

ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 550.831

Локальное прогнозирование рудоносных интрузивных образований на основе современных технологий интерпретации геопотенциальных полей

А.С. Долгаль^а, О.А. Дудин^б

^аФГБУН Горный институт УрО РАН, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78-А
E-mail: dolgal@mi-perm.ru

^бООО «Норильскгеология», 663330, Красноярский край, г. Талнах, а/я 889,
E-mail: dudin_oleg@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 7 октября 2013 г.)

Показаны возможности современных технологий анализа результатов измерений гравитационного и магнитного полей в сложных физико-геологических условиях северо-запада Сибирской платформы. Описаны методика и результаты локального прогнозирования глубокозалегающих интрузивных тел, несущих медно-никелевое оруденение, на основе вероятностно-статистических методов и интерпретационной томографии.

Ключевые слова: *гравиразведка, магниторазведка, аномалия, интерпретация, рудоносные интрузии, медно-никелевые руды.*

Введение

Открытые в XX столетии уникальные медно-никелевые месторождения на северо-западе Сибирской трапповой провинции представлены сплошными и вкрапленными рудами, связанными с относительно мало-мощными триасовыми интрузиями, которые были образованы на заключительной стадии траппового магматизма. Рудоносные интрузивные образования характеризуются как хонолитообразные лентовидные тела дифференцированных габбро-долеритов с богатой рудной вкрапленностью, линзами, жилами сульфидных медно-никелевых руд,

сосредоточенные в эндо- и экзоконтакте интрузий с вмещающими породами. В связи с огромной площадью распространения Сибирского траппового магматизма до сих пор не утратило своей актуальности предположение о наличии новых уникальных рудных месторождений в данной провинции.

Локальный характер распространения, а также существенные отличия по петрофизическим свойствам рудоносных интрузий от вмещающих осадочных и магматических пород, геометрические параметры этих геологических тел (ширина и вертикальная мощность интрузий превышают первые

сотни метров, длина достигает многих километров) создают благоприятные предпосылки для выявления геофизическими методами рудоносных объектов под мощным чехлом перекрывающих пород.

При современном уровне технического прогресса имеются только два геофизических метода, позволяющие в сжатые сроки провести исследования на значительных территориях с предоставлением прогнозно-поисковой информации по доступным для бурения интервалам глубин – это методы гравиразведки и магниторазведки [10]. Огромная площадь проявления процессов траппового магматизма в Восточной Сибири предопределяет её поэтапное геофизическое изучение. На первом этапе основная роль отводится мелкомасштабным съемкам, которые решают задачи обнаружения глубинных очагов рудогенеза, источников и каналов поступления магматических потоков на поверхность. Второй этап отводится для средне- и крупномасштабных съемок, которые позволяют выделять и оконтуривать (в плане и в разрезе) аномалиеобразующие объекты, отождествляемые по петрофизическим и геометрическим параметрам с рудоносными интрузивными телами.

В связи с появлением в последние годы различных программных средств (компьютерных технологий) обработки и интерпретации материалов геофизических исследований возникли принципиально новые возможности извлечения информации из данных полевых наблюдений.

В статье рассматриваются два сравнительно новых для рассматриваемого региона направления в методах интерпретации потенциальных полей – вероятностно-статистическое и «томографическое», применение которых на региональном этапе геофизических работ позволяет получить картину глубинного строения исследуемой площади, выделить и идентифицировать как крупные пликативные и дизъюнктивные структуры, так и другие элементы строения верхней части земной коры; а при

использовании материалов средне- и крупномасштабных съемок – оценить перспективы площади и локализовать предполагаемые рудоносные интрузивные тела.

Томографическая интерпретация

В настоящее время можно считать сформировавшимся новое «направление в теории интерпретации потенциальных полей, связанное с попытками изучения в некоторых частных случаях вертикального распределения намагниченности и плотности по данным магниторазведки и гравиразведки» [1]. Это направление получило название «интерпретационной томографии», внутри которой выделяются два подхода – фильтрационный и аппроксимационный [7]. В первом случае тем или иным способом выделяются «разноглубинные» составляющие из наблюдаемого поля, во втором – строятся пространственные распределения параметров, имеющих смысл эффективной плотности $\sigma = \sigma(x, y, z)$ или модуля эффективной намагниченности $J = J(x, y, z)$ горных пород, в той или иной степени отражающих основные особенности структурно-тектонического строения изучаемого объема геологической среды. Отличительными особенностями рассматриваемых методов являются [7]:

1) использование минимума априорной информации об источниках интерпретируемого поля;

2) отсутствие трудоемких процедур построения начального приближения, используемых в классических методах автоматизированного подбора;

3) разделение интерпретируемого потенциального поля на составляющие, предположительно обусловленные влиянием разноглубинных слоев горных пород;

4) применение сравнительно быстрых вычислительных алгоритмов, допускающих обработку больших объемов исходной информации;

5) возможность построения различных вариантов пространственных распределений петрофизических неоднородностей в исследуемом объеме среды;

6) широкий спектр способов визуализации результативных интерпретационных построений.

