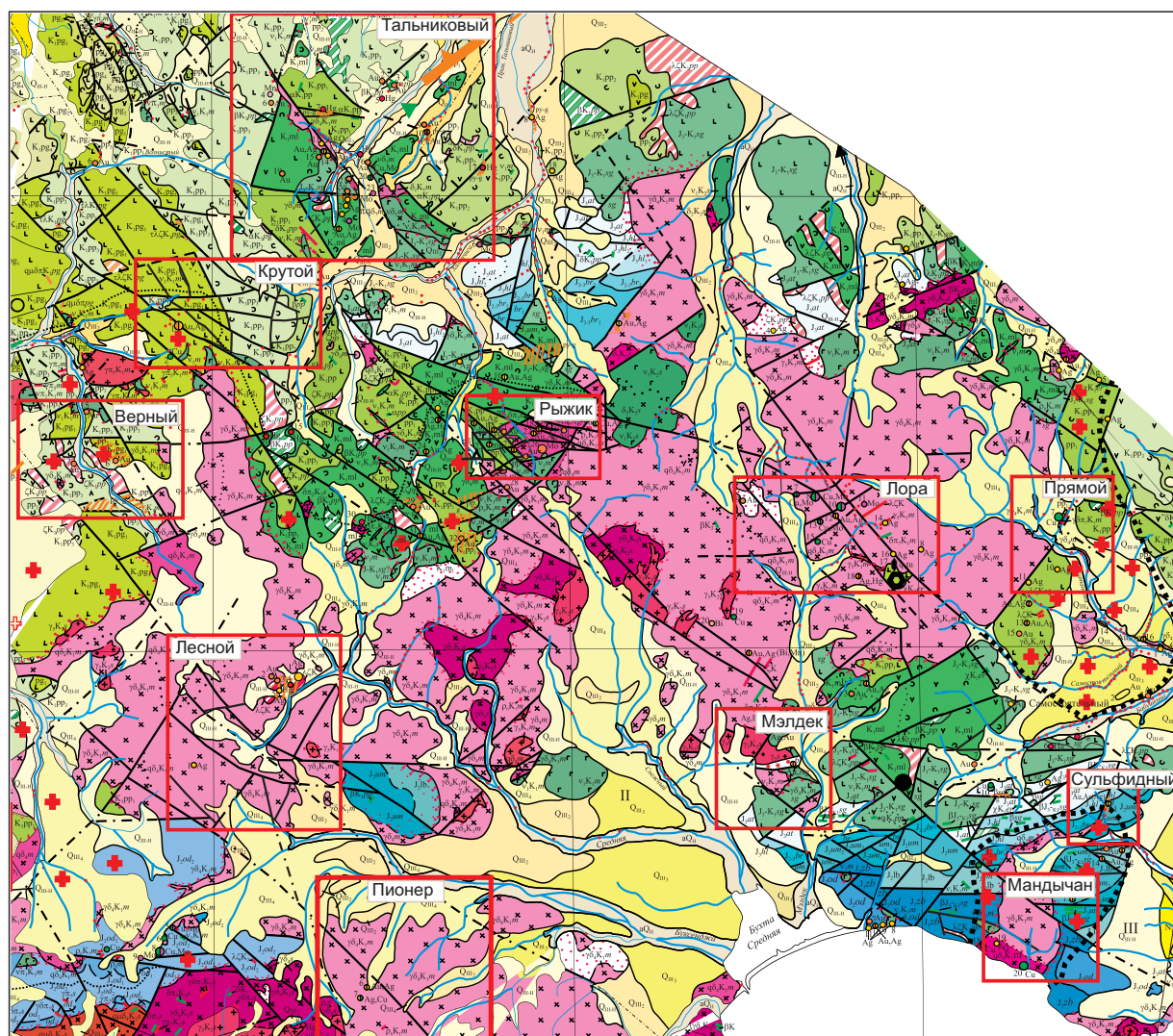


Рис. 1. Схема участков рудопроявлений Мэлдэской интрузивно-купольной структуры

магаданским, поздне меловым светлинским интрузивными комплексами. Магматические образования, связанные с заложением и формированием ОЧВП, развитые вдоль побережья Охотского моря, объединены термином «охотский комплекс». Субвулканические и жерловые образования представлены раннемеловыми штоками, дайками, реже силлами базальтов, андезибазальтов, андезитов, микродиоритов, дацитов и риодацитов. Разрывные нарушения на площади образуют группы различно ориентированных сближенных разломов, преимущественно линейных, реже дуговых. С зонами глубинных разломов связаны проявления динамотермального метаморфизма, зоны гидротермально-изменённых пород, рудопроявления.

