



Г.В. Демура
д-р геол.-мин. наук
профессор
demnady_demoura@mail.ru



С.В. Зиновкин
канд. техн. наук
РГГРУ¹
кафедра геофизики
старший преподаватель



А.В. Петров
д-р физ.-мат. наук
РГГРУ¹
геофизический факультет
декан
petrovstud@mail.ru

Способ экспрессной геомагнитной и плотностной томографии недр при оценке запасов рудопроявлений черных и цветных металлов

¹Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ-РГГРУ). Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

Предлагаемая авторами экспрессная оценка запасов рудопроявлений (железородных, мартитовых, хромитовых руд и, в перспективе – золотосульфидных, полиметаллических и других видов минерального сырья) проводится по результатам высокоточных магнитных и гравиметрических съемок. Использование вещественных характеристик руд и вмещающей их среды (плотности и магнитной восприимчивости) в геотомографической технологии позволяет исследовать геологическое пространство достоверным и воспроизводимым образом и оценивать перспективу развития разведочных работ. Для реализации этой задачи используется созданная авторами компьютерная технология анизотропной магнитной и плотностной томографии недр (АМПТН), позволяющая получать объективную и воспроизводимую геологическую информацию о глубинном строении земной коры и ее верхних частей для воспроизводства запасов на освоенных территориях

Ключевые слова: геофизика; магнитная и плотностная анизотропия; технология АМПТН; практические результаты при решении геологических и прикладных задач

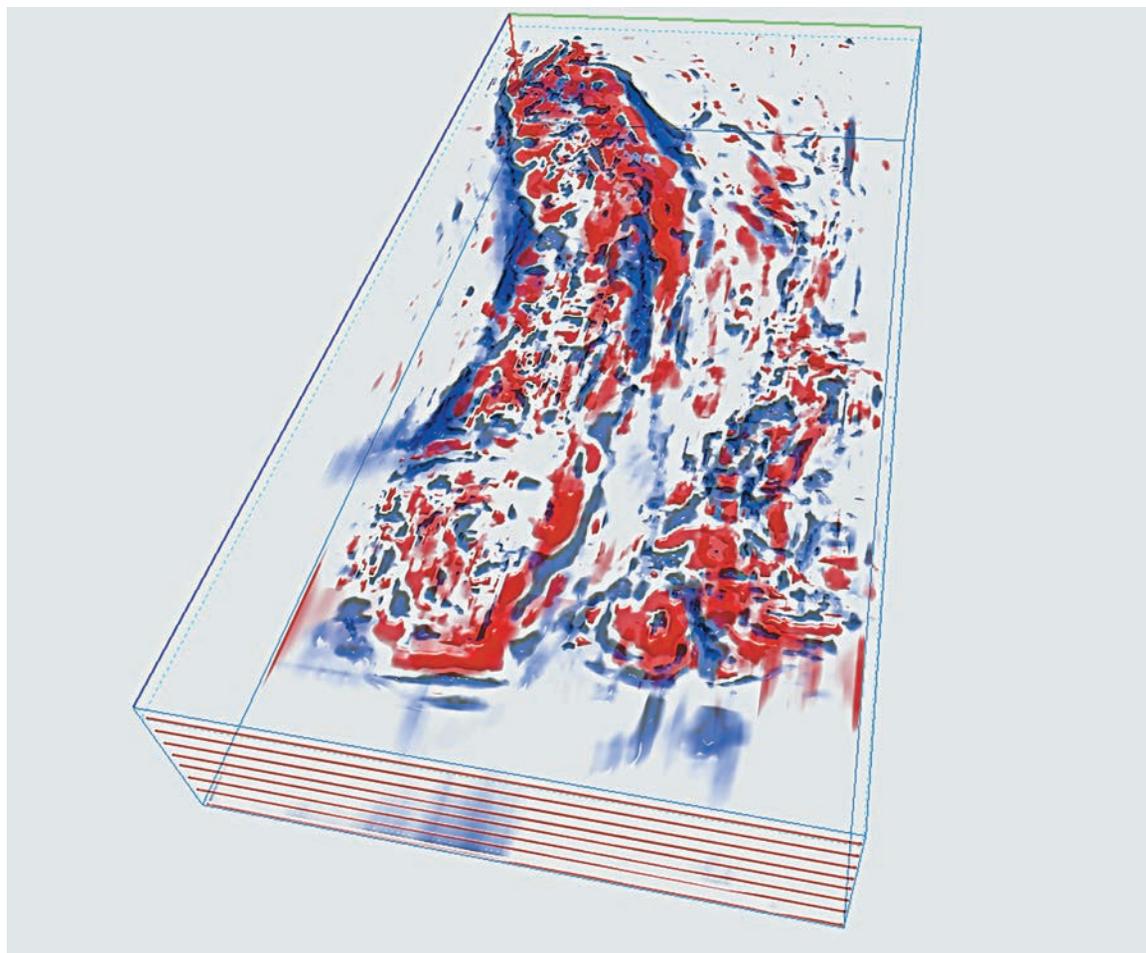
Предлагаемая экспрессная оценка запасов рудопроявлений (железорудных, мартитовых, хромитовых руд и, в перспективе – золотосульфидных, полиметаллических и других видов минерального сырья) проводится по результатам высокоточных магнитных и гравиметрических съемок. Данная операция позволяет более оперативно провести геологоразведочные работы на перспективных площадях, существенно сократить временные и инвестиционные затраты на освоение рудопроявлений с их переводом в класс месторождений. Томографические изображения геологического пространства известных рудных узлов, полей и флангов месторождений, позволяют локализовать перспективные рудные объекты по результатам геофизических съемок в объемном варианте, в пределах которых планируются последующие геологоразведочные работы. При этом существенно сокращаются затраты на проведение поисково-оценочных работ и объемы буровых работ.

