УДК 550.83

А.В. Петров
д-р физ.-мат. наук
РГГРУ[1]
геофизический факультет
декан
petrovstud@mail.ru

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

С.В. Зиновкин
канд. техн. наук
доцент
РГГРУ[1]
кафедра геофизики
старший преподаватель

Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D и практические результаты*

* Продолжение статьи Анизотропная магнитная и плотностная геотомография недр в компьютерной технологии статистического и спектрально–корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D». Демура Г.В. // Недропользование XXI век. 2016. № 5. С. 102–113.

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

Авторы рассматривают новую компьютерную технологию, позволяющую достоверно, объективно и экономически эффективно изучать геологическое строение рудных полей и узлов с целью воспроизводства запасов уже освоенных территорий. Развитая ими технология анизотропной магнитной и плотностной геотомографии недр (АМПГН) создана путем совершенствования алгоритмов и программ статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D. Она позволяет использовать вещественные характеристики горных пород – магнитную восприимчивость и плотность – в качестве интерпретационной основы данных высокоточных магнитных и гравиметрических съемок. Выделяемые анизотропные магнитные и плотностные маркеры позиционно, в виде разноплановых томографических изображений, однозначным и воспроизводимым образом отражают глубинное геологическое строение земной коры и верхних ее частей. АМПТН может быть использована на всех стадиях геологоразведочного процесса и при решении прикладных задач.

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

Основное назначение компьютерной технологии КОСКАД 3D (система сертифицирована ЕАГО, автор А.А. Петров), реализованной в виде структуры геоинформационной системы, состоит в интерпретационной обработке нестационарных геофизических полей. Термин «интерпретационная обработка» отражает неразрывную связь результатов обработки полей в качестве исходной при решении целевых интерпретационных задач.

Наиболее типичные задачи интерпретационной обработки включают:

– атрибутивный анализ геофизических полей в скользящих окнах фиксированного размера, адаптивных окнах и в окнах «живой» формы по расчету статистических, корреляционных, спектральных и градиентных характеристик, обеспечивающих построение детальной геологической карты и глубинных геологических разрезов;

– разложение потенциальных полей на составляющие путем двумерной адаптивной фильтрации в окне «живой» формы, направленной на выделение аномальных эффектов в условиях непрерывной изменчивости спектрально-корреляционных свойств полезного сигнала и помехи;

– выделение слабоконтрастных геологических объектов с помощью самонастраивающихся фильтров и межпрофильной корреляции;

– трансформацию потенциальных полей в нижнее полупространство с построением глубинных разрезов избыточной плотности и анизотропной магнитной восприимчивости;

– построение магнитных и плотностных геотомографических изображений;

Графические построения и визуализация результатов интерпретационной обработки проводятся на основе разработанных средств визуализации геолого-геофизической информации в виде растровых карт, отдельных графиков и трехмерных объектов.

Математический аппарат компьютерной технологии КОСКАД 3D включает (4):

– широкий комплекс вероятностно-статистических методов интерпретационной обработки потенциальных и волновых полей: корреляционно-регрессионный анализ, дисперсионный и факторный анализ, спектрально-временное разложение полей на составляющие на основе адаптивных методов фильтрации и вейвлет-преобразования, оптимальные линейные фильтры, алгоритмы теории статистических решений в задачах обнаружения сигналов, нейтронные сети и генетические алгоритмы.

Отличительной особенностью алгоритмов компьютерной технологии КОСКАД 3D является возможность выделения аномальных эффектов в условиях нестационарности геофизических полей, т.е. когда наблюдается изменение спектрально-корреляционных свойств изучаемого поля как по площади, так и в объеме.

Это предопределяет преимущества системы КОСКАД 3D по сравнению со многими пакетами и системами интерпретационной обработки, в которых задачи интерпретационной обработки реализуются в предположении стационарного характера анализируемого геофизического поля, которое никогда не выполняется на практике. В системе КОСКАД 3D имеется ряд основных и оригинальных процедур, которые наиболее востребованы при решении задачи построения и анализа магнитного и плотностного геотомографического изображения[10].

Алгоритм оценки градиентных характеристик магнитных наблюдений.

Алгоритм автоматического трассирования осей аномалий – 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) [10].

Применение этого алгоритма делает возможным в автоматическом режиме провести детальный анализ особенностей поля, оценить положение осей аномалий различной амплитуды, простирания и размеров. Точки перегибов поля можно интерпретировать как границы между областями стационарности геофизических полей, которые контролируют геологические границы и тектонические дислокации.

Алгоритм оценки энергии высокочастотной компоненты магнитного поля – позволяет эффективно решать интерпретационные задачи, которые заключаются в выделении областей распространения магнитных образований, оценки мощности осадочного чехла, выхода на поверхность пород кристаллического фундамента.

В основе решения такого рода задач лежит предположение о том, что высокочастотная составляющая магнитного поля более дифференцирована и характеризуется большим разбросом значений (амплитудой, энергией высокочастотной составляющей) для облас-

тей, сложенных породами, содержащими магнитные минералы, в отличие от областей, где породы кристаллического фундамента перекрываются немагнитными осадочными отложениями. Такое предположение вполне логично и полностью объясняется петрофизическими различиями магнитных свойств пород кристаллического фундамента и осадочного чехла.

Методы линейной оптимальной фильтрации геофизических полей. Тренд-анализ и фильтрация геофизических полей занимают важнейшее место в обработке геолого-геофизических данных. С их помощью решаются задачи разложения геофизических полей на составляющие, восстановления формы аномалий, осложненных помехой, обнаружения слабоконтрастных аномалий и др.

Коротко рассмотрим основные фильтры, которые использовались в процессе обработки данных магнитометрии, как одномерные (профильные), так и двумерные (площадные).

Энергетическая фильтрация. Алгоритм двумерной энергетической фильтрации предложен А.А. Никитиным. Критерием его оптимальности является максимизация энергетического отношения сигнал/помеха $\rho=\sum_{i=1}^{m} s_i^2/\sigma^2$ на выходе фильтра [4].

Полиномиальная фильтрация – получила широкое распространение в практических приложениях тренд-анализа для оценки региональной составляющей поля.

Адаптивная фильтрация нестационарных геофизических полей. Одним из первых алгоритмом, в котором, чисто интуитивно, была предпринята попытка учета площадной нестационарности наблюдаемых геополей, можно считать метод самонастраивающейся фильтрации [3]. Решалась задача последовательного обнаружения слабых линейных аномалий на основе оценки статистики Хотгелинга в скользящем двумерном вращающемся окне [2].

В середине 1980-х гг. был предложен модифицированный алгоритм энергетической фильтрации [6]. Предлагалась реализация энергетического фильтра, учитывающая простирание аномалий и изменение корреляционных характеристик сигнала и помех по площади непосредственно в процессе фильтрации. В начале 1990-х гг. в компьютерную технологию «КОСКАД 3D» был включен модуль «Двумерная адаптивная фильтрация», ориентированный на корректную фильтрацию именно нестационарных геополей – посредством автоматической настройки параметров фильтра (высота, ширина, наклон окна, весовые коэффициенты) к изменению спектрально-корреляционных свойств аномалий и помех по площади непосредственно в процессе фильтрации [6].

Одномерная адаптивная фильтрация – позволяет учитывать нарушение стационарности поля вдоль профиля наблюдений.

Двумерная адаптивная фильтрация – в окрестностях базового окна каждой точки наблюдения осуществляется локальная фильтрация с уникальными параметрами и весовыми коэффициентами фильтра, отражающими изменение спектрально-корреляционных характеристик поля по площади. Так, если в окрестностях определенной точки отсутствуют аномалии, то ширина и высота окна фильтрации будут минимальными. При наличии в окрестностях точки самых энергоемких и протяженных аномалий ширина и высота окна фильтрации будут максимальными, но не превышающими размеров базового окна [7].

Полиномиальная адаптивная фильтрация. В компьютерной технологии «КОСКАД 3D» реализован алгоритм адаптивной полиномиальной фильтрации, учитывающей нестационарность поля по площади, посредством локализации оценок спектрально-корреляционных свойств поля и соответствующего изменения параметров фильтра (ширины, высоты, наклона и степени аппроксимирующего полинома).

Алгоритмы обнаружения слабых аномалий. Среди методов обнаружения слабых аномалий наиболее широко используются алгоритмы, построенные на теории принятия статистических решений и проверке статистических гипотез. Наряду с хорошо известными алгоритмами обнаружения, методом обратных вероятностей и самонастраивающейся фильтрации, в состав блока входят адаптивные алгоритмы, учитывающие изменение параметров аномалии и свойств помехи по площади и в пространстве.

Впервые алгоритм самонастраивающейся фильтрации был создан и опробован на материалах геолого-геофизических исследований в 1969–1971 гг. при формализованном геологическом картировании сильно мигматизированных архейских пород Южного Алдана [3].