Однако с теоретических позиций все методы интерпретационной томографии выглядят весьма уязвимо. Возможности любых алгоритмов фильтрации для оценки глубин залегания h аномалиеобразующих тел ограничены зависимостью спектральных характеристик гравитационного поля не только от глубин h , но и от формы и размеров источников. Эквивалентность и неустойчивость решения обратной задачи в сеточном классе моделей при отсутствии априорных ограничений на параметры источников поля неизбежно оказывают влияние на результаты аппроксимационной томографии. Тем не менее с каждым годом появляется все больше примеров успешного решения разнообразных геологических задач на основе томографической интерпретации. В первую очередь стоит упомянуть о результатах, полученных ГНПП «Аэрогеофизика» при использовании пакета программ СИГМА-3D [2].

При интерпретации материалов крупномасштабных съемок по исследуемому району использовался метод фильтрационной томографии – векторное сканирование, реализованное в компьютерной технологии VECTOR, созданной в Горном институте УрО РАН под руководством В.М. Новоселицкого [8]. На начальной стадии обработки по нерегулярной сети пунктов, распределенных в области $D: x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2$, в которых проведены измерения анализируемого поля V , выполняется триангуляция – строится система многократно перекрывающихся треугольников, в центрах пересечения медиан которых устойчиво определяются значения ортогональных составляющих горизонталь-

ного градиента V_x и V_y . Затем осуществляется векторное усреднение градиентов в скользящих окнах различного размера L^1, L^2, \dots, L^N ; исключается фоновая составляющая поля (в случае необходимости); вычисляются разности \mathbf{V}_x^k и \mathbf{V}_y^k между градиентами исходного поля и их усредненными значениями; проводится численное интегрирование полученных дискретных значений $V^k = \iint_D \mathbf{V}_s^k dx dy$, где

$\mathbf{V}_s^k = \mathbf{V}_x^k + \mathbf{V}_y^k$ – вектор полного горизонтального градиента, $1 \leq k \leq N$.

Полученные результаты – составляющие поля V^1, V^2, \dots, V^N – отождествляются с аномальными эффектами, обусловленными объемами геологической среды, ограниченными поверхностью Земли и некоторыми последовательно возрастающими эффективными глубинами $h_{эф}^1, h_{эф}^2, \dots, h_{эф}^N$. Соответственно составляющая поля ΔV^k , обусловленная влиянием k -го горизонтального слоя (с кровлей, находящейся на глубине $h_{эф}^{k-1}$, и подошвой, находящейся на глубине $h_{эф}^k$), определяется выражением $\Delta V^k = V^k - V^{k-1}$. Поведение функции ΔV^k линейно связано с распределением плотности внутри рассматриваемого слоя горных пород, поэтому может использоваться с целью выделения и оконтуривания геологических объектов, расположенных в определенном интервале глубин. Существует возможность построения трехмерной диаграммы квазиплотностей (квазинамагниченностей) $\sum_1^{N-1} \Delta V^k$ и различных ее сечений (разрезов, срезов и т.п.).

С использованием сводной гравиметрической карты масштаба 1:50 000 исследуемой территории (Наумов, 2002) были построены 3D-диаграммы («кубы») квазиплотностей, их срезы и разрезы. Наиболее

ярко выделяющимся элементом геоплотностного разреза исследуемого района является крупная глубинная дугообразная зона повышенной плотности горных пород, имеющая северо-северо-восточное простирание. Предположительно данная зона является глубинным каналом, контролирующим процессы глубинного интрузивного магматизма. Отражение магмоактивной зоны в послойном распределении квазиплотностей, построенном с использованием системы VECTOR, представлено на рис. 1.

В качестве региональных геофизических поисковых критериев медно-никелевого оруденения предлагается рассматривать эту и подобные ей линейные зоны, прослеживающиеся до границы Мохоровичича и до поверхности Кюри соответственно. Протяженность этих магмоактивных зон составляет сотни километров, при ширине 15–20 км (на глубине порядка 10 км от дневной поверхности). Вблизи верхней мантии отмечается увеличение ширины и суммарной массы магмоактивных зон; внутри зон выделяются отдельные участки, которые характеризуются наиболее высокими значениями петрофизических параметров. Известные месторождения располагаются на некотором удалении от осевых частей указанных зон.