Использование вещественных характеристик руд и вмещающей их среды (плотности и магнитной восприимчивости) в разработанной геотомографической технологии позволяет исследовать геологическое пространство достоверным и воспроизводимым образом и оценить перспективу развития разведочных работ.

Установленная возможность использования анизотропии магнитной восприимчивости горных пород и руд (ориентационная, плоскостная и формы) оценивается по отношению максимального значения измеряемой характеристики к минимальному. Чаще измеряется этот параметр, реже – остаточной намагниченности (насыщения, идеальной и т.д.).

Такая особенность вещественных характеристик геологических объектов позволяет использовать магнитную, а также и плотностную анизотропию (дифференциация плотности, вертикальная зональность и форма) для изучения геологического пространства в объемном варианте, а также в виде плоскостных, вертикальных и разноплановых глубинных томографических

Рис. 1.
Относительное распределение магнитных масс по глубине



изображений. В объемных представлениях выделяются стабильные, достоверные и воспроизводимые маркирующие объекты – опорные, магнитоактивные и плотностные разновидности горных пород и руд. На большом практическом материале АМПТН доказана возможность изучения глубинного геологического строения во всех возрастных диапазонах истории геологического развития Земли – от самых древних, архейских и палеопротерозойских метаморфизованных комплексов, до более молодых образований [1, 2]. Представляемая томографическая технология не имеет аналогов в мировой геологической практике, и может использоваться на любой стадии геологоразведочного процесса, вплоть до подсчета прогнозных запасов месторождений полезных ископаемых, а совместно с результатами бурения – и по более высоким категориям.

Развитая технология АМПТН создана путем совершенствования ранних и новых алгоритмов и программ статистического и спектрально-корреляционного анализа данных в информационной среде «КОСКАД 3D» (сертифицирована А.В. Петровым в ЕАГО) и может быть адаптирована в современные автоматизированные системы [5].

Технология АМПТН [2] и включает следующие блоки и алгоритмические решения.

1. Построение трехмерного томографического изображения относительного распределения магнитных масс с использованием модифицированного метода Б.А. Андреева [5].

2. Редактирование геотомографических построений (с учетом результатов бурения или другой достоверной информации) магнитных или гравитационных масс в изучаемом пространстве с использованием интерполяционных алгоритмов технологии «КОСКАД 3D» [5].

3. Оценку градиентных характеристик, отредактированных объемных изображений относительного распределения магнитных и плотностных масс.

4. Выделение в кубах относительного распределения магнитных, плотностных масс и их полных градиентов однородных по искомым значениям магнитной восприимчивости, плотности и их градиентам областей с использованием классификационных алгоритмов [5].

5. Выбор в кубе результатов кластер-анализа классов, которые ближе всего, в признаковом пространстве соответствуют значениям магнитной восприимчивости, плотности и их полных градиентов.