На этих же объектах была опробована двумерная автокорреляционная функция (ДАКФ), которая была необходима для оптимального размера окна последовательной фильтрации данных магнитного поля по участку Безымянный [2]. Впоследствии ДАКФ была существенно модернизирована

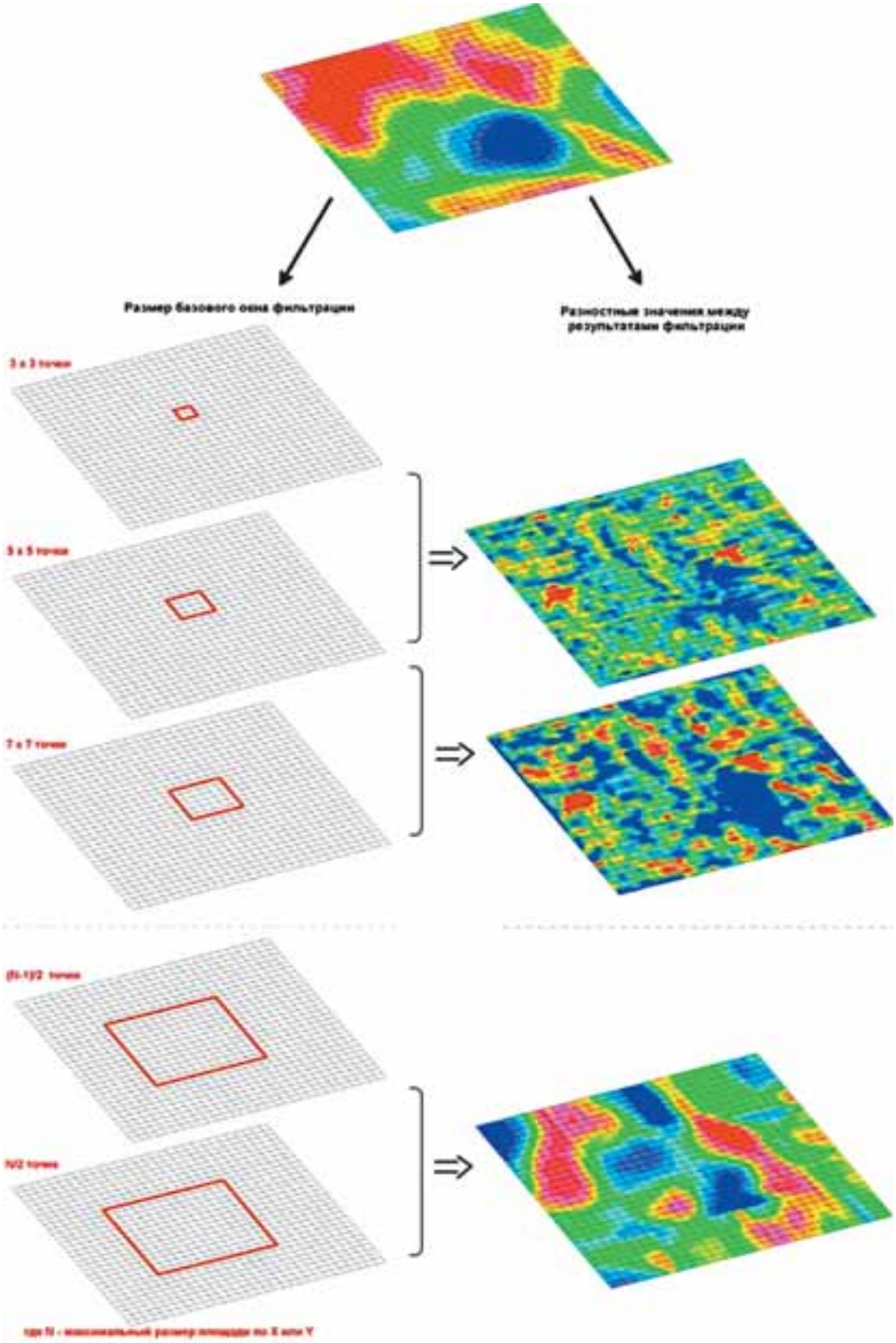


Рис. 1.
Иллюстрация технологии полосовой фильтрации в расширяющихся окнах «живой» формы

А.В. Петровым, и в новом варианте была названа «в окне живой формы» или подвижной формы.

Технология построения магнитного и плотностного геотомографического (3D) изображения земной коры

В основе технологии лежит нетрадиционной подход к решению задачи послойной оценки распределения магнитных и гравитационных масс на разных глубинах в земной коре, базирующийся на использовании полосового адаптивного 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 фильтрации с последовательным уменьшением значений граничных частот позволяет построить относительное распределение гравитационных и магнитных масс по глубине в томографическом варианте.

Суть технологии сводится к реализации последовательной двумерной адаптивной энергетической фильтрации анализируемого поля в окне «живой» формы при размерах базового окна 3×3, 5×5, 7×7 и т.д., соответственно [6, 7]. При этом отличие между фильтрациями будет заключаться в следующем: чем больше размер базового окна, тем меньше доля высоких частот содержится на выходе фильтра. Таким образом, вычитая из результатов фильтрации с базовым окном 5×5, результат фильтрации в базовом окне 3×3, разность будет характеризовать интервал частот $\Delta\omega_{3,5} = \omega_3 - \omega_5$.

Известно, что чем больше глубина залегания аномалиеобразующего объекта, тем меньше частота, которая ему соответствует в спектре исходного поля, т.е. каждому интервалу частот можно поставить в соответствие определенный интервал глубин.

На ***рис. 1*** вверху изображено исходное гравитационное поле, слева – изменение размеров базового окна, справа – разностные значения между результатами фильтрации.

На ***рис. 2*** – геотомографическое изображение плотности вдоль профиля наблюдений. За счет применения методики окон «живой» формы нижняя часть разреза получается более дифференцированной, высокоградиентные аномалии (правый конец профиля) распространяются на значительную глубину, аномалии не «размазываются».

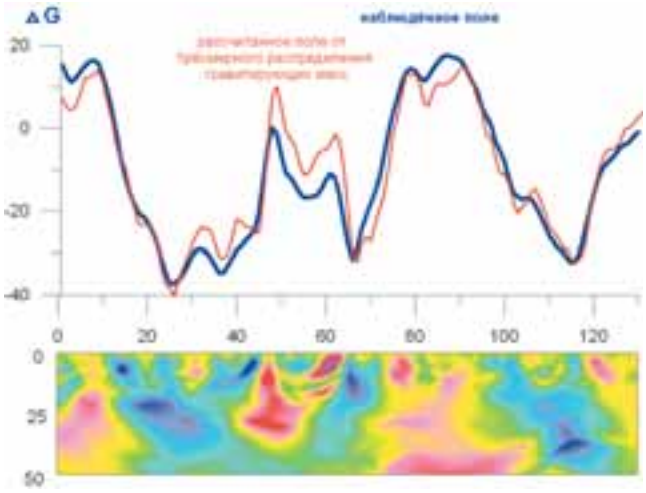


Рис. 2.
Результат решения прямой задачи трехмерного распределения плотностных масс

Как видно, поведение рассчитанной кривой от полученного распределения плотностных масс совпадает с графиком наблюденного поля, отличие заключается в разной интенсивности некоторых аномалий. Последнее объясняется недостаточной протяженностью профиля, и как следствие – недостаточной глубиной проведенных оценок распределения плотности для лучшего совпадения результатов решения прямой задачи и наблюденной кривой гравитационного поля.

Преобразования первичной оценки магнитного и плотностного геотомографического изображения

Предложенный алгоритм оценки магнитного и плотностного 3D-изображения недр позволяет получить лишь относительные распределение аномалиеобразующих источников в пространстве. Для перехода к реальным значениям избыточной плотности был разработан способ, использующий априорную информацию о распределении плотностных и магнитных свойств пород земной коры, которая часто имеется у интерпретатора по территории исследований. Цель преобразования – переход на основе имеющейся априорной информации от относительных значений распределения масс к значениям, близким к реальным. Пример преобразования результатов, полученных с использованием модифицированного метода Б.А. Андреева показан авторами в статье [10].

Методика интерактивного редактирования *объемного магнитного и плотностного геотомографического изображения земной коры предполагает следующие этапы:*

– получение первичных объемных геотомографических изображений относительного распределения гравитационных или магнитных масс методом Б.А. Андреева [4];

– получение первичных объемных геотомографических изображений статистического и корреляционного зондирования;

– вычисление статистических, корреляционных и градиентных характеристик первичных геотомографических изображений; выделение наиболее информативных из них;

– кластеризация исследуемого объема на статистически однородные области по комплексу наиболее информативных характеристик;

– корректировка глубин источников, уточнение шкалы глубин, полученных объемных геотомографических изображений;

Подготовка данных для процедуры редактирования:

– на основе всей имеющейся геолого-геофизической информации об изучаемом объекте создание сети профилей (вдоль которых будет выполняться интерактивное редактирование), обеспечивающей необходимую детальность будущих построений;

– получение разрезов вдоль выбранных профилей из первичных объемных геотомографических изображений, полученных на предыдущем этапе;

– для каждого профиля – подготовка подложки.

