УДК 550.838

Г.В. Демура
д-р геол.-мин. наук
РГГРУ
профессор

С.В. Зиновкин
РГГРУ
доцент

А.В. Петров
д-р физ.-мат. наук
РГГРУ
профессор
alexpetrov76@mail.ru

Новые возможности и перспективы магниторазведки – компьютерные технологии объемного моделирования и фильтрации результатов высокоточных площадных съемок

Рассмотрены возможности современной цифровой высокоточной магниторазведки, использующей высокоточные магнитометры и градиентометры, привязка результатов которой обеспечивается системой GPS, радарной топографией, а обработка и интерпретация полученных результатов проводится с использованием автоматизированных систем КОСКАД 3D, КОСКАД ПРОФИЛЬ и КОСКАД МОДЕЛИРОВАНИЕ

Considered are the possibilities of modern digital high-precision magnetic prospecting, uses a high-precision magnetometer and градиентометры, linking results which provides GPS, radar topography, processing and interpretation of the obtained results is carried out with the use of automated systems COSCAD 3D, COSCAD PROFILE and COSCAD MODELING

Ключевые слова: комплексные геофизические наблюдения, высокоточная магниторазведка, автоматизированная система КОСКАД 3D, урановое месторождение Россинг
Keywords: integrated geophysical observation, high-precision magnetic survey, automated system COSCAD 3D, uranium Deposit Rossing

В последние годы отмечается зримый прогресс в повышении геологической эффективности высокоточной магниторазведки при изучении геологического строения верхней части геологического разреза на глубинах, доступных для эксплуатации рудных месторождений ПИ. Особое значение этого метода связывается с изучением территорий развития древних архейских и палеопротерозойских пород, на которых применение большинства геофизических методов не приводит к получению предметных результатов. В частности, практически бесперспективна постановка таких методов,

как гравиразведка и сейсморазведка, по большей части, из-за близости плотностных и скоростных характеристик этих образований. По условиям ведения работ и физическим предпосылкам мал геологический эффект площадной электроразведки, особенно контактных методов, что подтверждается относительно малыми объемами работ и неоднозначностью интерпретации ее результатов. Результативность электроразведки повышается в случае комплексного проведения работ и, чаще всего, в аэровариан-те дипольного индуктивного профилирования, метода переходных процессов, с обязательным использованием магнитного канала, особенно на территориях развития зеленокаменных поясов, примыкающих к щитам, при поисках медно-никелевого и других типов оруденения.

Известно, что сложные, суперпозирующие магнитные поля, регистрируемые на поверхности земли и в воздухе, зачастую не позволяют получить однозначные заключения о геологическом строении верхних частей геологического разреза. Для получения более достоверной информации необходимо проводить сложные лабораторные исследования ферромагнитных компонент горных пород на ориентированных образцах и в специально оборудованных лабораториях.

В конце 1970-х гг. на одной из таких территорий в пределах развития древних кристаллических сланцев и мигматитов архея Алданского щита, проводились работы по детальному геолого-геофизическому картированию. Эти исследования на флангах известных месторождений флогопита были связаны с воспроизводством запасов Эльконской группы, находящейся вблизи одноименных урановых месторождений, готовящихся к эксплуатации в настоящее время.

Комплекс кристаллических сланцев Центрального Алдана принадлежит к специфической петрографической формации, широко распространенной почти на всех древних щитах. Породы этой формации представлены гнейсами, плагиосланцами, доломитовыми мраморами. Толщи кристаллических сланцев хорошо выдержаны по простиранию и обладают большой мощностью. Метаморфизм этих толщ чрезвычайно глубок и отвечает условиям гранулитовой фации, а мигматизация по отношению к региональному метаморфизму является регрессивным процессом. С мигматизацией тесно связано формирование богатых калием аляскитовых гранитов, которые считаются специфическими образованиями урановых провинций.