Локальные геофизические поисковые критерии базит-гипербазитовых интрузий давно установлены – это совмещенные в пространстве локальные положительные аномалии гравитационного и магнитного полей. В данном случае для выделения и повышения контрастности такого рода аномалий использовано вычисление комплексного показателя Ω , по Г.С. Вахромееву [4]. По аналогии с используемыми при анализе материалов литогеохимических съемок мультипликативными показателями в процессе интерпретации рассчитывались и анализировались поля параметра $\Omega = (\Delta g^{\text{пазн}} - M\Delta g^{\text{пазн}}) / D\Delta g^{\text{пазн}} + (\Delta g_{\text{ps}} - M\Delta g_{\text{ps}}) / D\Delta g_{\text{ps}}$, где символы **M** и **D** означают математиче-

ское ожидание и дисперсию соответственно. Поле $\Delta g^{\text{пазн}}$ – гравитационный эффект горизонтального слоя горных пород с эффективной глубиной верхней кромки 1 км, нижней – 4 км; Δg_{ps} – результат псевдогравитационного преобразования магнитного поля от слоя с эффективными глубинами 0.5 и 3 км соответственно. Таким образом, построенное пространственное распределение комплексного показателя Ω «фокусирует» аномальные эффекты, приблизительно отвечающие рудоперспективному интервалу глубин.

Исходя из предположения о независимости использованных признаков – полей $\Delta g^{\text{пазн}}$ и Δg_{ps} – и равной их информативности, можно отождествлять аномалии повышенных значений Ω с возмущающими объектами высокой избыточной плотности и намагниченности (в т.ч. и с дифференцированными интрузиями). На результирующей карте (рис. 2) выделен ряд положительных локальных аномалий комплексного показателя Ω , большинство из которых представляют интерес для дальнейших поисков медно-никелевого оруденения.

Необходимо отметить, что томографическая интерпретация с помощью технологии VECTOR в условиях слоисто-блоковой геологической среды рудных районов приводит к значительно более сложным результатам, чем при решении задач прогноза и поисков скоплений углеводородов в условиях платформенного разреза. Однако первый опыт использования векторного сканирования в условиях северо-запада Сибирской платформы свидетельствует о возможности практического использования данной технологии для решения прогнозно-поисковых задач. В дальнейшем представляется целесообразным выполнить комплексирование технологии «ВЕКТОР» и методов распознавания образов (при использовании в качестве признаков «разноглубинных» карт-трансформант) с целью