Подложка – это изображение, содержащее информацию, необходимую в процессе интерактивного редактирования. Например, это может быть разрез вдоль некоторого профиля геотомографического изображения. На разрез может быть наложена различная информация, например, о вертикальных и горизонтальных границах блоковых структур, полученная в результате интерпретации сейсмических данных.

Векторизация плотностного разреза.

Векторизация – это преобразование растровых изображений в элементы векторной графики (точки, линии, полигоны, надписи и др.). Плотностной или магнитный разрез и другая априорная информация позволяют интерпретатору разбить разрез на слои и блоки. Эти действия могут быть выполнены в системе редактирования вручную или можно воспользоваться сторонним программным обеспечением для автоматической векторизации.

Основные этапы редактирования, выполняемые в системе «КОСКАД МОДЕЛИРОВАНИЕ»:

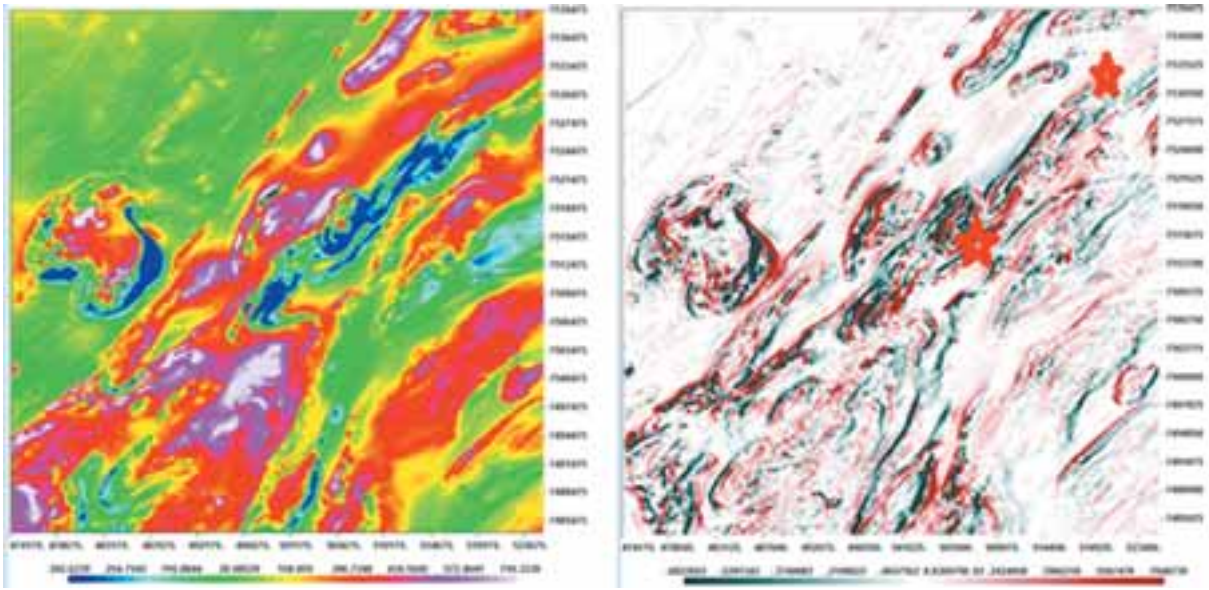
– обеспечение учета свойств вмещающей среды;

– редакция геометрических и физических характеристик профильных моделей;

– построение конечного объемного геотомографического изображения (на основе послойной интерполяции с использованием современных методов геостатистики или на основе триангуляции – TIN-модель).

Практические результаты АМПТН в хронологическом развитии подробно рассмот-

Рис. 3.
Исходное магнитное поле (слева) и результаты автоматического трассирования аномалий (звездочки вверху справа – группа месторождений Валенсия, в центре – Россинг)



рены в предыдущих публикациях авторов на примерах марганцеворудных и урановорудных объектов [10]. Здесь приводятся только дополнительные результаты АМПГН.

Начало развития АМПГН – картирование регионального рифта, рассмотрено в предыдущих статьях авторов в журналах «Геофизика» и «Недропользование XXI век» [1, 10]. Геологическая эффективность АМПГН при прогнозе зон пластового уранового окисления на территории Кунэнэ (Намибия) также представлена в публикациях [9].

Поисково-оценочные работы на флангах рудного узла уранового месторождения Россинг

Месторождение Россинг (третье по запасам урана в мировой классификации) отрабатывается транснациональной кампанией *Rio Tinto* более 30 лет карьерным способом, в настоящее время глубина карьера достигает глубины более 400 м. В прилегающих частях площади открыты месторождения и рудопроявления железа, меди, полиметаллов, редкоземельных и редких элементов и др.

За длительный период развития геологоразведочных работ и эксплуатации месторождения кампания накопила значительный геолого-геофизический материал, который является конфиденциальным. Доступным для нас оказался материал по территории четырех листов геологической карты масштаба 1:50000, перекрывающих фланги урановых месторождения Россинг и группы месторождения Валенсия (Намибия). Нами обработаны и проинтерпретированы результаты аэромагнитной съемки, проведенной кампанией *FUGRO* по широтным профилям в 1988 г., на высоте 80 м (полетные линии через 200 м) с радарной съемкой и привязкой *GPS*. С точки зрения детальности изучения территории сеть съемки груба, что не позволяет выделять небольшие по размерам геологические объекты. Объемы работ: 290 полетных профилей, 2 000 000 физических точек.

Зона развития уранового месторождения Россинг, связанного с аляскитовыми гранитами, отмечается в цепочке пониженных значений аномалией магнитного поля эллипсовидной формой почти в центре планшета съемки. Наилучшим образом месторождение отражается в локальном поле (***рис. 3***) и в результатах автоматического трассирования. В целом, мощная полосовидная аномалия имеет СВ-простирание, ее можно отнести к согласной по направлению рифтовой трансконтинентальной – Велвишиа [1].

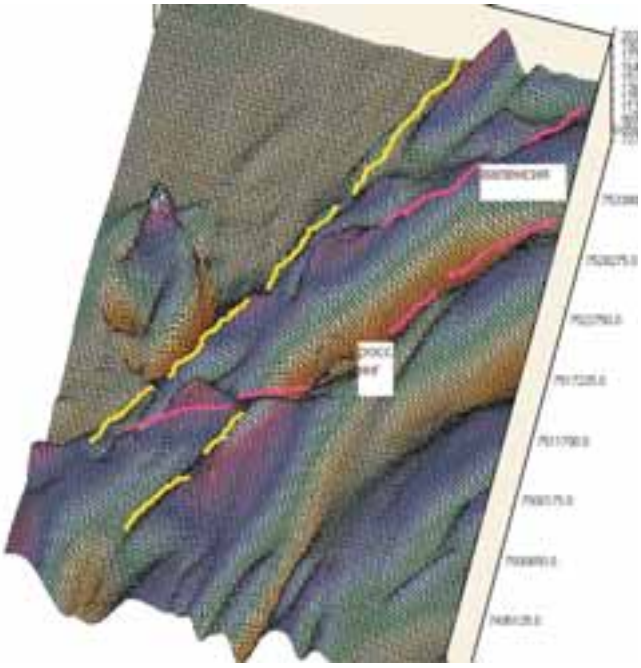


Рис. 4.
Глубинный горизонтальный геомагнитный срез по глубине 100 м (съемка 1986 г.), развитие отрабатываемого карьера месторождения (слева)

В магнитном поле после проведения автоматической фильтрации контуры месторождения Россинг более четко обрамляются яйцевидной знакопеременной аномалией. Южнее аномалия над аляскитовыми гранитами фактически примыкает к более молодой зоне, предположительно мелового возраста, секущей более древнюю, основную зону. В локальном магнитном поле молодая зона пересекает под углом 10°–15° основную структуру. В СВ-части планшета (по координате 514175 до координаты 522200) вдоль этой зоны развита группа более мелких урановых месторождений Валенсия. В горизонтальных томографических изображениях их положение более отчетливо устанавливается по плоскостным томографическим геомагнитным срезам.

На плоскостном томографическом изображении (100 м) явно выражено развитие надвиговых структур в СЗ-направлении, что предположительно можно связать с субдукционными смещениями погружающейся СЗ плиты зоны Велвишиа.