Считается, что на таких сложно построенных площадях детальное изучение магнитных свойств не приводит к получению однозначных результатов интерпретации. В исследованиях все же была предпринята попытка изучения природы намагниченности и оценка долей остаточной и индуктивной намагниченностей, состава и точек Кюри ферримагнетиков. Это было связано и с тем, что продуктивные на флогопит-постмагматические магнетитовые метасоматиты в магнитном поле отражались в виде интенсивных отрицательных магнитных аномалий на фоне положительных, связанных со скарнами этапа мигматизации, что позволило считать такую совокупность детерминированных аномалий в качестве маркирующей [9].

С другой стороны, имелась необходимость разбраковки прямо и обратно намагниченных объектов в интенсивном магнитном поле, поэтому в комплексе был использован метод индуктивной электроразведки НП, позволивший исключить влияние остаточной намагниченности и оценить их доли [8].

В целом результаты сопоставления магнитных съемок с геологическими данными, измерениями магнитной восприимчивости горных пород показали, что магнитное поле на таких площадях достаточно дифференцировано и осложнено помехами различной природы.

На опорных геолого-геофизических разрезах было доказано, что магнитное поле определяется литологическим составом горных пород, слагающих верхнюю часть геологического разреза, и позволяет использовать магнитные маркеры при проведении работ по геологическому картированию [7].

В свою очередь, несмотря на сложный характер магнитных полей, локальными аномалиями достаточно уверенно выделялись обогащенные ферромагнетиками тектонические зоны, дайковые тела, постмагматические метасоматиты и скарны этапа мигматизации. Вмещающие горные породы, кристаллические сланцы и мигматиты характеризуются сложными по структуре магнитными полями, при их выделении и трассировании впервые использовались разработанные статистические приемы адаптивной фильтрации данных геофизического комплекса [11].

Именно эти обстоятельства привели к необходимости проведения параметрических измерений магнитной восприимчивости на коренных выходах горных пород и ориентированных образцах вмещающих горных пород – кристаллических сланцев и мигматитов для получения более обоснованных результатов трассирования маркирующих магнитных объектов по площади с целью создания воспроизводимых геологических карт [4].

Массовые параметрические измерения магнитной восприимчивости позволили установить наличие магнитной анизотропии в кристаллических сланцах федоровской свиты архея. Анизотропия магнитной восприимчивости оценивалась на образцах и обнажениях горных пород путем сравнения величин магнитной восприимчивости в 3 взаимно перпендикулярных направлениях. В нашем случае измеренная ортогонально по отношению к пластинам биотита магнитная восприимчивость была минимальной в биотитовых и биотит-роговообманковых кристаллических сланцах, а результирующий эллипсоид магнитной восприимчивости был удлинен и параллелен плоскости пластин биотита. Измерения по направлению плоскостей пластин биотита, по обрамлению которых под микроскопом при больших увеличениях (до 500) отмечаются оторочки тонкодисперсного магнетита, отличались максимальной восприимчивостью. В частности, для биотитовых и биотит-роговообманковых плагиосланцев величины магнитной восприимчивости, выражаемые отношением продольной (вдоль напластования) к поперечной, были выше в 1,5–2 раза.

Именно с присутствием тонкодисперсного магнетита в биотитовых и биотит-роговообманковых плагиосланцах (значения магнитной восприимчивости этих групп горных пород достигают величин 300 × 10–5 ед. СИ) связаны магнитные аномалии (до 250–300 нТл). Зачастую визуально, эти породы трассировались в магнитном поле между опорными разрезами и использовались в качестве магнитных маркеров при создании основного каркаса геологической карты [7]. Эти аномалии также надежно выделялись и в осложненном тектоникой магнитном поле с помощью предложенной адаптивной (самонастраивающейся) фильтрации [11].

В дальнейшем этот алгоритм был внедрен в компьютерную систему «КОСКАД 3D», автором которой является А.В. Петров [15].

Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D была разработана для анализа 3-мерной цифровой геоинформации, организованной в 3-мерные регулярные сети, вероятностно-статистическими методами. Первые версии компьютерной технологии появились в начале 1980-х гг. и содержали программные реализации оригинальных методов и алгоритмов, разработанных в МГРИ на кафедре ядерно-радиометрических методов под руководством профессора А.А. Никитина.