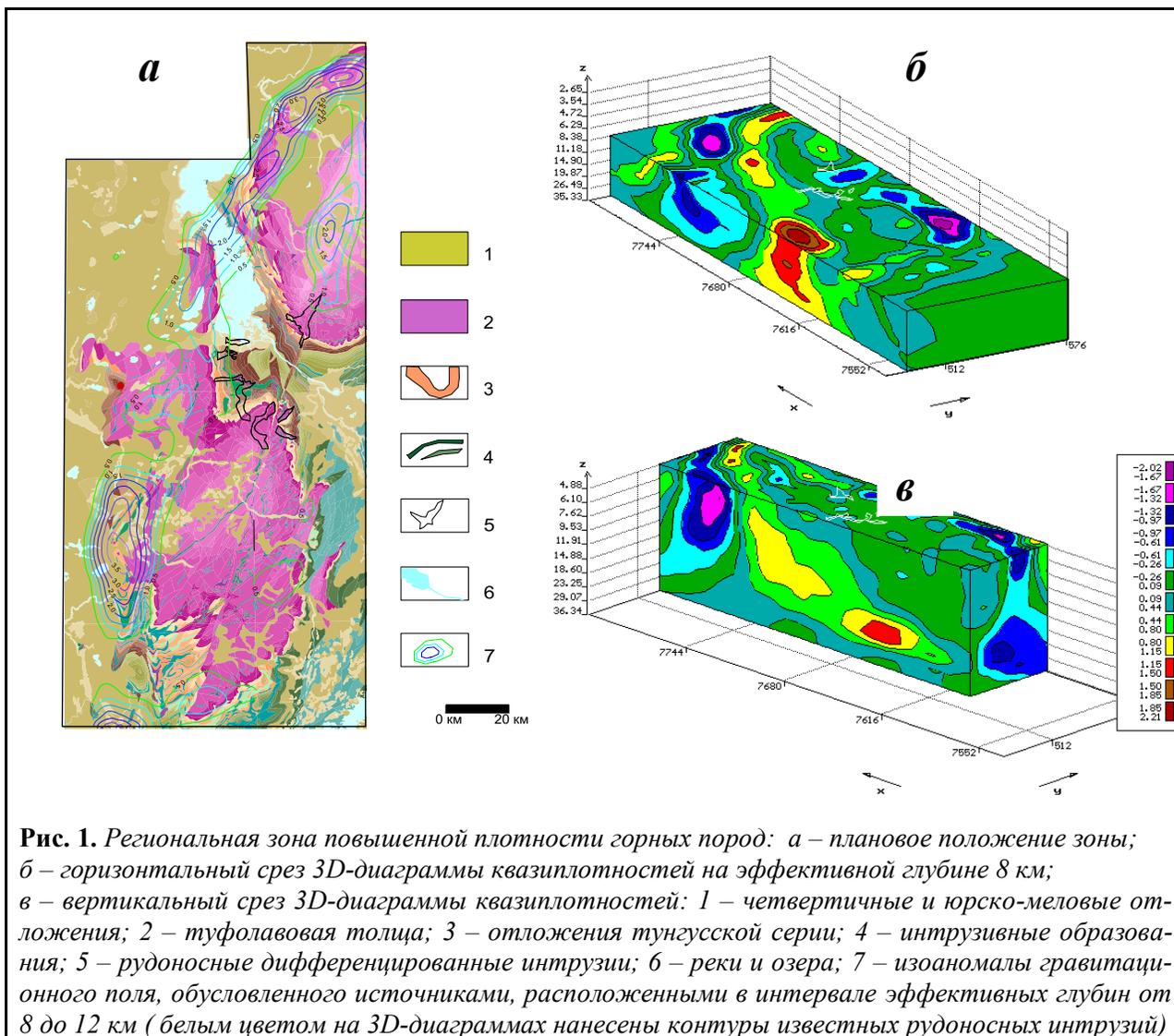


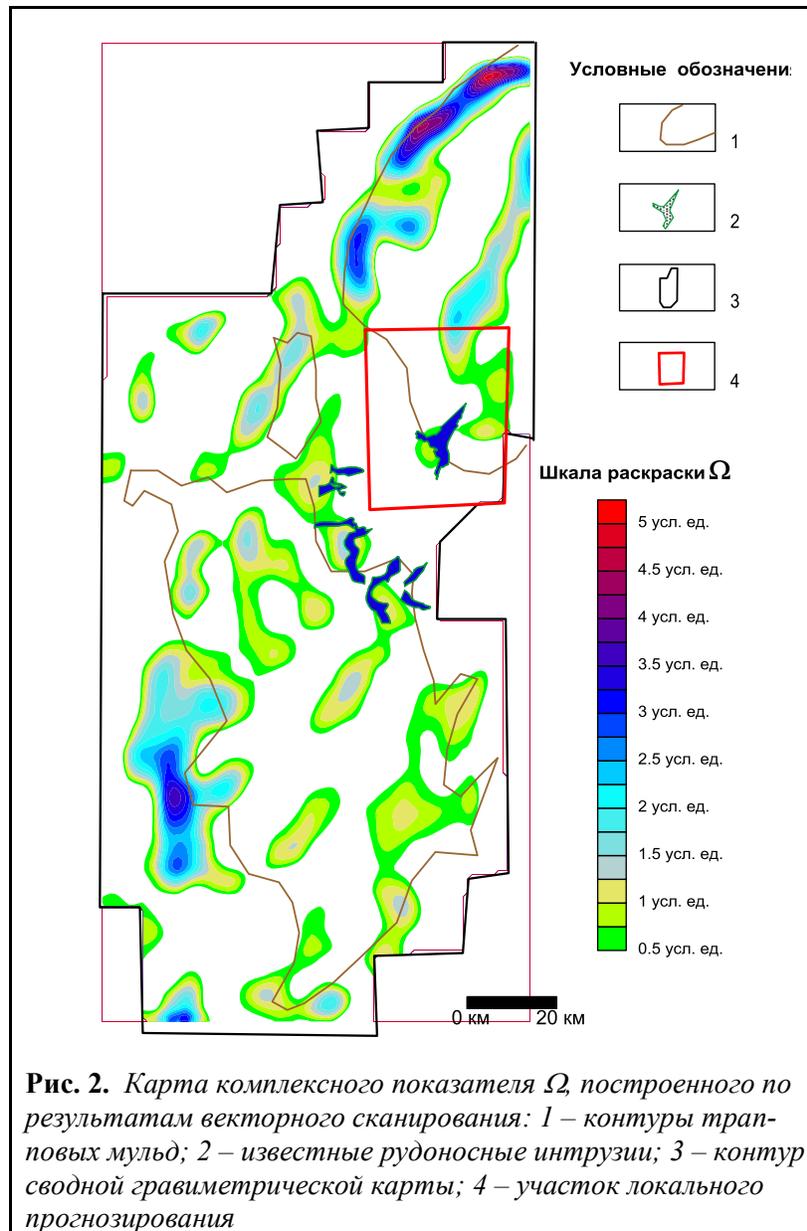
Рис. 1. Региональная зона повышенной плотности горных пород: а – плановое положение зоны; б – горизонтальный срез 3D-диаграммы квазиплотностей на эффективной глубине 8 км; в – вертикальный срез 3D-диаграммы квазиплотностей: 1 – четвертичные и юрско-меловые отложения; 2 – туфолавовая толща; 3 – отложения тунгусской сери; 4 – интрузивные образования; 5 – рудоносные дифференцированные интрузии; 6 – реки и озера; 7 – изоаномалы гравитационного поля, обусловленного источниками, расположенными в интервале эффективных глубин от 8 до 12 км (белым цветом на 3D-диаграммах нанесены контуры известных рудоносных интрузий)