По нашим результатам установлено местоположение более молодой субвертикальной тектонической зоны глубокого заложения зоны по глубинным геомагнитным срезам, на основе проведенной анизотропной магнитной томографии (красный цвет). Эта зона не находит четкого отражения на геологических картах масштабов 1:250000

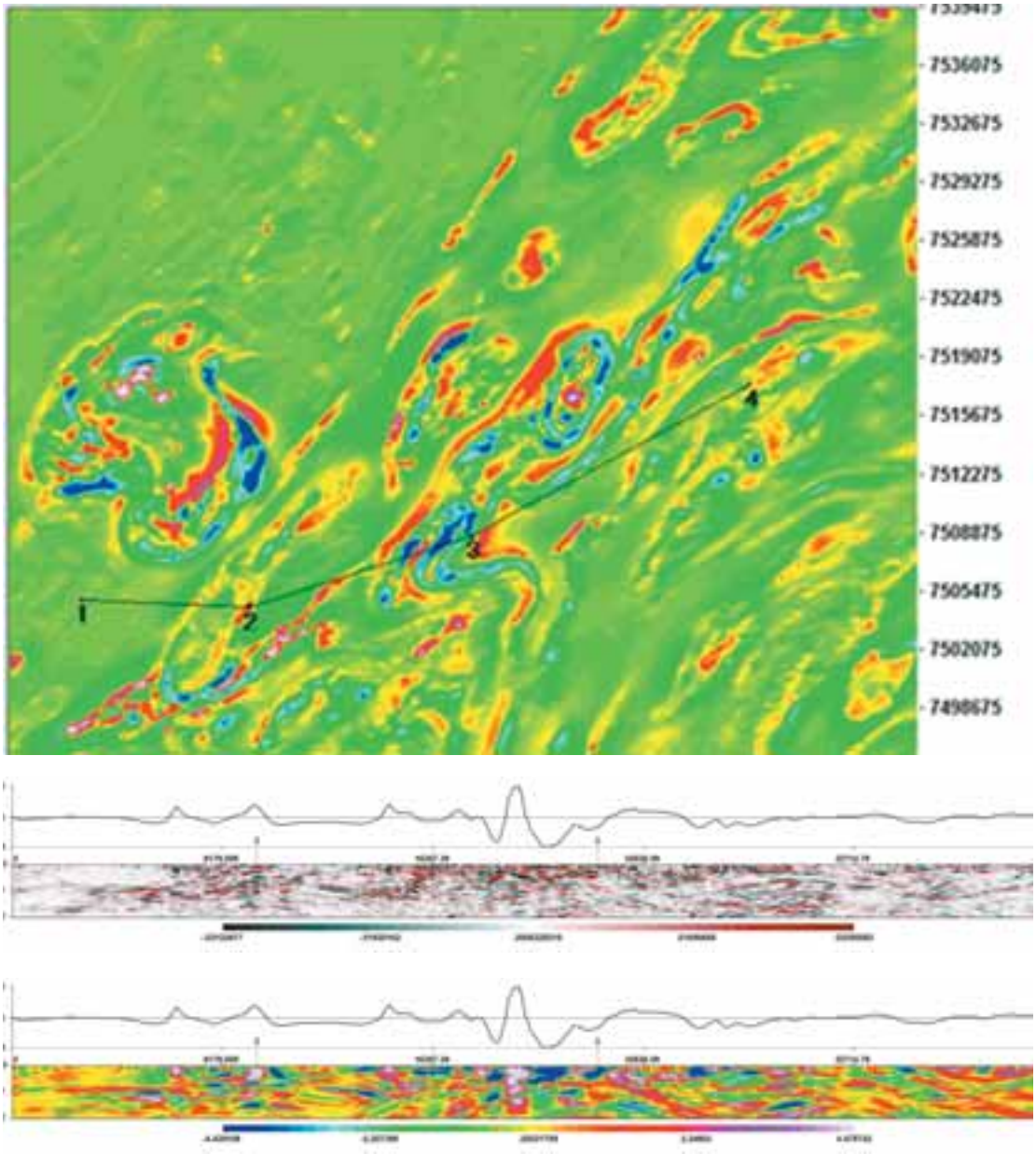


Рис.5.
Локальное магнитное поле с положением криволинейного профиля вдоль зон тектономагматической активизации (верхний рисунок). Нижний рисунок анизотропные геомагнитные томографические разрезы

и 1:50000 и выделяется только по глубинным анизотропным магнитным срезам на различных глубинных уровнях, один из которых приведен на ***рис. 4***.

Молодая зона активизации субпараллельна рифтовой зоне Велвишиа с надвиговыми структурами, зонами смещения отдельных блоков горных пород. Это обстоятельство позволяет положительно оценить перспективы более молодой зоны на открытие новых месторождений на ее продолжении к ЮЗ до их пересечения с более древней (желтый цвет) (***рис. 4***).

По этим результатам выделяются перспективные на урановое оруденение участки в районе точек 2–3 и между ними (аналог Россинга) по криволинейному магнитоанизотропному разрезу (***рис. 5***). Они связаны с развитием интрузий аляскитовых гранитов, которые по результатам аэрогамм спектрометрии выделяются незначительными концентрациями урана.

Фактически, местоположение аналога Россинга был открыто нашей томографической интерпретационной обработкой в режиме АМПГН в 2004 г., однако заявка

российско-швейцарской фирмы *Inpart* на лицензирование этой площади по решению правительственных органов Намибии не была удовлетворена. Кампания *Rio Tinto* обнаружила это месторождение путем бурения скважин по густой сети только в 2009 г. с большими затратами.

АМПГН при подсчете прогнозных запасов железорудного месторождения Суроям (Ю. Урал)

Это вопрос уже рассматривался в предыдущих публикациях журнала, поэтому приведем лишь один результат, позволяющий оценить возможности АМПГН для этих целей.

АМПГН в варианте оценки прогнозных ресурсов титано-магнетитовых и магнетит-апатитовых руд на последнем этапе была использована путем получении плоскостных томографических изображений по полному магнитному градиенту в динамике, до глубинного замыкания месторождения. По уменьшению размеров и формы месторождения по глубине (инъекционный тип внедрения из основного тектонического шва) была четко определена подвеска запасов до глубины 560–580 м.

Реализация возможностей технологии показана на ***рис. 6*** по глубине 100 м, причем восточное погружение продуктивного массива явно прослеживается в его южной части по серии объемных томографических срезов (100 разноглубинных вариантов). Выделяемая в ЮВ-части площади кольцевая структура также представляет практический интерес, но не входит в пределы лицензированного участка.

Использование градиентных (по модулю) характеристик магнитного поля при построении объемной модели месторождения позволяет по глубинным геомагнитным томографическим срезам и градиентным характеристикам уверенно выделить границы Суроямского массива и определить прогнозные ресурсы P_1 и P_2 на глубину, что отмечено в протоколе ГКЗ РФ.

Оптимальный выбор участка строительства подземного сооружения (Красноярск-26)

Геологическое изучение участка строительства подземного сооружения осуществлялось в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 г. и на период до 2015 г.», утвержденной постановлением Правительства РФ от 13.07.2007 № 444. Целевым

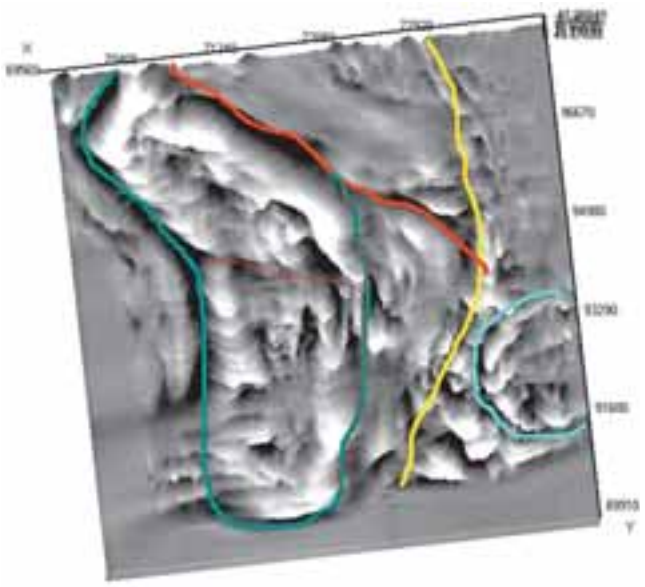
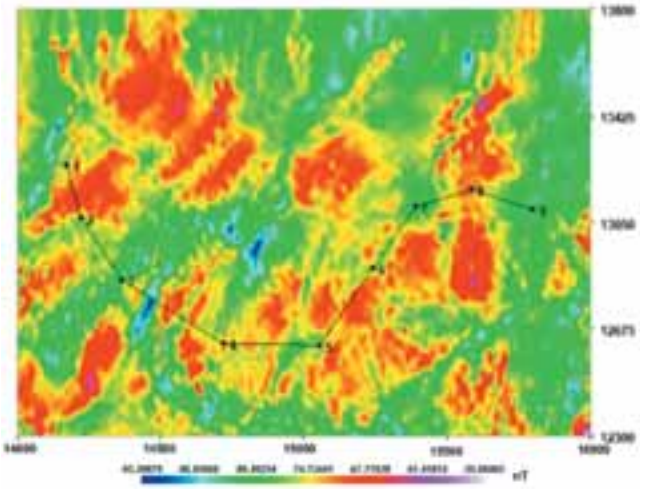