Сегодня использование компьютерной технологии КОСКАД 3D дает возможность провести на современном уровне полный статистический, градиентный и спектрально-корреляционный анализ геоданных, выполнить расчет спектров Фурье и различных корреляционных функций, осуществить вейвлет-преобразование и корреляционное зондирование.

В технологии широко представлены 1D, 2D и 3D линейные оптимальные фильтры, использование которых позволяет представить исходное поле набором составляющих с последовательным уменьшением доли низких частот. Уникальные алгоритмы адаптивной линейной фильтрации и фильтрации в окне «живой» формы дают возможность корректно обрабатывать нестационарные по спектрально-корреляционным характеристикам геофизические поля.

Программная реализация методов межпрофильной корреляции, самонастраивающейся фильтрации, обратных вероятностей и их многомерных аналогов позволяет успешно решать задачу обнаружения слабых сигналов на фоне соизмеримых по амплитуде помех.

Алгоритмы комплексного анализа нескольких геолого-геофизических признаков и их производных предназначены для решения задач геологического районирования, картирования и прогнозирования на базе методов распознавания и классификации по данным комплексных геофизических, геохимических и геологических наблюдений.

Среди множества алгоритмов, составляющих функциональное наполнение компьютерной технологии КОСКАД 3D, рассмотрим некоторые, применение которых позволяет существенным образом повысить эффективность и информативность результатов конечной интерпретации данных магниторазведки.

1. Алгоритм оценки градиентных и статистических характеристик магнитного поля в окне «живой» формы

Стандартная технология скользящего окна, которая используется в алгоритмах оценки статистических характеристик геополей и линейной оптимальной фильтрации, содержит множество недостатков – зависимость конечных результатов от размеров окна, размытие формы аномалии при фильтрации, отсутствие механизма учета нестационарности геофизических наблюдений и т.д. Технология окна «живой» формы [17] лишена этих недостатков и позволяет получать корректные результаты даже в условиях сильной нестационарности анализируемого поля.

Принципиальная схема алгоритма заключается в оценке двумерной автокорреляционной функции $D(m, p)$ в каждой точке поля в окрестностях базового скользящего окна и выборе для

оценки атрибута или реализации свертки только точек, коррелируемых с центральной в базовом окне.

Анализ градиентных характеристик потенциальных полей дает возможность получить дополнительную информацию об их особенностях. В полях градиентов контрастнее выделяются границы аномальных объектов по соответствующим направлениям.

2. Процедура автоматического трассирования осей аномалий

Алгоритм предназначен для трассирования аномалий различных энергий от профиля к профилю. Для трассирования используется оригинальная модификация одномерной адаптивной нелинейной фильтрации. Суть алгоритма заключается в нелинейном усилении сигнала с учетом уровня поля в окрестностях локальной анализируемой области (базовом окне). В основе алгоритма лежит нелинейный фильтр, критерием оптимальности которого является максимизация отклика на локальные экстремумы и точки перегиба поля.

Применение данного алгоритма позволяет в автоматическом режиме провести детальный анализ особенностей поля, оценить положение осей аномалий различной амплитуды, простирания и размеров. Точки прогибов поля можно интерпретировать как границы между областями стационарности геополей, которые контролируют геологические границы и тектонические дислокации. Кроме этого, использование алгоритма при обработке 3-мерных модельных построений позволяет трассировать положение осей объемных аномалиеобразующих тел и их границ в пространстве.

3. Статистическое или корреляционное зондирование

Под статистическим или корреляционным зондированием понимается оригинальный подход к оценке изменения статистических и корреляционных характеристик поля с глубиной на основе их вычисления в скользящих окнах увеличивающихся размеров. Учитывая, что высокочастотные составляющие поля чаще всего индуцируются объектами, расположенными на малых глубинах, или помехами, а низкочастотные отражают свойства аномальных тел, залегающих на больших глубинах, возможно построение алгоритма, позволяющего получить оценку распределения того или иного статистического параметра с глубиной.

Таким образом, изменение размеров окна позволяет провести статистическое зондирование с целью обнаружения неоднородностей в строении геологического разреза и наличие границы развития дезинтеграции в ВЧР по результатам магнитной съемки.