Возможности предлагаемой способа экспрессной оценки запасов рассмотрим на примере Суоямского железорудного месторождения, сложенного титаново-магнетитовыми

пироксенитами и серпентинитами. Месторождение находится в Прохоровско-Нязепетровской тектонической зоне Южного Урала среди пород верхней порфирито-туфовой толщи бардымской свиты. В плане, по данным магнитной съемки и бурения до глубин 300 м., форма массива линейно-вытянутая, простирание субмеридианальное, падение под углом 35–40° и более крутое – в центральной части.

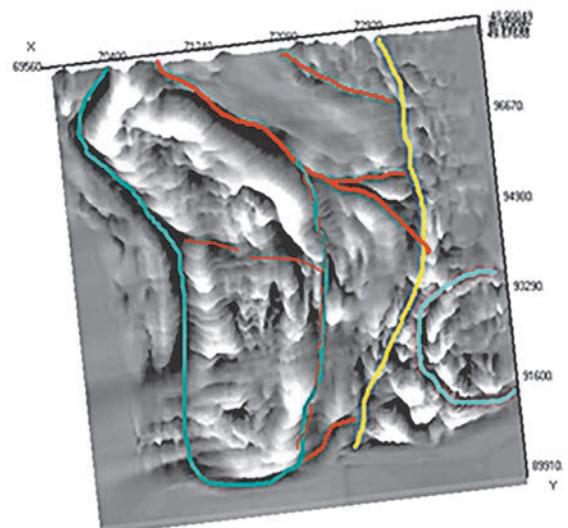
На месторождении после проведения долговременных геологоразведочных работ выделяется два типа промышленных руд: титаново-магнетитовый – по осевой центральной части массива, при содержаниях железа более 7% и P_2O_5 менее 1% и, апатит-титаномангнетитовый с содержаниями железа более 3% и P_2O_5 более 1% в краевых частях массива.

В основных рудах и подстилающих эффузивах, в приконтактной части, обнаружены повышенные содержания золота, серебра, палладия, платины и редких элементов – ванадия, германия и теллура.

Геофизические исследования в пределах месторождения проводились с 1931–1933 гг., а в военные годы (1943) впервые была поставлена магниторазведка в масштабе 1:10000. Целевыми задачами геофизических работ были локализация железорудных и медных объектов, для выделения которых использовались магниторазведка и метод вызванной поляризации (ВП).

В работах, проведенных в 1966 г., по данным комплекса геофизических методов име-

Рис. 2. Геоманитный томографический срез по глубине 100 м месторождения Суоям (анизотропия формы – к подсчету прогнозных запасов). В верхней части среза глубоко погребенный рудный объект, ограниченный тремя разломами (красный цвет)