Рис. 6.
Глубинный геомагнитный срез (100 м) в результатах объемного моделирования (Суроямское месторождение, Южный Урал): желтая линия – основной меридиональный тектонический шов; красная – кососекущая подводящая тектоническая зона, определяющая местоположение русла р. Суроям; синяя – контуры массива в магнитном поле; голубая – перспективная кольцевая структура

назначением проведенных работ было создание объемного томографического отображения участка строительства объекта глубокого заложения по результатам цифровой магнитной съемки до целевой глубины 450–500 м. На данной площади в пределах атамановской серии нижнеканской свиты архея ранее были проведены детальные и безрезультатные работы МОВ-ОГТ. По этим данным, лишь на

Рис. 7.
Локальное магнитное поле по результатам высокоточной магнитной съемки и положение криволинейного профиля на местности



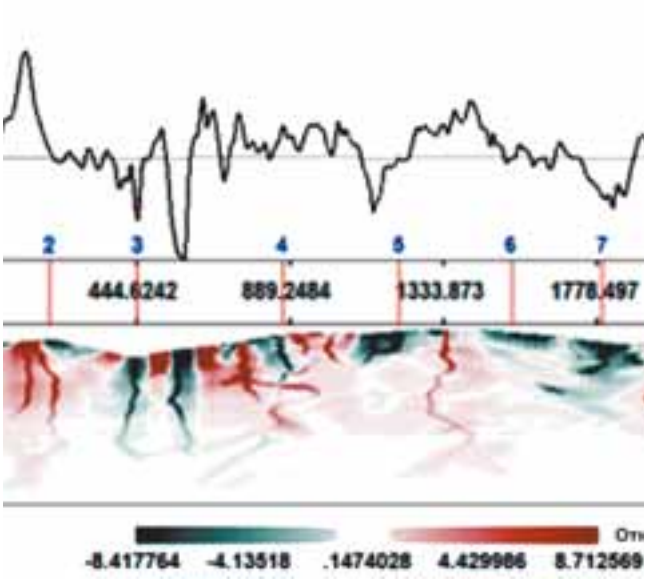


Рис. 8.
Вертикальный геомагнитный томографический разрез по криволинейному профилю

глубине 1800 м выделяется первый отражающий горизонт, а площадная магниторазведка по достаточно грубой сети 100×20 м на качественном уровне выделила 7 даек основного состава и предположила их наклонное падение. По результатам повторной магнитной съемки с протонным магнитометром по сети 50×5 м на площадке 2×1,5 км была проведена АГППГН. Результаты этих работ показаны на ***рис. 7***, – в центре ранее выбранного участка отмечается наличие обводненных пород атамановской серии.

На вертикальном томографическом разрезе четко картируются зоны обводненных тектонических нарушений, местоположение которых (синий цвет) адекватно объемному томографическому кубу (***рис. 9***) данных, и зоны развития пород дайкового комплекса (бордовый цвет).

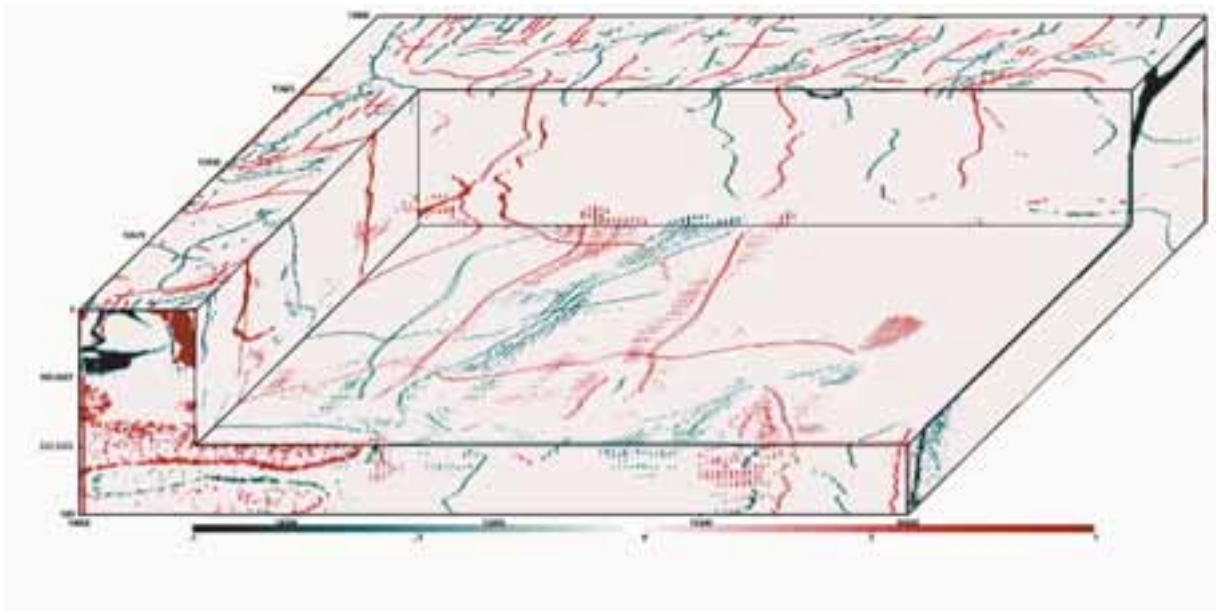
Использование новой технологии АГППГН на площадях развития архейских кристаллических сланцев атамановской серии нижнеканской серии позволило решить задачу по выбору ненарушенного массива для строительства сооружения.

Применение АМПГН с целью поисков коренных источников платины в пределах структуры Кондер

В пределах структуры в прошлом веке было отработано россыпное месторождение платины и в настоящее время ведутся длительные прогнозные работы по поиску коренных источников платины в ее недрах.

Площадь работ находится на северном склоне Батомгского выступа Алданского щита, на пересечении двух глубинных разломов – Бераинского субмеридионального и Кондеро-Нетского субширотного. Здесь сформировался Кондерский интрузивный массив, который на уровне современного эрозионного среза имеет в плане форму круга

Рис. 9.
Объемное геомагнитное томографическое изображение участка хранилища по результатам АМПГН.



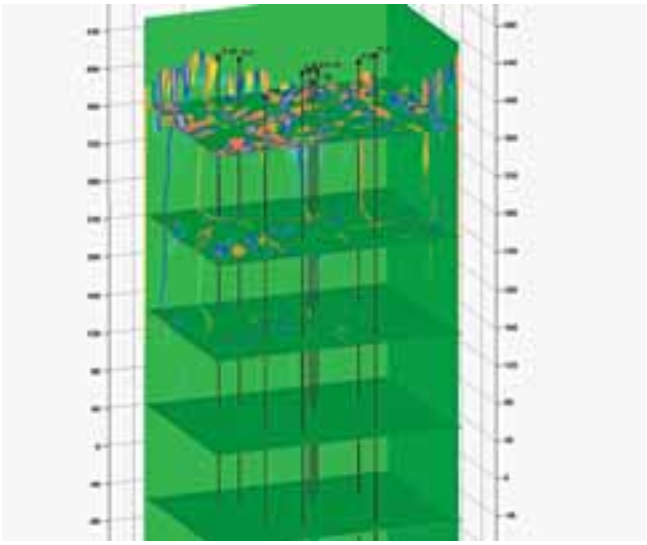


Рис. 10.
Оси аномалий относительного распределения магнитных масс в АМПГН при изучении сплошности массива на глубину дополняет пространственную картину расположения даек и обводненных зон в плоскостных томографических срезах. На отметке 270–300 м массив свободен от наличия обводненных тектонических зон и пород дайкового комплекса, что подтверждается результатами бурения и ГИС.

диаметром до 8,5 км и концентрически зональное строение. Массив сложен в основном ультрамафитами, по периферии которого развиты монцонитоиды. Вмещающими породами являются архейские метаморфиты и граниты, а также терригенные образования среднего рифея.

На начальном этапе наших работ было построено плотностная томографическая структура в объемном варианте с целью определения природы происхождения этого феноменального геологического объекта.

Прежде всего, рисунок полностью подтверждает наличие глубинной вулканической структуры кальдерного типа и по меньшей мере, двухфазного внедрения – четким наличием двух подводящих каналов, причем первая фаза внедрения и ее подводящий канал связаны с хорошо выделяемым Бераинским разломом. Второй канал – кососекущий, под углом в 45°–50° в западной части площади, с нечетким, возможно, третьим внедрением, выражаемым малой чашеобразной структурой (профили 41–51). Форма первой фазы внедрения – симметричная чашеобразная структура с подстилающим дном высокой плотности в 3,4–3,5 г/см^3 и мощностью до 200–300 м, что соответствует мантийным ультраосновным породам. Подводящий канал второй фазы наклонный – дайкового типа и связан, в большей части, с косьвитовым массивом, который обрезается в центральной части Бераинским глубинным разломом до профиля 61. Этот материал получен впервые и он отвергает гипотезу о астроблемном происхождении структуры Кондер.