Метод исследования. Метод создания трёхмерной геолого-геофизической модели рудных месторождений [2] с помощью математического моделирования и статистической обработки данных, позволяющий делать выводы об эффективности геофизических методов для решения конкретных геологических задач, предусматривает последовательность выполнения следующих этапов:

1. Постановка геологической задачи и выбор объекта моделирования.
2. Загрузка и анализ имеющихся по объекту геолого-геофизических данных в едином формате и оценка их качества.
3. Создание куба геологического строения на основе данных бурения и представлений геолога.

4. Построение куба содержания данных полезных компонентов, в том числе металлов по геохимическим результатам.

5. Задаётся трёхмерная сеточная модель среды с заданным уровнем детализации и количеством сеточных элементов на основании блокового геологического строения.

6. Выбирается область исследований.

7. Выполняется статистический анализ с распределением свойств по всему кубу данных и по заданным параметрам (например, в некоторой геометрической области и по типу пород и процессов).

8. Выявляется корреляционная связь между изучаемыми параметрами.

9. Загружается в нейронную сеть массив данных с кубов распределения и определяется вес каждого измеряемого параметра для решения конкретной задачи.

10. Определяется эффективность применения того или иного исследования на основании веса параметра, очевидно связанного с геологической эффективностью, и стоимости работ.

Для решения задачи использовалась собственная разработка компьютерного обеспечения, основанная на статистическом анализе и применении нейронной сети. В настоящее время программный продукт тестируется рядом учебных заведений (рис. 2).

Используемые материалы. Для верификации вышеописанного метода использованы данные по материалам магниторазведки и спектрометрии в наземном и в аэроформате, а также наземной электроразведки (методы ВП-СГ, МКП-ВП, ВЭЗ-ВП), электротомографии. Также взяты материалы исследования пород по данным РФА-анализа и табличные данные по петрофизическим свойствам из ряда отчётов.

Геологический куб. Рассматриваемый участок включает в себя молибден-медно-порфировое рудопоявление, вытянутое в северо-западном направлении на 5,5 км, при ширине до 2 км. Рудоносные тела, зоны метасоматически изменённых пород расположены вдоль Главного северо-западного разлома, являющегося основной магмо- и рудоконтролирующей структурой. Вмещающие породы – гранодиориты. Рудоносная порфировая фаза медно-порфировой системы генетически связана с диоритовыми порфиритами и гранодиорит-порфирами. На участке Лора выделены 2 рудных тела, локализованные в относительно приподнятом тектоническом блоке, на пересечении зоны