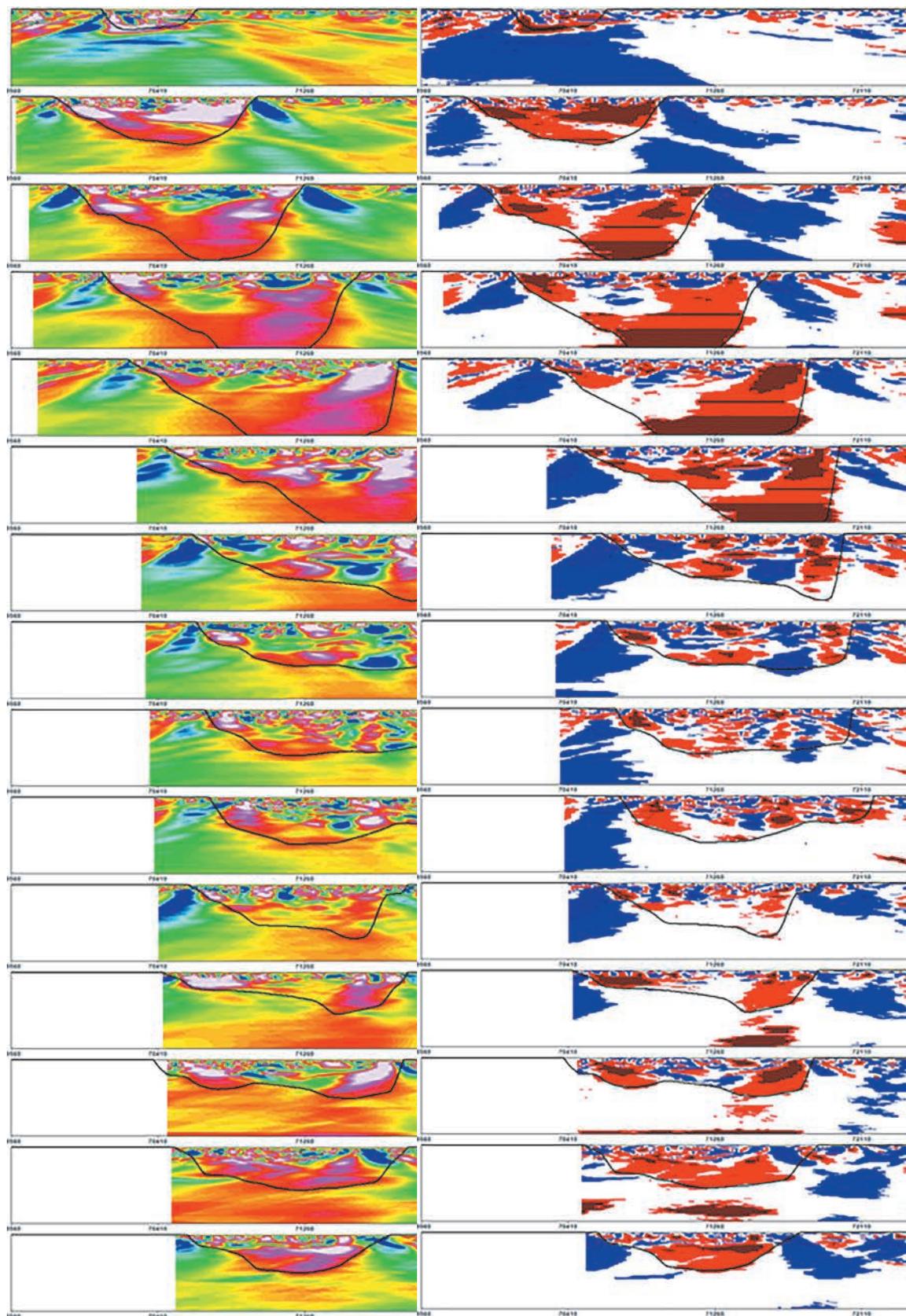


Рис. 3.
Нижняя кромка Суроямского пироксенитового массива на разрезах относительного распределения магнитных масс (слева) и кластеризации (справа)