повышения качества результатов при прогнозной оценке территории.

Вероятностно-статистические методы интерпретации

Исходными материалами для представленных ниже интерпретационных построений являлись цифровые модели гравитационного и магнитного полей, отвечающие регулярной сети 100×100 м, составленные по результатам наземных и аэрогеофизических съемок 1:50 000–1:25 000 масштабов. Участок локального прогнозирования мед-

но-никелевого оруденения включал в себя известный рудный узел и его фланги (рис.2, усл. обозн. 4). В процессе исследований были сформированы локальные геофизические базы данных, выполнены трансформации и математическое моделирование источников геопотенциальных полей, уточнены прогнозно-поисковые критерии медно-никелевых руд. В качестве инструментов интерпретации использовались программный комплекс КОСКАД-3D и система OASIS Montaj.



Несмотря на то, что рудоносные объекты – дифференцированные интрузии базит-гипербазитового состава – характеризуются повышенными значениями плотности ($2.86 - 3.03 \text{ г/см}^3$) и суммарной намагниченности (до 16 А/м) по отношению к вмещающим породам, выявить в наблюдаемых гравитационном Δg и магнитном (T_a) полях аномальные эффекты от этих объектов крайне затруднительно. Причинами являются сравнительно слабый уровень полезного сигнала; наличие интенсивных аномалий -

помех, обусловленных физическими неоднородностями геологической среды, специфических искажений геофизических полей, связанных с горным рельефом местности и т.д. [6].

С целью обнаружения и локализации рудоперспективных объектов последовательно выполнялись трансформации геофизических полей; вычисление градиентных характеристик полей; корреляционный анализ локальных особенностей полей и рельефа земной поверхности; вычисление ком-

плексного показателя Ω [4]; кластерный анализ многомерных геофизических данных по алгоритму А.В. Петрова [9]; количественная интерпретация рудоперспективных аномалий методом неформализованного подбора в 2D-варианте.