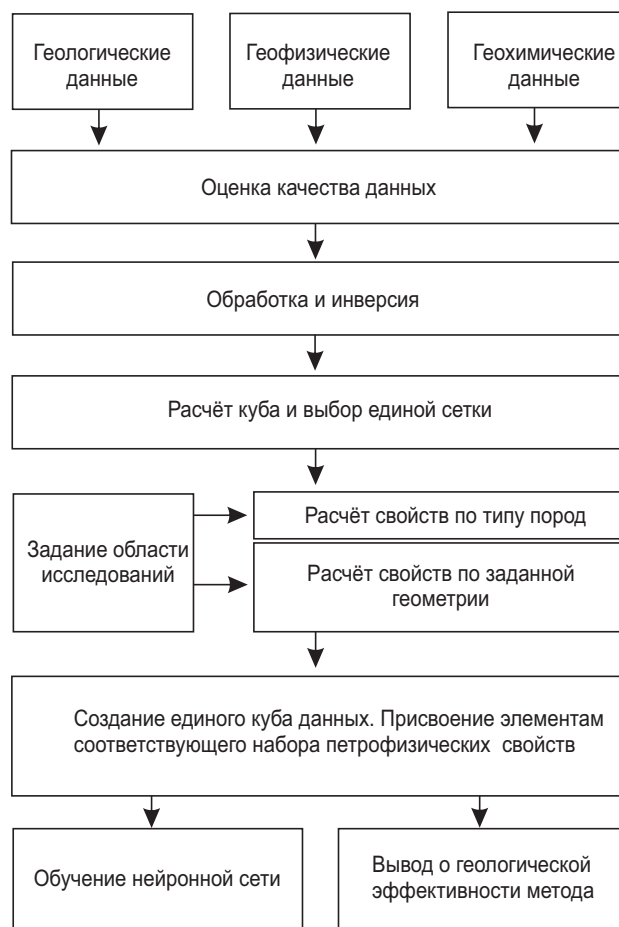


Рис. 2. Разрабатываемый метод оценки эффективности геофизических работ

северо-западного разлома с разломом северо-восточного направления. Рудоносная зона, вмещающая рудные тела 1 и 2, разбурена по сети 200×200 м, со сгущением сети в аномальной зоне до плотности 100×100 м. Рудные тела морфологически характеризуются как залежи неправильной призматической формы длиной до 1000 и шириной от 200 до 500 м. Простираются их северо-западное, обусловлено ориентировкой порфировых интрузий, которые представлены дайками, включающими трубообразные тела брекчий. По данным бурения, рудные тела имеют субвертикальный юго-западный контакт и погружаются в северо-восточном направлении под углами $60-70^\circ$.

Куб магниторазведки. Мэлдэкская купольная структура выделяется кольцевой магнитной аномалией контрастностью до 4000 нТ и размером около 16 000–18 000 м в диаметре. Аномалия присутствует на картах как наземной, так и аэромагнитной

съёмки различных годов. Относительно природы происхождения таких сильных магнитных аномалий высказывались несколько суждений. Точка зрения автора заключается в том, что влияющим фактором, помимо высокой концентрации магнитных аномалий, является процесс термонамагничивания. В 1960-х гг. исследователями в описываемом районе были отобраны несколько тысяч образцов пород разного типа и проведены полевые и лабораторные исследования, в том числе на терморазмагничивающей установке. Результаты лабораторных измерений показали, что после каждого цикла нагрев–охлаждение термостатическая намагниченность пород возрастает. При T 350 °С ориентация слабых и стихийно расположенных доменов и частиц меняется, они выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля. То есть существование глубинных термических источников может прогревать породы вдоль ослабленных зон, что совместно с наличием магнитных минералов создаёт высококонтрастные кольцевые (линейные аномалии). Учитывая, что вдоль них расположены зоны с наиболее благоприятными условиями для рудообразования (высокая температура, большая энергия для кристаллообразования, меньшее давление, наличие пустот, привнос материала), то можно считать такие магнитные аномалии критерием расположения рядом с ними участков, перспективных на наличие месторождения.

Факт локального прогрева участка исследований подтверждается и спутниковыми данными теплового индекса TIRS (10) с Landsat-8, характеризующего температуру поверхности, а не атмосферы. Более «прогретого» участка на полуострове Кони-Пьягина нет, что является с научной точки зрения интересным фактом и требует дальнейшего изучения с помощью более глубоких методов исследования, например, сейсморазведки и электроразведки методом переходных процессов (рис. 3).

Куб радиометрических свойств. Радиометрическое исследование на лабораторной установке проводилось на 1700 образцах. Результаты измерений показали, что вулканы района характеризуются низкой гамма-активностью. 90% всех замеров образцов укладываются в интервал 3–10 мкр/ч, что видно из вариационных кривых распределения естественной гамма-активности. Средняя активность составляет (мкр/ч): базальтов и их туфов – 4,7, андезитов и их туфов – 6,7, туфов дацитов – 8. Осадочные породы различаются доста-