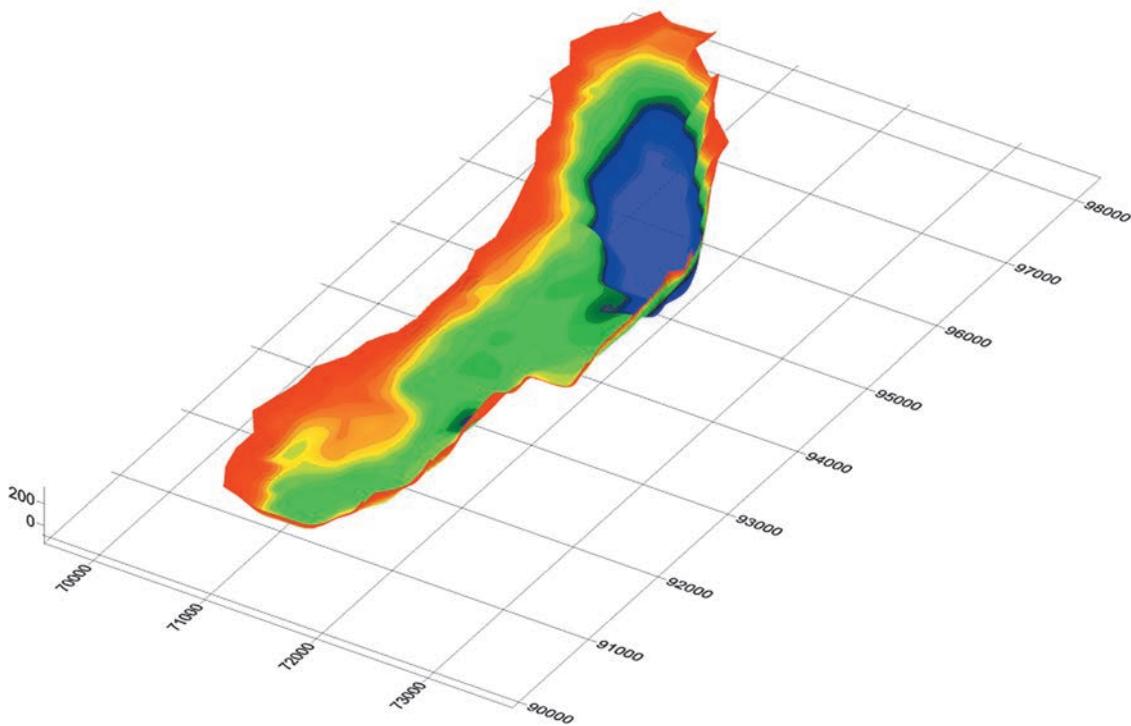


Рис. 4.
Поверхность, ограничивающая нижнюю кромку Суроямского пироксенитового массива

ются выводы о том, что «над массивом пироксенитов, имеющим лополитообразную форму и блоковое строение, магнитные аномалии достигают величин в 6000 нТл, аномалии ВП до 20%, а в гравиметрическом поле до 26 мГал». По этим результатам впервые были оценены ожидаемые запасы железа в 900 млн т, (при среднем содержании магнетита до 20%), и сделан вывод о перспективах массива для поисков комплексных ванадиево-титаномагнетитовых и апатитовых руд.

Последующие геофизические работы (1982–1984 гг.) включали площадную магниторазведку, профильные гравиразведку и электроразведку (ВЭЗ, ВП) с шагом в 50 и 200 м. В материалах работ имеются статистические представительные результаты изучения физических свойств горных пород (плотность, магнитная восприимчивость, поляризуемость и остаточная намагниченность), полученные на образцах горных пород, взятых из керна скважин через 5–10 м, по большинству разновидностей, слагающих геологический разрез. Отдельное внимание уделялось измерениям ферромагнитных характеристик образцов с магнитной восприимчивостью, превышающей 0,001 ед. СГС, по которым изучались остаточная намагниченность, параметр (Кенигсбергера) Q – отношение остаточной к индуцированной намагниченности.

Результаты исследований на стадии разведки включали:

- построение петрофизических разрезов по всем разведочным линиям;
- оценку зависимости плотности и магнитной восприимчивости от содержания магнетитового и общего железа и установление корреляционной взаимосвязи этих физических параметров;
- оценку коэффициентов парной корреляции, регрессионной зависимости плотности и магнитной восприимчивости, определение содержания общего и магнитного железа;
- результаты сопоставления магнитной восприимчивости от содержания железа магнетитового по рудам с использованием каротажных диаграмм и измерениями по образцам (более 400 по каждой разновидности).

Наземная магнитная съемка была проведена по сети 100 × 50 м, материалы которой были использованы при проведении анизотропной магнитной томографии в 2012 г., позволившей провести подсчет прогнозных запасов на глубину 600 м.

В общей сложности на освоение месторождения было затрачено более 80 лет, утверждение его запасов состоялось в ГКЗ только в 2012 г. В современном инвестиционном климате вряд ли найдется заинтересованная организация,

способная вложить свои капиталы в столь длительное промышленное развитие подобного объекта.

Такова исходная составляющая в развитии способа экспрессной оценки запасов, который основан на предлагаемых геофизических принципах, позволяющих существенным образом ускорить эту процедуру с наименьшими временными и экономическими затратами на геологоразведку. Авторы абстрагируются от вышеприведенных результатов на стадии разведки, которые несомненно полезны и констатируют следующие моменты в проведении анизотропной геомагнитной томографии.

1. Для получения цифровой информации при проведении АМПТН в системе «КОСКАД 3D» использовалась карта аномального магнитного поля по всей площади массива для оценки прогнозных ресурсов совместно с результатами буровых работ. Особенно важной была задача определения положения нижних кромок пироксенитового массива, в его восточной части входящих на значительную глубину.

2. Построено томографическое изображение относительного распределения магнитных масс до глубины 750 м от дневной поверхности (рис. 1), что позволяет по 7 горизонтальным изображениям определить характер погружения рудопоявления на глубину и определить местоположение трех участков магматического внедрения перспективного массива из глубинной зоны Прохоровского-Петровского разлома.

3. Приведенный на рис. 2 плоскостной томографический срез по глубине 100 м мог бы быть получен и ранее, после проведения магнитной съемки в 1982 г., однако в те времена отсутствовала развитая нами технологии АМПТН. На данном томографическом плоскостном срезе, полученном по результатам АМПТН (анизотропия формы), на глубине 100 м отчетливо картируются внешние границы месторождения (синий цвет) и общая структура рудной залежи. Внедрение рудной массы месторождения происходило инъекционным образом из основной, Прохоровской-Нязепетровской субмеридиональной тектонической зоны (желтый цвет).