Авторы при прогнозе зон платиновой минерализации использовали АМПГН и результаты комплексных геофизических исследований (гравиразведки, магниторазведки и электроразведки), проведенных Норильским филиалом ВСЕГЕИ с высоким качеством. Основными целевыми задачами исследований были:

– изучение глубинного строения структуры Кондер по результатам АМПГН;

– выявление зон разрывной тектоники в верхней части геологического разреза;

– определение местоположения линейных, кольцевых и звездообразных структурных элементов в магнитном и гравитационном полях;

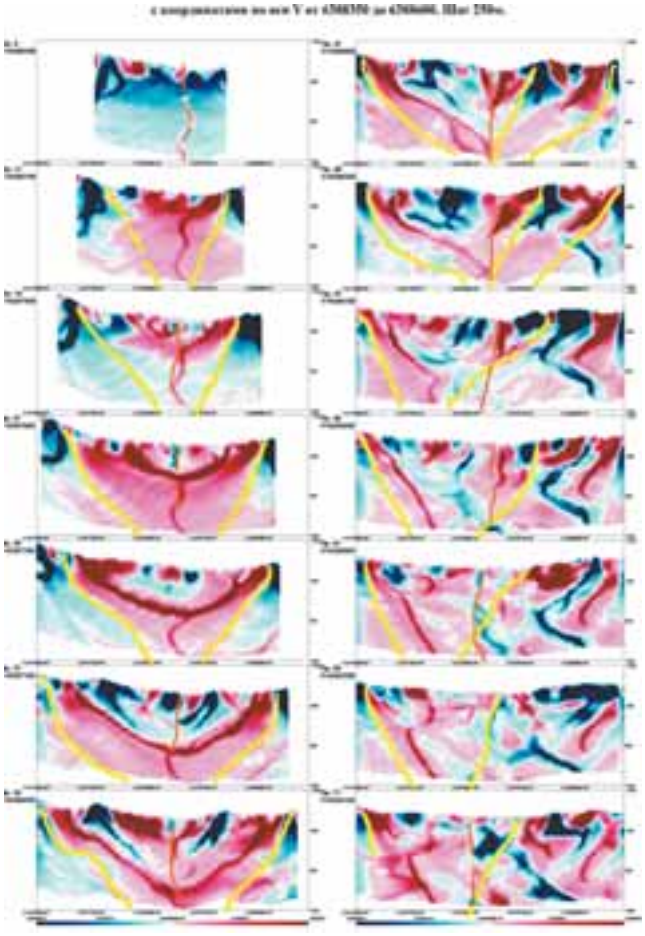


Рис. 11.
Плотностные томографические вертикальные изображения кальдеры Кондер до глубины 2 км

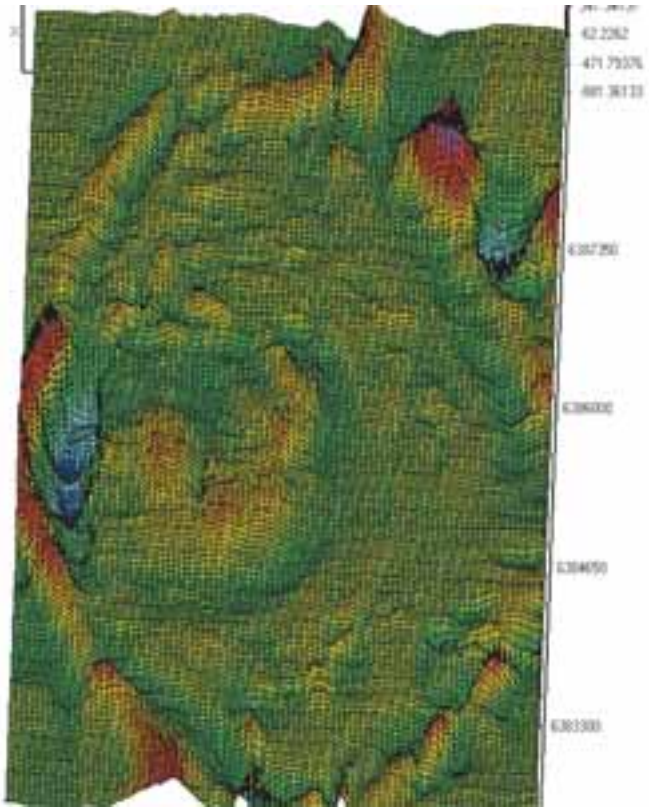


Рис. 12.
Томографический срез кальдеры на глубине 260 м

– прогноз областей возможной платиновой минерализации как участков, на которых достигает максимума интегральный параметр, включающий результаты интерпретационной обработки данных гравиразведки и магниторазведки, заверенный электроразведочными наблюдениями (метод СГ ВП и профильная томография).

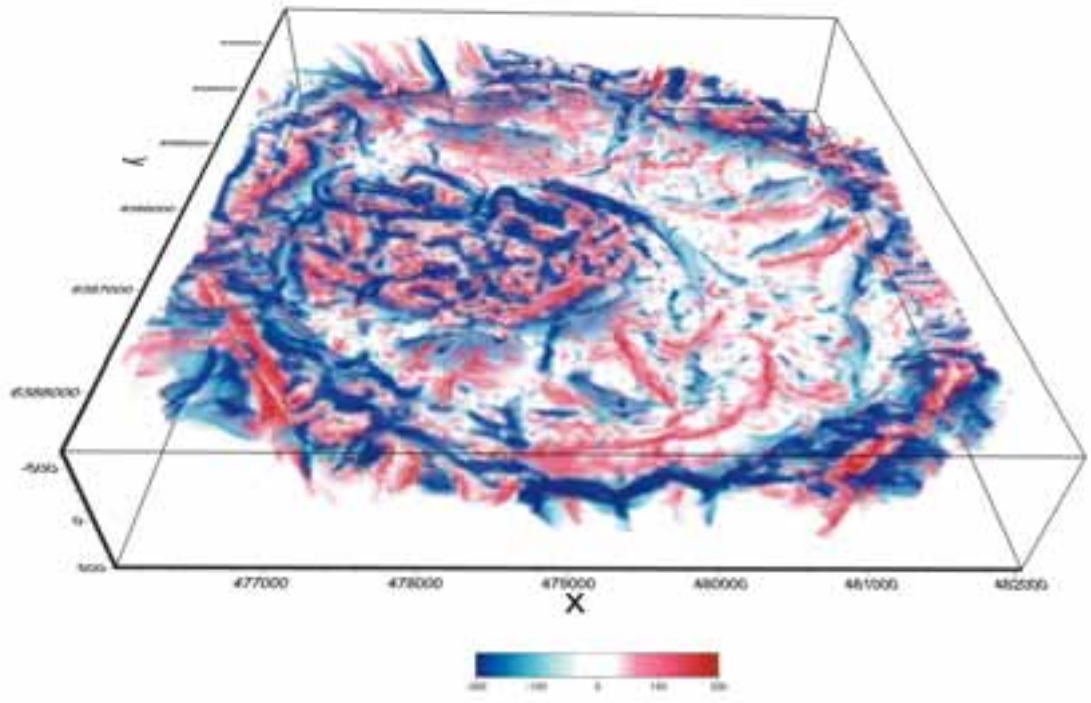
Наиболее четко повышенными значениями магнитного поля выделяется косьвитовый массив и обрамления кальдеры. Имеется также группа аномалий с резко пониженным магнитным полем в примыканиях к косьвитовому массиву к северу.

Повышенными значениями параметра ВП отмечается собственно косьвитовый массив и его западное продолжение по Кондеро- Нетскому разлому (от 8 до 17%), Вмещающие ультрамафиты отмечаются поляризуемостью от 2 до 8%. Точечные аномалии имеются на обрамлении кальдеры.

В полученных нами плоскостных анизотропных магнитных томографических изображениях глубинные разломы также четко отражаются на различных уровнях, причем, действительно, массив имеет концентрическое зональное строение на разных глубинах.

На рисунках визуально в горизонтальных плоскостных срезах выделяются кольцевые структуры в полях развития ультрамафитов.

Рис. 13.
Геомагнитное томографическое изображение Кондерской кальдеры до глубины 500 м.



На ***рис. 12*** к западу от центра площади выделяется обратно намагниченный наклонный рудный столб, вероятней всего, связанный с ферроплатиной. На СВ обрамлении кальдеры обнаруживается аналогичная обратная аномалия магнитного поля.

Результаты бурения по прогнозным точкам в скв. 148в, 149, 153, 155, 183, 186, 202, 203 подтвердили наличие коренных источников платины по серии пересечений с содержаниями платины от 0,43 до 3,98 г/т.

Полученные материалы АМПГН позволили выделить перспективные площади для дальнейшего развития буровых работ с целью поисков коренных источников платины.

Региональное геологическое изучения территории РФ по международным геотраверсам и роль глубинной АМПГН

Проблема изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии является одним из стратегических направлений геофизических исследований, обеспечивающих развитие наук о Земле. С этой целью в соответствии с реализацией федеральных целевых программ по развитию минерально-сырьевой базы создается государственная сеть региональных и опорных геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин по обеспечению недропользователей информацией о глубинном строении недр, необходимой для решения задач геологоразведки, проектирования и строительства крупных промышленных объектов, прогноза опасных природных процессов и явлений.