точно чётко. Средняя активность (в мкр/ч): песчаников, алевролитов береговой свиты – 6,4, отложений мэлдэксской и ровнинской толщ – 8, халанчиканской свиты – 12,5. Её повышенную активность связывают с тонкообломочной разностью (алевролитов и аргиллитов), часто насыщенной органикой. Интрузивные образования характеризуются различными вариантами распределения гамма-активности, что подчёркивает неоднородность строения массива. Габбро и нориты имеют минимальную активность 3–5 мкр/ч, локализируются преимущественно в эндоконтактной зоне. Наблюдается закономерное повышение гамма-активности от периферии интрузивного комплекса к центру. Различия видны и из графиков гамма-активности раннемеловых гранодиоритов (графики 9–10). Они разделились на две группы со средней активностью 8,7 и 11,6 мкр/ч. Для определения свойств пород используют статистику. Рассматривая гистограммы с распределением свойств, можно отметить слабую дифференциацию пород, отчётливо выделяются только поздне-меловые (K_2) граниты.

Куб электромагнитных свойств горных пород. Инверсионная геоэлектрическая модель совместно с данными каротажа КС позволяют определить значения удельного электрического сопротивления. Из анализа интервалов табличных значений «Удельное электрическое сопротивление (УЭС)» и «ВП» (табл. 1) видно, что дифференцировать породы сложно, интервалы перекрываются. Предшественниками [1] также выполнен корреляционный анализ электромагнитных полей с содержанием меди в литохимических пробах. Они отмечают, что корреляционная связь между компонентами геоэлектрического поля (КС и ВП) и содержанием меди в литохимических пробах в пределах выбранных интервалов **практически отсутствует**.

Несмотря на то, что корреляционный анализ, проведённый ранее, не показал эффективность применения геофизических исследований для оконтуривания рудных зон, принято решение использовать описанный выше метод, включающий нейросетевые технологии.

Для этого сначала необходимо было разбить область исследований на блоки (рис. 4), каждому из них присвоить набор соответствующих им петрофизических параметров и содержаний полезных компонентов. Расчёт средних значений свойств для каждого блока и корреляционных зависимостей