4. В объемном представлении в нижнем полупространстве залежь ограничивается на глуби-

не 560–580 м вплоть до регионального глубинного разлома по детальной серии плоскостных томографических срезов. В юго-восточной части на рис. 2 отмечается аналогичное внедрение массива кольцевого типа (голубой цвет), корневые части которого также явно связаны с этим тектоническим швом. Красным цветом показана тектоническая зона СЗ простирания, к которой приурочено русло реки Суroyам.

5. Отмечается малозаметное погружение блока к югу от широтной тектонической зоны, что следует учесть при дальнейшем развитии разведочных работ на месторождении. Представляет большой практический интерес кольцевая структура (выделенная голубым цветом) в юго-восточной части планшета, вероятно, не входящая в пределы лицензионного участка, а также другие важные детали геологического строения месторождения.

По результатам АМПТН с использованием новой технологии и оценки градиентных характеристик магнитного поля получена воспроизводимая достоверная информация о перспективном массиве и проведена оценка запасов (табл. 1).

Доказана высокая степень сходимости с результатами проведенного бурения и подсчета запасов с использованием блочного моделирования (рис. 5), что свидетельствует о достоверности предлагаемой технологии.

Таким образом, по результатам АМПТН были решены следующие целевые задачи:

- уточнены глубинное геологическое строение месторождения и природа его образования;
- по глубинным геомагнитным срезам и градиентным характеристикам уверенно выделяется нижняя граница Суroyамского массива, что позволяет оценить в полном объеме прогнозные ресурсы месторождения и обеспечить прирост этих запасов, особенно на участках отсутствия скважинных пересечений, на глубинах свыше 300 м;

- предложен новый геофизический томографический подход к оценке запасов месторождений железа, требующий дальнейшего развития с использованием результатов высокоточной гравиметрии на перспективных площадях цветных и полиметаллических руд.

Таблица 1.
 Прогнозные ресурсы по категории P₁₊₂

Тип	Плотность (г/см ³)	Масса (млрд. т)	Fe _{total}	Fe _{mag}	TiO ₂	V ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Cu
Титаномагнетит + Апатит-титаномагнетит	3,42	8,37	14,34	9,52	1,03	0,07	0,33	0,05