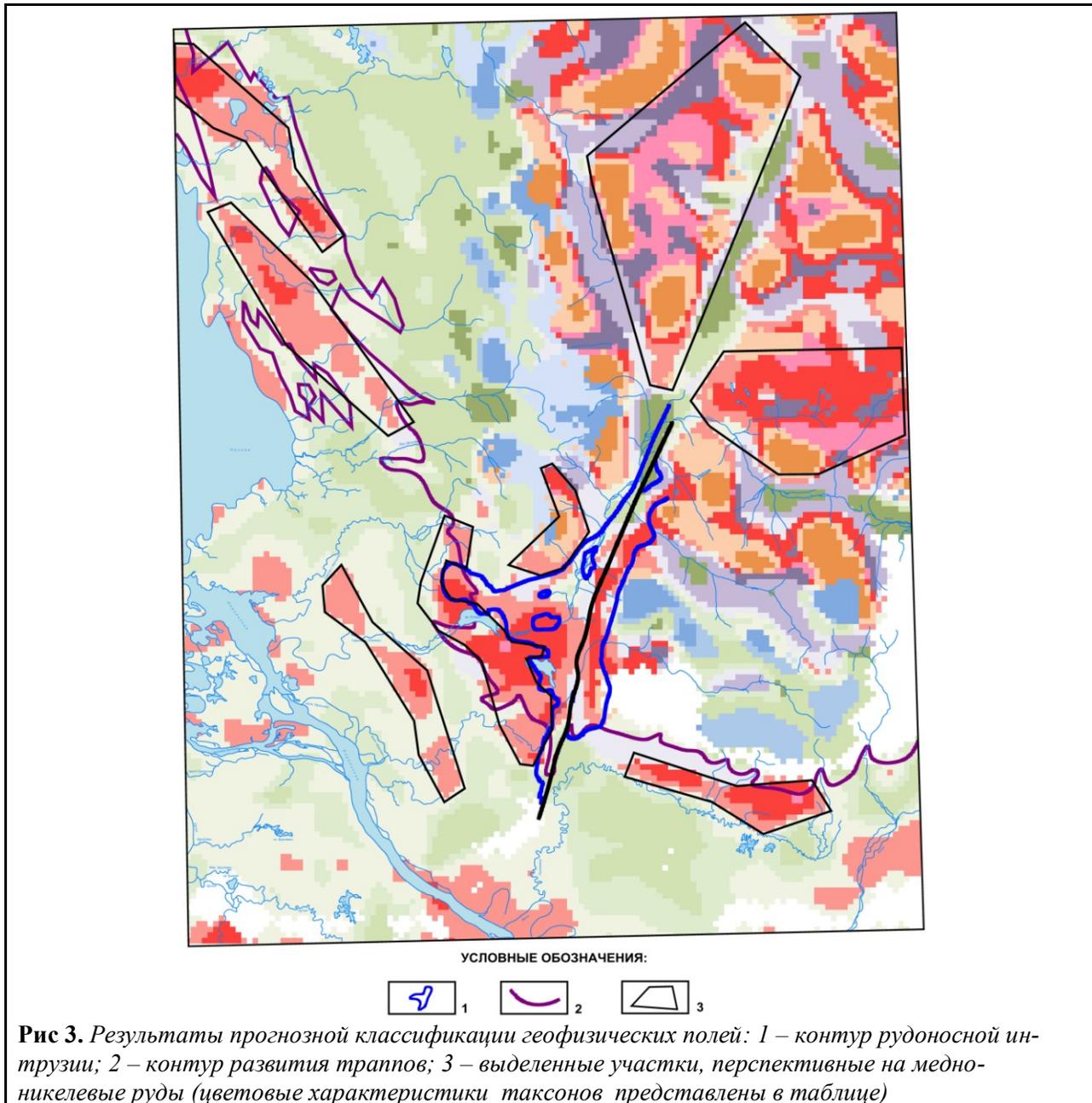
Как и при томографической интерпретации, рассчитанные по другому набору признаков аномальные значения Ω можно отождествлять с возмущающими объектами высокой плотности и намагниченности, в т. ч. и с дифференцированными интрузиями. Способ достаточно успешно опробован на известных рудных узлах и месторождениях Норильского района [6] и рекомендован в качестве основного формализованного приема комплексной интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки на поисковом этапе исследований для выделения перспективных участков.

Также использовалась классификация многопризнаковых геофизических наблюдений, направленная на решение задачи выделения в многомерном пространстве компактных групп точек. В результате применения алгоритма А.В. Петрова анализируемую совокупность наблюдений удалось разбить на сравнительно небольшое число однородных, по формальным математическим критериям, групп или классов. Отметим, что понятие однородности основано на предположении, что близость двух или нескольких объектов в линейном векторном пространстве означает близость их "физических" состояний, их сходство [9].

Использованный эвристический алгоритм построен на принципах самообучения и позволяет решать задачу разделения исследуемой площади на области с одинаковым значением вектора среднего по совокупности используемых признаков.

Результаты классификации многомерных геофизических данных

Номер класса	Число точек, % от общего	$\Delta g_{\text{лок}}$, мГал		$\Delta T_{\text{лок}}$, мГал		Ω , усл. ед.	
		Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
5	7	0.85	0.20	-4	25	1.14	0.57
12	11	0.42	0.13	-3	9	0.35	0.32
8	2	0.96	0.23	12	16	2.74	0.42
9	4	0.87	0.29	144	19	2.99	0.39
6	5	0.74	0.32	82	31	1.93	0.89
7	3	0.94	0.24	-53	28	1.80	0.66
10	5	0.44	0.34	-113	22	-0.41	0.83
11	5	0.27	0.27	-42	17	-0.25	0.59
14	2	-0.58	0.50	141	21	0.94	1.52
15	2	-1.14	0.15	77	24	-1.97	0.67
3	2	-0.35	0.41	32	36	1.46	1.04
1	22	-0.03	0.16	-1	14	-0.19	0.35
2	14	-0.48	0.16	-5	19	-0.83	0.41
4	13	-0.87	0.28	-10	21	-1.93	0.50
13	2	-0.44	0.43	-122	20	-2.24	0.41



Оптимальное число классов (однородных в смысле вектора среднего областей) определяется автоматически в процессе работы алгоритма.

В качестве исходных данных для классификации были выбраны локальные составляющие гравитационного и магнитного полей, а также рассчитанная по ним функция комплексного показателя Ω . В результате классификации в многомерном про-

странстве признаков выделено 15 классов (таксонов), отличающихся по средним значениям и среднеквадратическому отклонению (СКО) параметров. Каждый из классов представляет собой характеристику площади, составляющей от 2 до 22% от всей территории исследований (табл.).