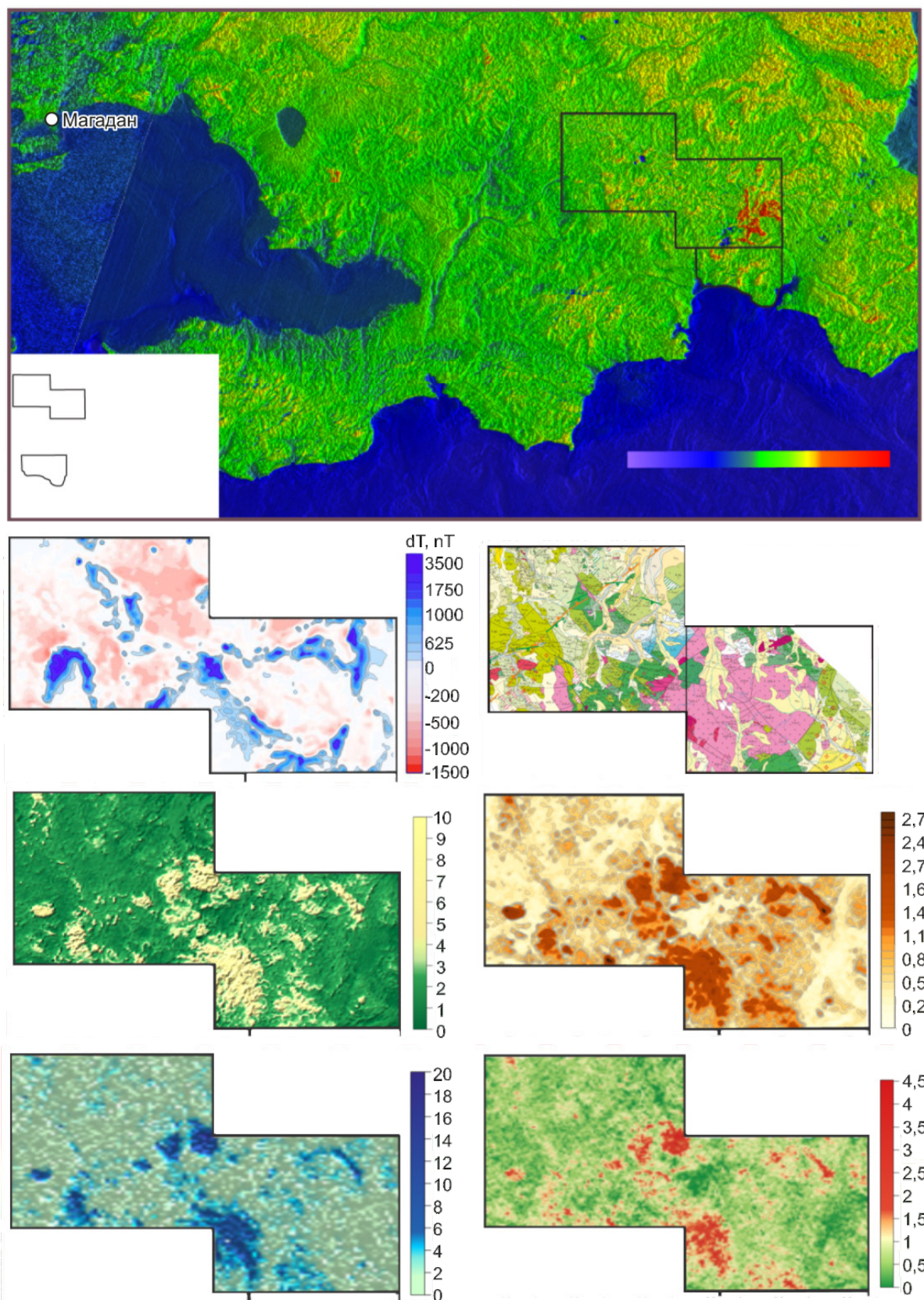


Рис. 3. Результаты исследований геофизическими методами

1. Среднеарифметические значения электромагнитных свойств пород изучаемого района

Породы	УЭС, Ом			Поляризуемость, %		
	Среднее	Минимальное	Максимальное	Средняя	Минимальная	Максимальная
Гранодиориты неизменённые	1500	2000	3000	0,3	0,01	2,9
Гранодиориты метасоматически изменённые	800	1000	1200	1,5	0,02	11,82
Гранодиорит-порфиры неизменённые	700	1000	1200	1,15	0,04	4
Гранодиорит-порфиры метасоматически изменённые	300	500	700	0,6	0,4	1,02
Диоритовые порфиры	400	500	600	0,8	0,03	3,3
Грейзены пиритизированные	500	700	900	0,6	0,04	0,7
Биотит-ортоклаз-кварцевые и серицит-ортоклазовые метасоматиты	1000	1200	1400	1,8	0,04	2,45

показал усиление *обратной корреляционной связи между ВП и УЭС* по мере возрастания содержания меди, что объясняется общим трендовым нарастанием степени гидротермально-метасоматической проработки геологических образований.

Обучение нейронной сети проводилось с прогнозированием следующих метрик: 1) выявление апикальных зон, характерных для расположенных рядом перспективных участков; 2) выявление зон с сульфидной минерализацией; 3) определение зон с повышенными содержаниями меди и молибдена.

Таким образом, апикальные области можно выявить по результатам измерений магниторазведки и гамма-спектрометрии с вероятностью 87%. При этом результаты магниторазведки почти в два раза выше результатов спектрометрии, то есть она наиболее информативна в решении такой задачи,

в том числе при поисках перекрытых интрузивов. Однако, такой вывод можно сделать только для конкретного района работ, где, по-видимому, зоны внедрения интрузий подвергались периодическому прогреванию, что в сочетании с повышенным содержанием железа привело к возникновению контрастных магнитных аномалий. При параметризации расположения зон повышенных содержания меди применение электроразведки имеет вес 6,75, магниторазведки – 1,78 и гамма-спектрометрии – 3,02. Значение прогноза составляет 57%.