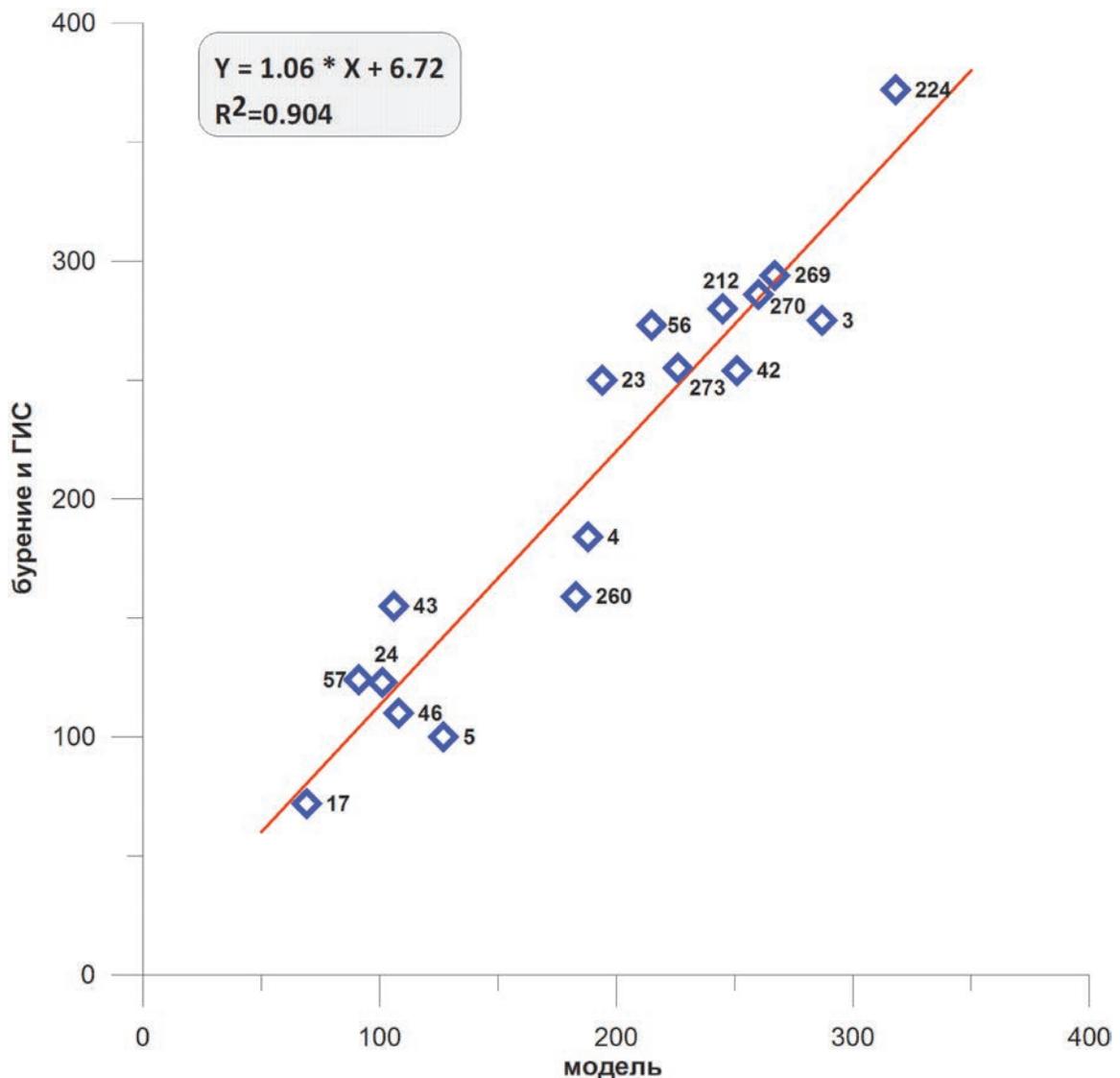


Рис. 5. Корреляционная диаграмма положения нижней кромки Суроямского пироксенитового массива по данным ГИС, бурения (номера скважин) и АМТН

Полученные оценки нижней границы достоверны, совпадают с результатами проведенных буровых работ в пределах месторождения. Прогнозные ресурсы по категории $P_1 + P_2$ по массе составляют 8,7 млрд т при плотности руд $3,42 \text{ см}^3$.

Приведенные данные являются первым отечественным опытом, позволившим полностью определить запасы Суроямского месторождения по магнитным данным 1982 г., что было отмечено в протоколе ГКЗ РФ с принятой геофизической оценкой прогнозных ресурсов.

Основным итогом работ является оценка положения границы нижней кромки пироксенитового массива, а также прирост запасов на глубину, определение местоположения основных структурно-тектонических элементов ис-

следуемой территории и выделение отдельных кольцевых структур на флангах месторождения. Учитывая тот факт, что представленная технология экспресс-оценки запасов базируется на результатах относительно дешевых магнитной и гравитационной съемок и использовании современных отечественных компьютерных технологий, не вызывает сомнения экономическая целесообразность ее применения. Таким образом, построение магнитных или плотностных объемных томографических изображений необходимо, как с целью получения дополнительной информации о глубинном геологическом строении перспективных территорий и экспрессной оценки запасов, так и в целях ревизии качества составляемых геологических карт различных масштабов с использованием

достоверных магнитных и плотностных маркеров [6].

Представляется перспективной идея создания банка данных высокоточных данных гравимагнитных съемок в системе Росгеологии, доступных для покупки инвесторам (как это делается в западных странах) с целью предва-

рительной оценки перспективных площадей по материалам обработки с помощью технологии АМПТН. Данный вариант позволит существенно снизить затраты на проведение геологоразведочных работ и повысит инвестиционную привлекательность для освоения новых рудных рудопроявлений. 