Построение томографических изображений земной коры, прежде всего, ориентируется на данные сейсморазведки, как наиболее информативного метода глубинных исследований. При этом используются наблюдения отраженных волн по методу многократных перекрытий МОВ-ОГТ, обеспечивающему глубинность до 12–15 км, а также наблюдения преломленных волн по технологии глубинного сейсмического зондирования МПВ-ГСЗ до глубин 40 км и глубже.

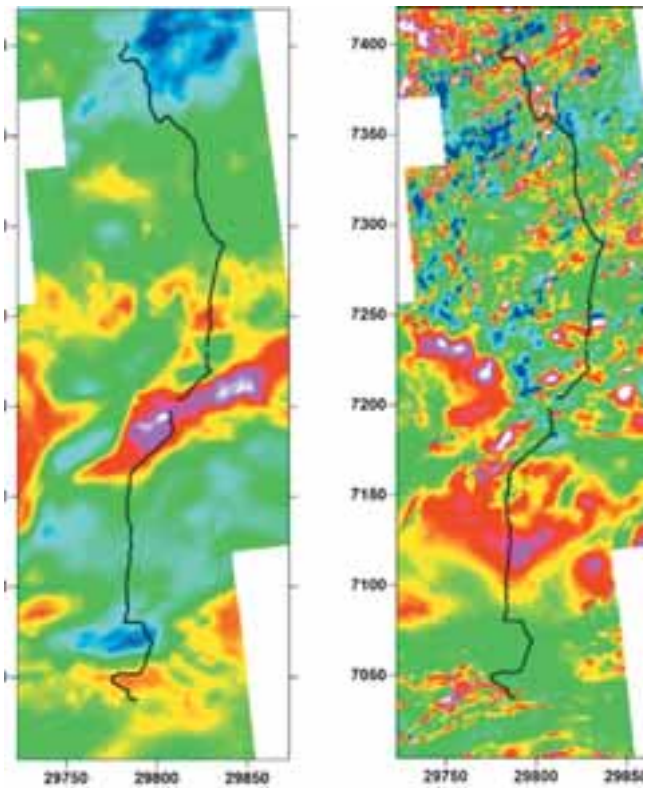
Данные сейсмических наблюдений при построении физико-геологических моделей дополняются площадными гравиметрическими и аэромагнитными измерениями масштаба 1: 200 000, проведенными по всей территории России. По отдельным фрагментам региональных профилей проведены электромагнитные наблюдения магнитотеллурических зондирований МТЗ и АМТЗ, что обеспечивает в комплексе с сейсморазведочными и гравимагнитометрическими данными построение физико-геологических моделей по четырем основным физическим параметрам: скорости, плотности, намагниченности и проводимости.

Компьютерная технология анизотропной магнитной и плотностной геотомографии недр уже используется практически во всех геологоразведочных организациях, задействованных в проведении работ по обработке и интерпретации данных глубинной сейсморазведки и гравимагнитометрии в полосе вдоль региональных профилей, с целью уточнения слабопроявленных внутрикоровых границ, построения гравимагнитных 3D изображений и увязки полученных результатов по отдельным геофизическим методам в рамках компьютерной технологии «КОСКАД 3D».

Результаты томографии по региональному глубинному сейсмическому профилю 2ДВ-А

На ***рис. 14*** приведены результаты построения плотностных и магнитных геотомографических изображений до глубины 20 км. С целью детализации особенностей полученных изображений, кроме оценки относитель-

Рис. 14.
Гравитационное (слева) и магнитное (справа) поля по обрамлению регионального глубинного сейсмического профиля 2 ДВ-А (интервал 550–1024 км)



ного распределения источников с глубиной, были рассчитаны поля распределения градиента по глубине для каждого из изображений.

Кроме градиента по глубине проведена оценка полного градиента относительного распределения источников. Этот параметр позволяет судить о степени дифференциации распределения источников, его максимумы также позволяют подчеркнуть положение границ источников в моделях.

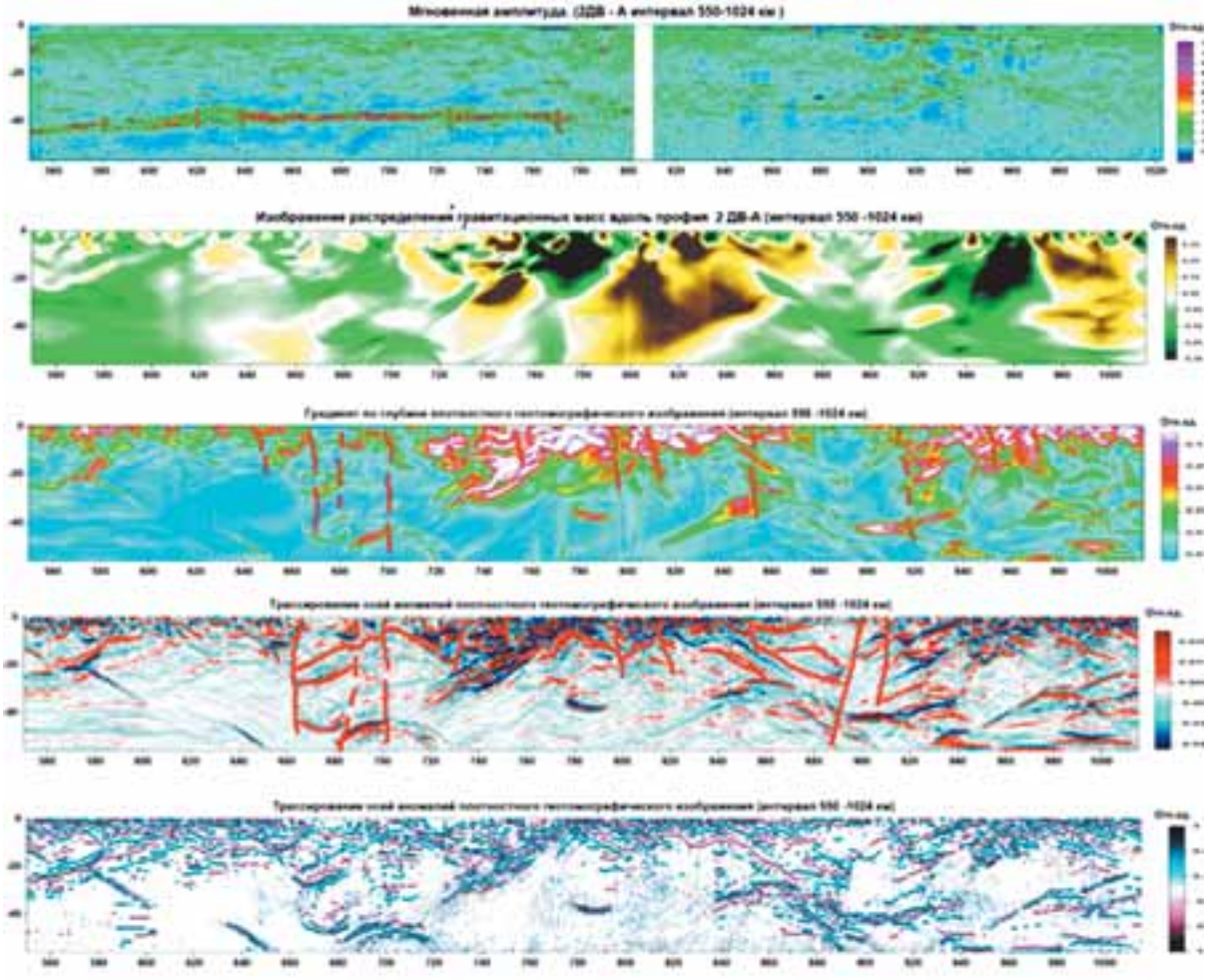
С целью более эффективного выделения структурных элементов в моделях по полю распределения градиента по глубине проведена процедура трассирования осей аномалий. Так же, как и два предыдущих параметров модели, результаты трассирования могут быть использованы при геологической интерпретации и трассировании структурных элементов.

Гравитационное геотомографическое изображение до глубин 60 км и его атрибуты вдоль профиля 2 ДВ-А (интервал 550–1024 км) приведены на ***рис. 15***. – глубинный сейсмический разрез и плотностные томографические отображения. Совместное представление на рисунках сейсмической информации и результатов плотностной томографии позволяет оценить степень согласованности томографических построений и данных сейсморазведки.

В результатах отмечается крупный блок с положительной избыточной плотностью на интервале 700–870 км. Необходимо отметить наличие депрессионной структуры в пределах этого блока.