Результаты. В работе проведена оценка того, насколько хорошо алгоритмы машинного обучения могут моделировать взаимосвязь петрофизических свойств и геофизических измерений. Тест синтетических данных показывает, что нейронные сети, используемые нами, указывают на области

2. Результаты моделирования с помощью нейронной сети

Метрика	Методы	Вес каждого метода	Значение прогноза, %
Выявление апикальных зон	Магниторазведка,	1,36	87
	Гамма-спектрометрия	0,7	
Выявление зон с сульфидной минерализацией	Магниторазведка,	1,78	57
	Гамма-спектрометрия,	3,02	
	Электроразведка	6,75	

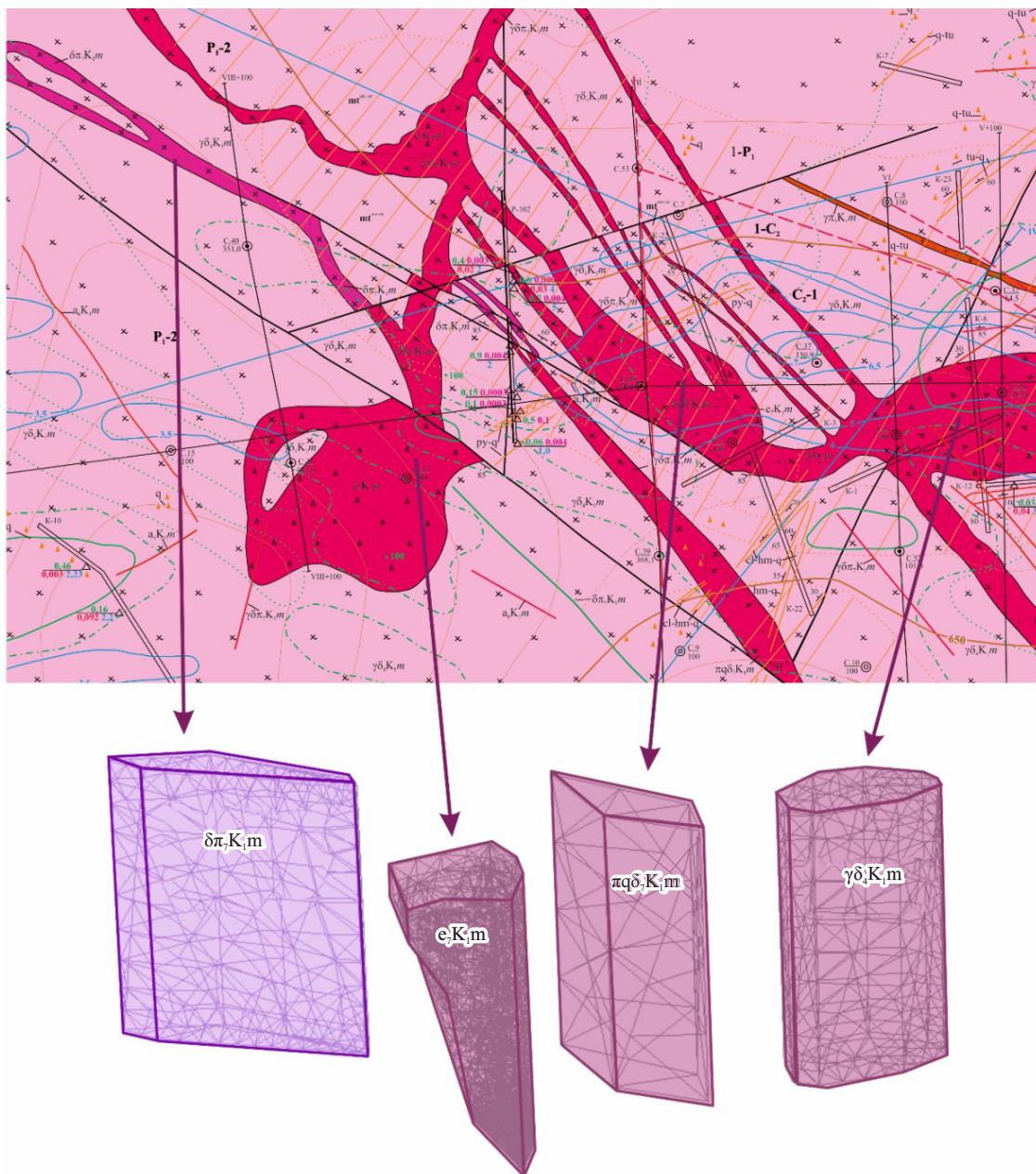


Рис. 4. Геологические объекты, разбитые на элементарные ячейки (блоки) с набором свойств

нахождения апикальных частей со средней точностью предсказания 87%, области сульфидной минерализации с вероятностью 57%. Для корректной работы рассмотренного алгоритма машинного обучения необходимо использовать минимум 10 000 данных измерений.