Литература

1. Демура Г.В., Зиновкин С.В., Петров А.В. Новые возможности и перспективы магниторазведки – компьютерные технологии объемного моделирования и фильтрации результатов высокоточных площадных съемок // Недропользование XXI век. 2013. № 4.
2. Демура Г.В., Петров А.В. Физико-геологическое моделирование и анизотропная магнитная геотомография недр // Геофизика. 2014. № 6. С. 18–24.
3. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. М. 2008.
4. Петров А.В., Демура Г.В., Зиновкин С.В. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D и практические результаты // Недропользование XXI век. 2017. № 1. С. 44–59.
5. Петров А.В., Юдин Д.Б. Функциональное наполнение компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных, организованных в профильные сети «КОСКАД ПРОФИЛЬ» // Материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. Москва, ИФЗ. 25–29 января 2010 г.
6. Демура Г.В. Анизотропная геомагнитная и плотностная томография недр в компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D» // Недропользование XXI век. 2016. № 5. С. 102–110.

UDC 550.83

G.V. Demoura, Doctor Geological and Mineralogical Sciences, Professor, gennady_demoura@mail.ru

S.V. Zinovkin, PhD, assistant professor, Senior Lecturer of Geophysics Chair of MGRI-RSGPU¹

A.V. Petrov, Doctor of Physics and Mathematics, Dean of Geophysical Department of MGRI-RSGPU1, petrovstud@mail.ru

¹Russian State Geological Prospecting University (MGRI-RSGPU), 23 Mikluho-Maklay's street, Moscow, 117997, Russia.

An Express Method of gravi-magnetic Tomography for Estimating Reserves of Ore Occurrences Ferrous and Non-ferrous Metals

Abstract. The rapid assessment of reserves of ore occurrences (iron ore, martitic, chromite ores and, in the long term – gold sulfide, polymetallic and other types of mineral raw materials) offered by the authors is based on the results of high-precision magnetic and gravimetric surveys. The use of the physical characteristics of ores and their host environment (density and magnetic susceptibility) in geotomographic technology makes it possible to explore the geological space in a reliable and reproducible way and to assess the prospect of exploration. To realize this task, the computer technology of anisotropic magnetic and density tomography of subsurface is used, which allows obtaining objective and reproduced geological information about the deep structure of the earth's crust and its upper parts for the reproduction of reserves in the developed territories

Keywords: geophysics; magnetic and density anisotropy; AMDTS technology; practical results in solving geological and applied problems

References

1. Demoura G.V., Zinovkin S.V., Petrov A.V. *Novye vozmozhnosti i perspektivy magnitorazvedki – komp'yuternye tekhnologii ob'emnogo modelirovaniia i fil'tratsii rezul'tatov vysokotochnykh ploshchadnykh s'emok* [New opportunities and prospects of magneto-prospecting- computer technologies of volumetric modeling and filtration of results of high-precision area surveys]. *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil use of the XXI century], 2013, no. 4.
2. Demoura G.V., Petrov A.V. *Fiziko-geologicheskoe modelirovanie i anizotropnaia magnitnaia geotomografiia neдр* [Physical-geological modeling and anisotropic magnetic geotomography of subsurface]. *Geofizika* [Geophysics], 2014, no. 6, pp. 18–24.
3. Nikitin A.A., Petrov A.V. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii* [Theoretical bases of geophysical information processing]. Moscow, 2008.
4. Petrov A.V., Demoura G.V., Zinovkin S.V. *Komp'yuternaia tekhnologiia statisticheskogo i spektral'no-korreliatsionnogo analiza dannykh KOSKAD 3D i prakticheskie rezul'taty* [Computer technology of statistical and spectral-correlation analysis of COSCADE 3D data and practical results]. *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil use of the XXI century], 2017, no. 1, pp. 44–59.
5. Petrov A.V., Iudin D.B. *Funktsional'noe napolnenie komp'yuternoii tekhnologii statisticheskogo i spektral'no-korreliatsionnogo analiza dannykh, organizovannykh v profil'nye seti «KOSKAD PROFIL'»* [Functional content of computer technology for statistical and spectral-correlation analysis of data organized in profile networks “KOSKAD PROFIL’”]. Proc. of the 37th Int. Sem. D.G. Uspensky. Moscow, IFZ. January 25–29, 2010.
6. Demoura G.V. *Anizotropnaia geomagnitnaia i plotnostnaia tomografiia neдр v komp'yuternoii tekhnologii statisticheskogo i spektral'no-korreliatsionnogo analiza dannykh «KOSKAD 3D»* [Anisotropic geomagnetic and subsurface tomography of subsurface in computer technology of statistical and spectral-correlation analysis of data “KOSKAD 3D”]. *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil use of the XXI century], 2016, no. 5, pp. 102–110.