Наибольший интерес при оценке перспектив территории представляют классы № 5, 12, 8, сконцентрированные во фрон-

тальной и центральной частях известного интрузива, характеризующиеся аномальными значениями гравитационного поля и практически фоновыми значениями магнитного поля, а также положительными значимыми числами комплексного показателя Ω , что характерно для интрузивных тел, находящихся на глубинах до 1 км и перекрытых нижней толщей слабомагнитных базальтов (рис. 3).

Особое внимание следует уделить зонам, предположительно отвечающим внешним продолжениям известной рудоносной интрузии, которые также могут нести сульфидное оруденение. Несомненный поисковый интерес представляют локальные зоны классов 5 и 12, выделенные в области осадочных пород и находящиеся в западной части рудного узла.

Сочетание методов вероятностно-статистического анализа полей, петрофизического моделирования и решения обратных задач позволило успешно решить задачу прогнозного районирования площади и выделить ряд участков для проведения дальнейших поисковых работ.

Выводы

1. Использование интерпретационных компьютерных технологий, основанных на «томографическом» и вероятностно-статистическом подходе к анализу геофизической информации позволяет в сложных физико-геологических условиях северо-запада Сибирской платформы выделять комплексные аномалии геопотенциальных полей, предположительно обусловленных глубокозалегающими интрузивными тела-

ми, перспективными на медно-никелевое оруденение.

2. Следует отметить пространственную корреляцию большинства выявленных разными методами перспективных аномалий. Это можно рассматривать как косвенное свидетельство о достаточно высокой достоверности выполненных интерпретационных построений. Исходя из системно-гносеологического принципа «выделения устойчивого», по В.Н. Страхову, наибольшую надежность и достоверность имеют совпадающие между собой результаты интерпретации, полученные в рамках различных моделей (методов) извлечения полезной геологической информации из результатов полевых наблюдений [12].

3. Представленные в статье результаты позволяют рассматривать использованные методы интерпретации гравиразведки и магниторазведки как альтернативу традиционным для региона технологиям геологического редуцирования полей [5, 11], требующим весьма значительных затрат труда и времени, а также существенно зависящим от степени петрофизической изученности.

4. Количество полезной геологической информации, извлекаемое из данных полевых геофизических наблюдений, ограничено качеством исходных данных. Для успешного решения задачи локального прогнозирования рудоносных интрузивных образований, по мнению авторов, целесообразно поставить вопрос о выполнении в регионе съемок нового поколения. Масштаб аэрогеофизических исследований должен быть не мельче 1:25 000, а гравиметрическую съемку в пределах известных рудных узлов и их флангов следует выполнять в масштабе 1:10 000 – 1:5 000.

Библиографический список

1. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.* Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете

программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31 сессии Между-

- нар. семинара им. Д.Г.Успенского / ОИФЗ РАН. М., 2004. С. 88–89.
2. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Буш В.А., Трусов А.А.* Интерпретация аэрогеофизических данных при поисках месторождений нефти и газа // *Разведка и охрана недр.* 2006. № 5. С. 13–18.
 3. *Гравиразведка: справочник геофизика* / под ред. Е.А.Мудрецово́й, К.Е.Веселова. 2-е издание, перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 607 с.
 4. *Вахромеев Г.С.* Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1973. 152 с.
 5. *Долгаль А.С., Чехович К.М.* Комплексная интерпретация геопотенциальных полей при поисках медно-никелево-платинового оруденения (Норильский район) // *Геология и геофизика.* 1998. Т. 39, № 11. С. 1615–1625.
 6. *Долгаль А.С.* Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. Абакан: ООО «Фирма-МАРТ», 2002. 188 с.
 7. *Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В., Рашидов В.А., Шархимуллин А.Ф.* О теории и практике томографической интерпретации геопотенциальных полей // *Геофизика.* 2012. №5. С. 8–17.
 8. *Новоселицкий В.М., Простолупов Г.В.* Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения и локализации источников аномалий // *Геофизика и математика* / ОИФЗ РАН. М., 1999. С. 104–107.
 9. *Петров А.В.* Теоретические основы обработки геофизических данных / РГГУ. М., 2004. 74 с.
 10. *Прогнозирование* не выходящего на поверхность оруденения при глубинном геологическом картировании и геологическом доизучении площадей: метод. пособие / М.Л. Сахновский, П.А. Литвин, Б.М. Михайлов и др. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003. 272 с.
 11. *Результаты* применения моделирования в рудной геофизике в различных районах Сибири / под ред. В.С. Моисеева, Г.Г. Ремпля. М.: Недра. 1988. 219 с.
 12. *Страхов В.Н.* Основные идеи и методы извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдений // *Теория и методика интерпретации гравитационных и магнитных аномалий.* М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1979. С. 146–269.