Сравнительный анализ подходов к статистическому анализу данных показывает, что алгоритмы машинного обучения достигают лучшего результата, чем обычное статистическое моделирование

свойств. Внедрение технологии построения конечноэлементных моделей на основе статистического обобщения свойств пород для участка Мэлдэжского поля способствует снижению рисков неудачного выбора геофизических методов на стадии проектирования полевых работ. Использование метода позволило уточнить геофизическую конфигурацию Мэлдэжского рудного поля, в контурах которого на сопредельной площади установлен ряд рудопоявлений.

Высказано предположение о происхождении контрастных магнитных аномалий. Возможно, что они обусловлены высокотемпературным глубинным очагом, о чём также свидетельствуют изменения температуры поверхности, полученные со снимка Landsat. Данный вопрос требует дальнейшего изучения более глубинными геофизическими методами.

Говоря о практической геологической составляющей исследования, следует отметить, что наи-

более перспективными на новой площади Шкиперская являются участки Сульфидный и Мэлдэк.

Автор выражает благодарность А. Алексееву и Р. Колесову за предоставление первичных полевых материалов, использованных в данном исследовании, и А. Н. Глухову за полезные предложения и комментарии по району работ. Особая благодарность С. Г. Мишенину за исключительно важные замечания и помощь в выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Живулько Т. А.* Информационный отчёт по проведённым поисковым работам на Лоринской лицензионной площади. – Хабаровск, 2014.
2. *Иванова И. И., Долгушин А. П., Гурьев В. А.* Построение интегрированной геолого-геофизической 3D-модели медно-молибденового месторождения порфирового типа Эрдэнэт // ГеоЕвразия-2021. Гео-

- логоразведка в современных реалиях : труды IV Международной геолого-геофизической конференции и выставки. – М. : ООО «ПолиПРЕСС», 2021. – Т. I. – С. 163–166.
3. *Шубин С. А., Ртищева Л. И., Попова Л. Н.* и др. Отчёт о поисково-оценочных работах на рудопоявлении Лора. – Магадан, 2003. – 290 с.
4. *Yao J., Guasch L., Warner M.* Neural networks as a tool for domain translation of geophysical data. – Geophysics. – 2023. – V. 88, Is. 3. – P. 267–275.

REFERENCES

1. *Zhivul'ko T. A.* Informatsionnyy otchet po provedonnyim poiskovym rabotam na Lorinskoy litsenzyonnoy ploshchadi [Information report on prospecting work carried out on the Lorinskaya licensed area]. Khabarovsk, 2014. (In Russ.)
2. *Ivanova I. I., Dolgushin A. P., Gur'yev V. A.* Postroyeniye integrirovannoy geologo-geofizicheskoy 3D-modeli medno-molibdenovogo mestorozhdeniya porfirivogo tipa [Building an integrated geological and geophysical 3D model of the Erdenet porphyry copper-molyb-

- denum deposit]. GeoEvraziya-2021. Geologorazvedka v sovremennykh realiyakh, trudy IV Mezhdunarodnoy geologo-geofizicheskoy konferentsii i vystavki, Moscow, PoliPRESS publ., 2021, V. I, pp. 163–166. (In Russ.)
3. *Shubin S. A., Rtishcheva L. I., Popova L. N.* et al. Otchet o poiskovo-otsenochnykh rabotakh na rudoproyavlenii Lora [Report on prospecting and appraisal work at the Lora ore occurrence]. Magadan, 2003, 290 p. (In Russ.)
4. *Yao J., Guasch L., Warner M.* Neural networks as a tool for domain translation of geophysical data, Geophysics, 2023, V. 88, Is. 3, pp. 267–275.

Статья поступила в редакцию 25.05.23; одобрена после рецензирования 19.06.23; принята к публикации 22.06.23.
The article was submitted 25.05.23; approved after reviewing 19.06.23; accepted for publication 22.06.23.