По участку Тумас в Намибии развитие зоны дезинтеграции коренных горных пород отмечается на глубинах до 160 м, что подтверждается результатами бурения. Картируется древняя палеодолина, к которой приурочены урансодержащие калькреты рыхлых отложений. Полученные данные позволяют целенаправленно организовать проведение буровых работ в координатах относительно спокойного магнитного поля над древними палеодолинами. Это убеждает в перспективности проведения цифровых магнитных съемок для определения границ плотика и на россыпных месторождениях России, особенно на площадях развития вечной мерзлоты, где данные электроразведки в вариантах зондирования крайне неоднозначны.

4. Модифицированный метод вариаций Б.А. Андреева

В 1938 г. Б.А. Андреев предложил метод вариаций для оценки распределения аномалиеобразующих объектов по глубине и оценки их параметров по разрезу. В основе модифицированного алгоритма лежит нетрадиционной подход к решению задачи, базирующийся на построении полосового фильтра в окне «живой» формы. Применение такого фильтра позволяет корректно осуществлять полосовую фильтрацию в условиях нестационарности анализируемого поля.

Полученный для определенного диапазона частот результат фильтрации отражает распределение и интенсивность источников на определенных глубинах. Проведение такой фильтрации с последовательным уменьшением доли высоких частот позволяет построить 3-мерную модель относительного распределения гравитационных и магнитных масс по глубине.

В состав компьютерной технологии КОСКАД 3D входят две подсистемы – КОСКАД ПРОФИЛЬ и КОСКАД МОДЕЛИРОВАНИЕ. Первая предназначена для обработки и интерпретации методами вероятностно-статистического подхода геофизической информации, организованной в профильные сети, вторая – для гравитационного и магнитного 3D моделирования на основе решения прямых задач гравимагнитометрии.

Впервые анизотропные геомагнитные разрезы по вертикальному и полному градиенту магнитного поля были построены в компьютерной технологии КОСКАД 3D по результатам объемного геомагнитного моделирования на площадях, перспективных на урановое оруденение, в Намибии [3].

В работе была использована идея ранее полученного заключения о наличии магнитной анизотропии на площадях развития древних архейско-протерозойских образований. Опробование проводилось на материалах высокоточной аэромагниторазведки, проведенной кампанией *FUGRO* в сходных геологических условиях на флангах уникального уранового месторождения Россинг – участке Кхан [3], а затем и на других перспективных участках этой провинции, а также и на некоторых месторождениях в России.

Здесь формация (комплекс, пояс) Дамара, примыкающая с юга к Конго-кратону, в основании сложена архейскими гранито-гнейсами и мигматитами и перекрывается палеопротерозойскими биотитовыми, биотит-кордиеритовыми и графитизированными кристаллическими сланцами, силикатно-кальцитовыми породами и мраморами группы *Nosib* формаций *Khan* и *Rossing* [5].

Перечисленные выше основополагающие обстоятельства были учтены при интерпретации комплексных аэрогеофизических данных на участке р. Свакоп, пересекающей площадь в субширотном направлении, и р. Кхан (в субмеридианальном).

Основные проявленные элементы комплексных полей находят отражение на фрагменте новой геологической карты масштаба 1:250 000 и, по-видимому, использовались при ее редактировании (***рис. 2***). В частности, в магнитном поле четко картируются обрамления гранито-гнейсовых куполов и примыкающие к ним участки развития палеопротерозойских осадочных пород. Пониженными значениями магнитного поля в восточной части планшета картируется древняя внутриконтинентальная рифтовая зона Велвишиа [5, 12 , 13].

Технология получения глубинных анизотропных магнитных разрезов связана с имеющимися в КОСКАДе алгоритмами объемного моделирования потенциальных полей. Среди них разработанный для решения обратной задачи гравиразведки метод Б.А. Андреева. Метод модифицирован А.В. Петровым на основе полосовой частотной фильтрации во временной области с применением адаптивного двумерного полосового фильтра, в окне «живой формы» [16].

