УДК 550.361

© Никитин Д.С., Горских П.П., Хуторской М.Д., Иванов Д.А.

АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

¹Никитин Д.С., ²Горских П.П., ¹Хуторской М.Д., ³Иванов Д.А. ¹Геологический институт РАН, Москва, Россия ²ПАО ГМК Норильский никель, Норильск, Россия ³Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия e-mail: ndsnomination@mail.ru

Проведено районирование структурно-геологических неоднородностей в северо-восточной части Баренцева моря на основании анализа различных компонентов гравитационного и магнитного полей. В фундаменте и в осадочном чехле Баренцевоморского шельфа отмечены объекты, формирующие аномалии потенциальных полей из-за сосуществования сложных геологических форм и контраста петрофизических свойств (плотности и намагниченности). По результатам проведенного численного моделирования выделены границы отдельных блоков в фундаменте, маркируемые разрывными нарушениями. Построена численная модель разрывных нарушений в осадочном чехле и в фундаменте Баренцевоморской плиты.

Ключевые слова: шельф, гравитационное поле, магнитное поле, моделирование, разрывные нарушения, нефтегазоносность.

ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION OF THE POTENTIAL FIELDS IN BARENTS SEA NORTHEASTERN PART

¹Nikitin D.S., ²Gorskikh P.P., ¹Khutorskoy M.D., ³Ivanov D.A. ¹Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ²Mining Metallurgy Combine «Norilsk nickel», Norilsk, Russia ³Voronezh State University, Voronezh, Russia

We propose a zoning carried out for structural-geological heterogeneities in the north-eastern part of the Barents Sea based on the gravitational and magnetic fields analysis. In the Barents Sea basement and sedimentary cover, we indicated objects forming the potential field anomalies due to co-existence of complex geological forms and petrophysical properties contrast (density and magnetization). The numerical simulation results in boundaries location for separate blocks in the basement marked by faults. A numerical model of fractured zones in the sedimentary cover and in the Barents Sea basement was made.

Keywords: shelf, gravity and magnetic fields, modeling, fracture zones, oil and gas content.

Введение

В северо-восточной части Баренцевоморского шельфа выполнен большой объем геолого-геофизических исследований с целью прогнозирования нефтегазоносности.

Тем не менее, многие проблемы, позволяющие понять природу структурно-геологических неоднородностей, обусловливавших локализацию залежей углеводородов, остаются нерешенными.

В статье представлены детальный анализ и моделирование гравитационного и магнитного полей с привлечением сейсмогеологических данных, проведен детальный анализ полученных авторами и ранее опубликованных результатов работ, а также рассмотрен генезис структурно-геологических неоднородностей, обусловливающих локализацию залежей углеводородов.

Изучаемая акватория расположена в северовосточной части Баренцева моря между арх. Новая Земля и арх. Земля Франца-Иосифа. По характеру сейсмических записей и распределению потенциальных геофизических полей изучаемую площадь можно разделить на две части: северо-западную и юго-восточную (рис. 1). К северо-западной части относится структура Восточно-Баренцевского мега-

прогиба (ВБМ). Юго-восточная часть представлена Предновоземельской структурной областью (ПСО), формируемой поднятиями Адмиралтейства, Панкратьева и Мыса Желания, а также прогибами Седова, Мака, Гольфстрим и Карпова.

ПСО и ВБМ сформировались на гетерогенном фундаменте Баренцевской и Северо-Карской плит, которые, возможно, входили в существовавшую некогда на севере платформу Баренция [1].

ВБМ, выполненный породами среднепалеозойско-мезозойского возраста, отличается большой мощностью осадочного чехла — до 18-20 км и более. Примерно половина толщи чехла представлена осадочно-вулканогенными образованиями верхней перми и триаса. Мощность консолидированной части земной коры составляет 10-15 км, граница Мохо находится на глубине 27-33 км. Кора утонена за счет гранитогнейсового слоя [2]. Основные тектонические нарушения фундамента ВБМ имеют северо-восточное и северо-западное простирания. Последние характеризуются как трансформные с правосторонней сдвиговой составляющей.

При переходе к ПСО строение земной коры, форма аномалий потенциальных полей, а также характер магматизма резко меняются. Поверхность

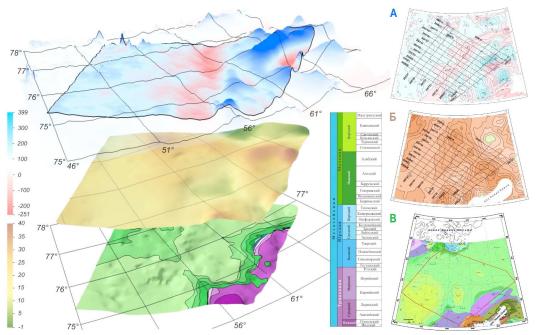


Рис. 1. Карта аномального магнитного поля (A); Карта аномального гравитационного поля (Б); Геологическая карта дочетвертичных образований (В)

фундамента здесь ступенчато воздымается в юговосточном направлении. Эти ступенчатые воздымания сформированы разноуровневыми блоками, дезинтегрированными и надвинутыми на кристаллическое основание ВБМ. Мощность земной коры увеличивается до 36-38 км, но при этом наблюдаются значительные колебания мощности осадочного чехла и гранитно-метаморфического слоя.