На рисунке выделяются достоверные, надежные и воспроизводимые плотностные маркеры, по которым возможно создание структурного каркаса геологических карт и глубинных геологических разрезов, исключающих субъективизм и многовариантность интерпретации. На верхнем рисунке, только по данным сейсморазведки, в левой части раз-

Рис. 15.
Плотностные геотомографические изображения до глубины 60 км вдоль регионального профиля 2 ДВ-А (интервал 550–1024 км)



реза четко выделяется граница Мохоровичича, однако на нижних (плотностных) разрезах ее положение однозначно не определяется. Четко отражаются разломы глубинного (мантийного) заложения на интервале 600–700 км и 880–900 км, а также коровые разломы до глубины 20 км.

Выводы

Анизотропную геомагнитную и плотностную геотомографию недр ожидают большие перспективы развития и дальнейшее совершенствование, поскольку основным элементом земной коры является железо, а ферромагнитный минерал магнетит и его производные входят в различных количествах в состав почти всех типов горных пород. Ферромагнетики являются продуктами процессов метаморфизма, гидротермальных изменений, гетерофазного изменения титаномагнетитов, ильменита, сульфидов железа, известен даже биогенный магнетит. В верхних частях геологического разреза в окислительных условиях магнетит неустойчив и изменяется до маггемита, мартита, гематита и лимонита. Для выделения таких залежей рекомендуется использование плотностной томографии недр, учитывая значимый дефект массы по отношению к вмещающей среде. К переходным элементам (парамагнетикам) относятся, прежде всего, элементы группы железа (титан, скандий, хром, марганец, железо, кобальт, никель), а также группы палладия, платины, редкоземельные и актиниды. В атомах переходных элементов внутренние оболочки (d, f-слои) заполнены электронами не полностью, в этих слоях спиновые и орбитальные магнитные моменты не скомпенсированы, что приводит к существованию у изолированных атомов переходных элементов значительного магнитного момента. Перечисленное выше свидетельствует о возможности высокоточной магниторазведки выделять слабомагнитные и даже парамагнитные геологические объекты. Это доказано нашими работами на марганцево-рудном поле пустыни Калахари, при выделении пород дайкового комплекса и изучении тектонической обстановки в массиве для строительства подземного сооружения, реализации прогноза коренного платинового оруденения в структуре Кондер (совместно с гравиметрией и методом вызванной поляризации в томографическом и обычном вариантах). Эти материалы, представленые в данной работе, доказывают универсальность магниторазведки, гравиразведки и технологии анизотропной геомагнитной и плотностной томографии при изучении глубинного геологического строения земной коры и при решении различных прикладных задач. Развита также методология формализованного геологического картирования древних кристаллических щитов, позволяющая получать достоверные и воспроизводимые карты в объемных томографических изображениях, которые могут использоваться на различных стадиях геологоразведочного процесса и при подсчете запасов

Литература

1. Демура Г.В. Возможности высокоточной аэрогамма-спектрометрической и магнитной съемок при глубинном картировании древних магнито-анизотропных пород //Геофизика. 2009. № 3.
2. Демидович О.А., Демура Г.В. и др. Интерпретация геофизических полей на основе самонастраивающейся фильтрации и двумерных автокорреляционных функций //Прикладная геофизика. 1973. № 72.
3. 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.
4. Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: ЦИТвП. 2008.
5. Демура Г.В., Петров А.В. Физико-геологическое моделирование и анизотропная геомагнитная томография недр // Геофизика. 2014. № 6.
6. Петров А.В. Алгоритм адаптивной энергетической фильтрации профильных геофизических наблюдений //Известия вузов. Геология и разведка. 1994. № 1.
7. Петров А.В. Адаптивная фильтрация геополей //Геоинформатика. 1996. № 6.
8. 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 сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского. Екатеринбург. 2006. С. 271–275.
9. Зиновкин С.В., Петров А.В., Осипенков Д.Ю., Юдин Д.Б. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа данных КОСКАД 3D 2011 //Геоинформатика. 2011. № 4.
10. Демура Г.В., А.В. Петров, С.В. Зиновкин. Новые возможности и перспективы магниторазведки – компьютерные технологии объемного моделирования и фильтрации результатов высокоточных площадных съемок // Недропользование XXI век. 2013. № 4.

UDC 550.83

A.V. Petrov, Doctor of Physics and Mathematics, Dean of Geophysical Department of MGRI–RSGPU[1], etrovstud@mail.ru
G.V. Demura, Doctor Geological and Mineralogical Sciences, Professor, gennady_demora@mail.ru
S.V. Zinovkin, PhD, assistant professor, Senior Lecturer of Geophysics Chair of MGRI–RSGPU[1]

[1]Russian State Geological Prospecting University (MGRI–RSGPU), 23 Miklouho–Maklay`s street, Moscow, 117997, Russia.

Anisotropic magnetic and density Geotomography subsoil in KOSKAD 3D - computer technology statistical and spectral correlation data analysis

Abstract. Examined the validity and the possibility of new computer technology that allows reliable, objective and cost–effectively for study the geological structure of ore fields and units for the purpose of reproduction of reserves already developed areas. Developed by the authors technology anisotropic magnetic and density geotomography subsoil created by improving the algorithms and programs of statistical and spectral–correlation data analysis "KOSKAD 3D" and allows the use of the real characteristics of rock – magnetic susceptibility and density, as interpretative bases of data of high precision magnetic and gravity surveys. Allocated anisotropic magnetic and density markers position, in the form of diverse tomographic images, unambiguous and reproducible manner reflects the depth of the geological structure of the crust and upper parts. The technology can be used at all stages of the exploration process and in dealing with applications

Keywords: geophysics; technology magnetic and density anisotropy;; processing of geophysical data; practice of magnetic imaging and density of the crust and the upper subsoil.

References

1. Demura G.V. *Vozmozhnosti vysokotochnoi aerogamma-spektrometricheskoi i magnitnoi s"emok pri glubinnom kartirovanii drevnikh magnito-anizotropnykh porod* [Features high-precision airborne gamma-spectrometric and magnetic filming at depth mapping of the ancient magnetic anisotropic rocks]. *Geofizika* [Geophysics], 2009, no. 3.
2. Demidovich O.A., Demura G.V. i dr. *Interpretatsiia geofizicheskikh polei na osnove samonastraivaiushcheisia fil'tratsii i dvumernykh avtokorreliatsionnykh funktsii* [Interpretation of geophysical fields on the basis of adaptive filtering and two-dimensional autocorrelation functions]. *Prikladnaia geofizika* [Applied Geophysics], 1973, no. 72.
3. Tarkhov A.G., Demura G.V., Nikitin A.A., Lukina O.P. *Vydelenie geofizicheskikh anomalii s pomoshch'iu samoobuchaiushchikhsia fil'trov* [Isolation of geophysical anomalies with the help of self-learning filters]. *Izvestiia vuzov. Geologiia i razvedka* [Proceedings of the universities. Geology and Exploration], 1973, no. 9.
4. Nikitin A.A., Petrov A.V. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii* [Theoretical basis of geophysical data processing]. Moscow, TsITvP Publ., 2008.
5. Demura G.V., Petrov A.V. *Fiziko-geologicheskoe modelirovanie i anizotropnaia geomagnitnaia tomografiia nedr* [Physical and geological modeling and geomagnetic anisotropic subsurface imaging]. *Geofizika* [Geophysics], 2014, no. 6.
6. Petrov A.V. *Algoritm adaptivnoi energeticheskoi fil'tratsii profil'nykh geofizicheskikh nabliudenii* [The algorithm is adaptive energy filtering of relevant geophysical observations]. *Izvestiia vuzov. Geologiia i razvedka* [Proceedings of the universities. Geology and Exploration], 1994, no. 1.
7. Petrov A.V. *Adaptivnaia fil'tratsiia geopolei* [Adaptive filtering geofields]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 1996, no. 6.
8. Petrov A.V., Solokha E.V. *Tekhnologiia analiza geopolei v skol'ziashchikh oknakh «zhivoi» formy. Voprosy teorii i praktiki geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh polei* [Geofields analysis technology in the sliding windows "live" form. Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic and electric fields]. *Materialy 33 sessii mezhdunarodnogo seminara im. D.G. Uspenskogo* [Proc. 33th Int. seminar name Uspensky], Ekaterinburg, 2006, pp. 271–275.
9. Zinovkin S.V., Petrov A.V., Osipenkov D.Iu., Iudin D.B. *Komp'iuternaia tekhnologiia statisticheskogo i spektral'no-korreliatsionnogo analiza dannykh KOSKAD 3D 2011* [Computer technology and statistical spectral correlation analysis KOSKAD 3D 2011]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], 2011, no. 4.
10. Demura G.V., A.V. Petrov, S.V. Zinovkin. *Novye vozmozhnosti i perspektivy magnitorazvedki – komp'iuternye tekhnologii ob"emnogo modelirovaniia i fil'tratsii rezul'tatov vysokotochnykh ploshchadnykh s"emok* [New opportunities and prospects for magnetic data - computer technology volumetric modeling and filter the results of high-precision shooting areal]. *Nedropol'zovanie XXI vek* [Subsoil XXI century], 2013, no. 4.