Local Assessment of Ore-bearing Intrusive Formations Based on the Modern Techniques of Interpretation of Geopotential Fields

A.S. Dolgal^a, O.A. Dudin^b

^aMining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Sibirskaya st., 78A, E-mail: dolgal@mi-perm.ru

^bNorilskgeologiya, 663330, Talnakh, P.O. Box 889. E-mail: dudin_oleg@mail.ru

The article shows the effectiveness of the modern techniques of gravity and magnetic data interpretation in geological difficult terrain conditions of the northwest of the Siberian platform. It describes the results of local assessment of the deep-laying intrusive bodies bearing a copper-nickel mineralization obtained with the use of probabilistic and statistical methods, and an interpretative tomography transformation.

Keywords: *gravity exploration, magnetic exploration, anomaly, interpretation, ore-bearing intrusions, copper-nickel ores.*

References

1. Babayants P.S., Blokh Yu.I., Trusov A.A. Interpretatsionnaya tomografiya po dannym gravirazvedki i magnitorazvedki v pakete program «Sigma – 3D» [Interpretative tomography of gravity and magnetic data using program package “Sigma-3D”]. Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley. Materialy 31 sessii Mezhdunar. Seminara D.G. Uspenskogo. OIFZ RAN, Moskva, 2004, pp 88-89.
2. Babayants P.S., Blokh Yu.I., Bush V.A., Trusov A.A. Interpretatsiya aerogeofizicheskikh dannykh pri poiskakh mestorozhdeniy nefti i gaza [Interpretation of the airborne geophysical data for gas and oil prospecting]. Razvedka i okhrana nedr, № 5, 2006, pp 13-18.
3. Gravirazvedka. Spravochnik geofizika [Gravity exploration. Handbook of Geophysicist]. Mudretsova E.M., Veselov K.E. (Eds.), Second Edition, Nedra, Moskva, 1999.
4. Vakhrameyev G.S. Osnovy metodologii kompleksirovaniya geofizicheskikh issledovaniy pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy [Basics of methodology of integrated geophysical survey for mineral exploration]. Nedra, Moskva, 1973.
5. Dolgal A.S., Chekhovich K.M. Kompleksnaya interpretatsiya geopotentsialnykh poley pri poiskakh medno-nikelevo-platinovogo orudneniya (Noril'skiy rayon) [Integrated interpretation of geopotential fields for copper-nickel-platinum ore exploration (Norilsk region)]. Geologiya i geofizika, V. 39, n. 11, pp 1615-1625.
6. Dolgal A.S. Kompyuternyye tekhnologii obrabotki i interpretatsii dannykh gravimetricheskoy i magnitnoy syomok v gornoy mestnosti [Computer technologies of processing and interpretation gravity and magnetic data in mountainous terrain]. Firma-MART, Abakan, 2002.
7. Dolgal A.S., Bychkov S.G., Kostitsyn V.I., Novikova P.N., Pugin A.V., Rashidov V.A., and Sharkhimullin A.F. O teorii i praktike tomograficheskoy interpretatsii geopotentsialnykh poley [Theory and practice of tomographic interpretation of geopotential fields] Geofizika, №5, 2012, pp 8–17.
8. Novoselitskiy V.M., Prostolupov G.V. Vektornaya obrabotka gravimetricheskikh nablyudeniy s telyu obnaruzheniya i lokalizatsii istochnikov anomalii [Vector processing of gravity data for detection and location of anomaly sources]. Geofizika i matematika, OIFZ RAS, Mosckva, 1999, pp 104–107.
9. Petrov A.V. Teoreticheskiye osnovy obrabotki geofizicheskikh dannykh [Theory basics of geophysical data processing]. RGGU, Moskva, 2004.
10. Prognozirovaniye ne vykhodiyashchego na poverkhnost orudneniya pri glubinnom geologicheskom kartirovaniy i geologicheskom doizuchenii ploshchadey [Prediction of blind orebody during deep geological mapping and additional geological study of areas]. Metodicheskoye posobiye, Sakhnovskiy M.L., Litvin P.A., Mikhaylov B.M. et al. VSEGEI, 2003.
11. Resultaty primeneniya modelirovaniya v rudnoy geofizike v razlichnikh rayonakh Sibiri [Results of application of modelling in mining geophysics in different areas of Siberia]. Moiseyev V.S., Rempel G.G. (Eds.), Nedra, Moskva, 1988.
12. Strakhov V.N. Osnovnyie idei i metody izvlecheniya informatsii iz dannykh gravitatsionnykh i magnitnykh nablyudenuy [Basic ideas and methods of retrieving the information from gravity and magnetic data]. Teoriya i metodika interpretatsii gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii. IFZ AN USSR, 1979, pp 146–269.

Рецензент – доктор технических наук В.А. Гершанок