Созданная им программа предназначена для оценки геометрии и относительного распределения масс аномальных источников. Она базируется на интегрированном использовании статистических, спектрально-корреляционных методов и алгоритма адаптивной фильтрации в окне «живой» формы.

Общий вид 3-мерной модели относительного распределения магнитных масс получают по исходному полю в виде 3-мерного куба. Однако такое эффектное представление малоинформативно, поэтому далее лучше проводить изучение градиентных составляющих объемной модели по линиям разрезов. Именно знание статистических оценок градиентов магнитного поля позволяет детализировать особенности поля и четко выделять границы аномальных объектов.

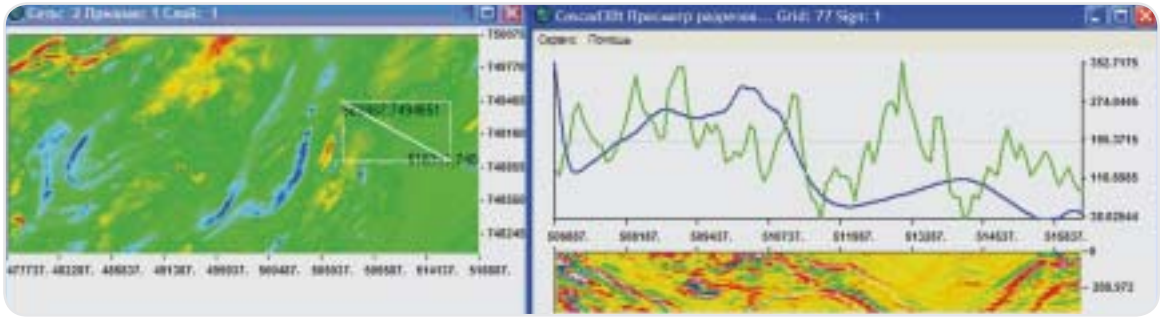
Преобразование проводится по глубинной (вертикальной) составляющей градиента, затем по этой матрице проводят «автоматическое трассирование аномалий». Здесь используется оригинальная модификация одномерной адаптивной фильтрации для трассирования аномалий различных энергий и различного направления, также предложенная А.В. Петровым [15].

Большой интерес с точки зрения изучения регионального глубинного геологического строения представляет субконтинентальная рифтовая зона Велвишиа и примыкающая к ней с запада площадь.

Согласно Миллеру, все комплексы горных пород, примыкающие к рифтовой зоне, образовывались в условиях спрединга, субдукции и континентальной обдукции [12, 13].

Координаты полученного геомагнитного разреза, в ЮВ направлении ортогонального по отношению к зоне Велвишиа, приведены на

Рис. 1.
Глубинный геомагнитный разрез по результатам объемного моделирования



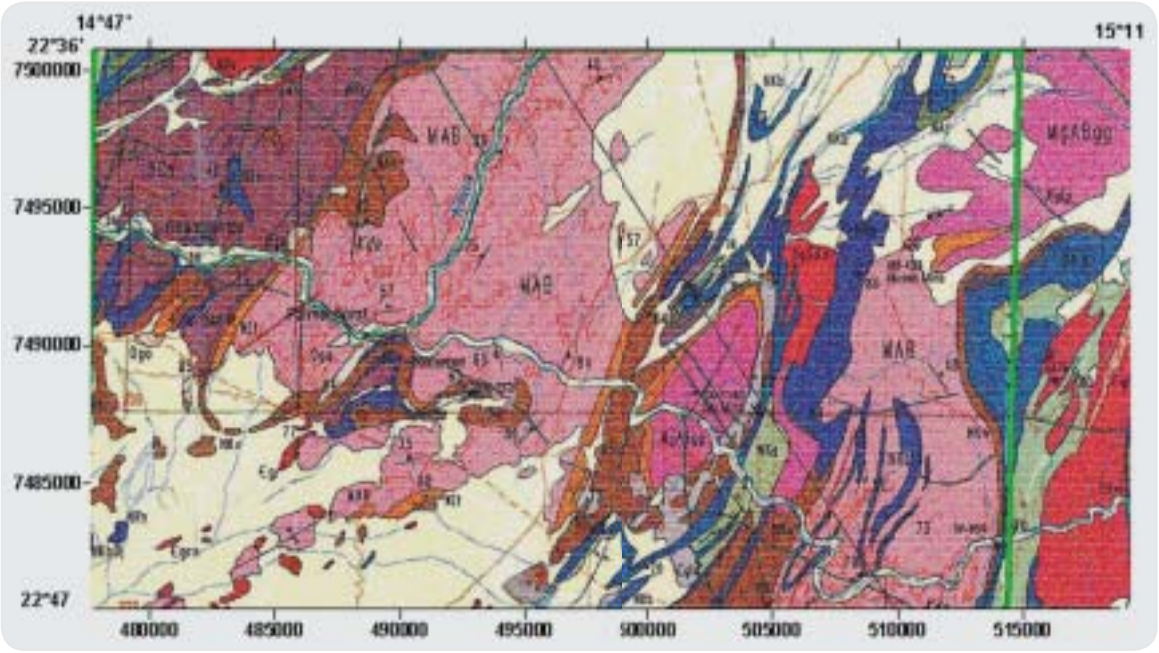


рис. 1. В исходном магнитном поле зона явно выражена широкой (до 2 км) полосовой аномалией с разливом, по которой получен глубинный геомагнитный разрез. На разрезе (по координате от X-510734 до X-515837 к ЮВ) выделяется широкий синклинальный прогиб, западный борт которого сложен породами продуктивной формации *Khan*, в непосредственной близости от месторождения *Husab Mine*. Формация включает магнитные амфиболовые и биотитовые сланцы, а также амфибол-пироксеновые гнейсы, мраморы, кальцит-силикатные породы. По глубине местоположение формации связывается с двумя протяженными, узкими аномалиями вертикального градиента магнитного поля, вероятней всего, связанных с магнитными кристаллическими сланцами, картирующими синклинальную складку, которая погружается на глубину более 400 м. В верхней части прогиба залегают немагнитные кварциты, аркозовые песчаники, конгломераты, филлиты, известняки и эвапориты [5, 12, 13]. С востока синклинальный прогиб примыкает к субвулканической интрузии красных гранитов (X-515837).

Впервые полученные результаты хорошо согласованы с разрезом, а магнитное поле площади (слева) хорошо согласуется с геологической картой масштаба 1:250 000.

Безотносительно к геологическим результатам получена серия геомагнитных разрезов по площади развития палеопротерозойских кристаллических сланцев и гранитогнейсовых куполов на территории возможного развития зон уранового пластового окисления в северо-западной части Намибии. Разрезы также построены по результатам объемного моделирования и представляют собой полную картину геомагнитных маркеров, которые не могут быть разрешены в сейсмических, гравиметрических и электромагнитных полях. При наличии такой глубинной картины (более 1 км) имеется возможность отрисовки положения гранитогнейсовых куполов и прилегающей складчатости, а также зон тектонических нарушений, малая часть из которых нашла подтверждение в редких разведочных скважинах этого перспективного района.

Рис. 2.
Фрагмент геологической карты масштаба 1:250 000 (1998 г.): розовый цвет – поля развития гранитогнейсовых куполов и мигматитов; серо-голубой – тела аляскитовых гранитов; коричневый и синий – палеопротерозойские кристаллические сланцы, мраморы, песчаники, брекчии и пр., облекающие купольные структуры гранито-гнейсов

Выводы

1. Следует рекомендовать быстрейшее внедрение рассмотренной методики изучения верхних частей геологического разреза доступных для эксплуатации месторождений на основе изучения анизотропных магнитных сред, которые, безусловно, имеются и в более молодых геологических образованиях.

2. Современные аэрогеофизические технологии в сочетании с новыми приемами обработки и интерпретации данных позволяют проводить оперативную оценку и локализацию потенциально перспективных площадей для последующего развития поисково-разведоч-

ных работ. При этом достигается существенное увеличение производительности геофизических работ, сокращение затрат и сроков на их проведение, что, в конечном итоге, приводит к уменьшению инвестиционных рисков.

3. Работы необходимо проводить в четкой последовательности: от объемного моделирования и фильтрации до получения геомагнитных разрезов любой детальности, их корреляции в пространстве.

4. Рассмотренная компьютерная технология позволяет совместно с геологическими результатами создавать объемные геологические изображения, в том числе и в томографическом варианте, вплоть до подсчета прогнозных запасов месторождений.

5. Предметная нагрузка таких моделей с опорными градиентными магнитными аномалиями может быть дополнена информацией, полученной при проведении геолого-съемочных и поисково-разведочных работ для различных геологических условий при решении широкого круга целевых геологических задач.

6. В современных условиях следует развивать проведение цифровых, высокоточных, детальных вариантов аэромагниторазведки в комплексе с дополнительными каналами, которые определяются в зависимости от поставленных целевых геологических задач.

7. Для изучения глубин доступных для эксплуатации месторождений ПИ полученная информация долговременна и воспроизводима, на ее получение не следует ограничивать финансовые затраты.

8. Основным преимуществом магниторазведки в сравнении с результатами рудной сейсморазведки, не всегда обеспечивающей однозначное разрешение малых глубин залегания целевых геологических объектов, особенно, когда они слабо дифференцированы по плотностным и скоростным параметрам, является наличие геомагнитных маркеров. Предметная нагрузка моделей с градиентными магнитными маркерами может быть подтверждена информацией, полученной при проведении геолого-съемочных и поисково-разведочных и буровых работ.

Литература

1. Коржинский Д.В. Петрология архейского комплекса алданской плиты. Тр. ЦНИГРИ. Вып. 86. 1936.
2. Веревкин Н.И.и др. Стратиграфия архея центральной части Алданского щита / Геология и петрология докембрия Алданского щита. М. 1966.
3. Демура Г.В. Возможности высокоточной аэрогамма-спектрометрической и магнитной съемок при глубинном картировании древних магнито-анизотропных пород //Геофизика. 2009. № 3.
4. Роненсон Б.М. Пути повышения достоверности крупномасштабных геологических карт //Известия вузов. Геология и разведка. 1971. № 11.
5. Badenhorst, F. P., 1987. Lithostratigraphy of the Damara Sequence in the Omaruru area of the northern Central Zone of the Damara Orogen and a proposed correlation across the Omaruru lineament. Communications of the Geological Survey of Namibia, 3, 3–8.
6. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М. 1965.
7. Демура Г. В. Геологическое картирование с использованием геофизических методов в условиях сильной мигматизации пород //Известия вузов. Геология и разведка. 1971. № 5.
8. Демура Г.В., Доброхотова И.А., Сикорский В.А. Применение метода незаземленной петли для изучения сложных аномалий магнитного поля Земли //Известия вузов. Геология и разведка.1971. № 9.
9. Демура Г.В. Магнитные исследования ферромагнетиков флогопитсодержащих кристаллических сланцев Эльконского слюдоносного поля //Известия вузов. Геология и разведка. 1971. № 10.
10. Демура Г.В. Возможности термомагнитного анализа при диагностике горных пород //Известия вузов. Геология и разведка. 1976. № 5.
11. Тархов А.Г., Демура Г.В., Никитин А.А., Лукина О.П.,. Выделение геофизических аномалий с помощью самообучающихся фильтров //Известия вузов. Геология и разведка. 1973. № 9.
12. Miller, R. McG., 1983a. The Pan – African Damara Orogen od S.W.A. / Namibia, Special Publication of the Geological Society of South Africa, 11, 431–515.
13. Miller, R. McG., 1983b. Economic implications of plate tectonic models of the Damara Orogen, Special Publication of the Geological Society of South Africa, 11, 115–138.
14. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. М. 2008.
15. Петров А.В. Алгоритм адаптивной энергетической фильтрации профильных геофизических наблюдений //Известия вузов. Геология и разведка. 1994. № 1.
16. Петров А.В. Адаптивная фильтрация геополей //Геоинформатика. 1996. № 6.
17. Петров А.В., Солоха Е.В. Технология анализа геополей в скользящих окнах «живой» формы / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 33-й сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского. Екатеринбург, 2006. С. 271–275.