Граница между ВБМ и ПСО прослеживается по зонам глубинных разломов. В центральной части исследуемого района она выражена в магнитном поле широкой, линейной северо-восточного простирания отрицательной аномалией. Аномальная зона имеет ширину 40-80 км. В ее пределах северо-восточные и субмеридиональные надвиги, прослеживаемые от Новоземельского орогена, сменяются сбросами северо-восточного направления. На восточном борту мегапрогиба наблюдается погружение блоков ПСО. Здесь же отмечается внедрение крупных интрузий, верхние кромки которых находятся на глубинах 8-10 км.

Методика интерпретации потенциальных полей Анализ потенциальных полей выполнялся с использованием процедуры фильтрации на основе быстрого преобразования Фурье, которое является эффективным средством обработки и интерпретации гравитационных и магнитных данных. Преобразовав грави-магнитные данные в «пространство Фурье», мы можем работать с ними как с функцией волнового числа или длины волны. Для такой формы представления данных существует целый ряд операций, которые могут использоваться для получения полезной информации, удаления не интересующей информации или трансформации данных (определение тренда, вертикальной производной,

аналитическое продолжение поля и пр.).

Расчет трансформант потенциальных полей позволяет смоделировать положение магнитных контактных поверхностей, отождествляемых с границами геологических объектов. Уточнение элементов залегания некоторых контактных поверхностей возможно путем вычисления пространственных координат сингулярных источников с помощью алгоритма деконволюции Эйлера, позволяющего вычислять координаты и глубину положения особой точки поля через значения частных производных по координатным осям. Анализ размещения особых точек потенциальных полей позволяет уточнить ранг и положение тектонических нарушений, выделяемых по геофизическим данным. Также оценка глубин залегания полезна для оконтуривания геологических структур. В практике разведки нефтяных месторождений это аналогично алгоритму определения максимальной мощности разреза осадочного чехла [3,4,5,6].

Основой для моделирования по комплексу параметров (скорость, плотность, намагниченность) послужили данные, полученные в результате комплексных геофизических работ, проведенных в 2006-2010 гг. ОАО «МАГЭ» в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа, включавших сейсмопрофилирование, гравитационную и магнитную съемки.

Примененный метод моделирования заключается в итеративном решении прямой задачи (вычисление грави-магнитного эффекта от предполагаемого геологического разреза) и создании такой плотностной и магнитной моделей строения земной коры вдоль линии профиля, в которой расчетное гравитационное и магнитное поля наилучшим образом

соответствуют наблюденному. Это позволяет интерполировать положение плотностных и магнитных границ на участках, где фактические данные отсутствуют или являются ненадежными.

Плотности глубинных слоёв оценивались по известным соотношениям между этим параметром и скоростью продольных волн. Кроме того, привлекались петрофизические данные, полученные по керну скважин на Земле Франца-Иосифа [7,8].

Расчеты выполнялись при помощи программного пакета OASIS MONTAJ компании Geosoft [Geosoft Software] [9].

Моделирование и анализ потенциальных полей позволяют:

- более достоверно выяснить структуру, вещественный состав и геодинамические условия формирования земной коры;
- подтвердить проявления интрузивного магматизма и соляного диапиризма;
- выявить и проследить элементы тектоники, четко проявляющиеся в потенциальных полях;

 предложить геологически обоснованный подход при интерпретации магнитного и гравитационного полей.

Обсуждение результатов

Для геофизической характеристики северо-восточной части Баренцевоморского шельфа были составлены карты аномального магнитного и гравитационного полей (рис. 2, рис. 3). Для детальной характеристики геологических комплексов, отраженных в потенциальных полях, были рассчитаны их локальные составляющие (рис. 4, рис. 5).

Районирование территории по геофизическим полям стало началом интерпретационного процесса. Основной задачей районирования является разбиение площади на блоки, характеризующиеся границами, однородными по уровням значений и структуре взаимосвязей введенных параметров. Границами таких блоков служат, как правило, тектонические нарушения. Таким образом, задачи районирования площади и трассирования разломов тесно связаны между собой.

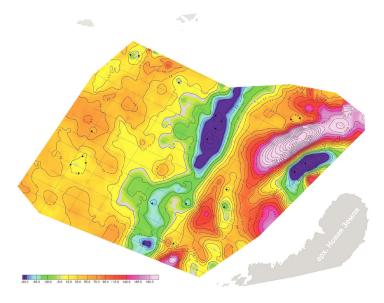


Рис. 2. Аномальное магнитное поле

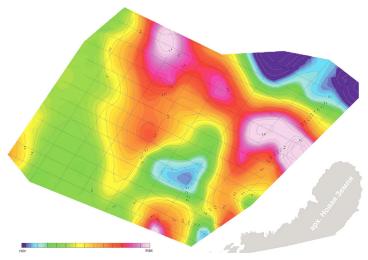


Рис. 3. Поле силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см³

При районировании мы использовали набор геофизических полей, характеризующих намагниченность и плотность горных пород.

Районирование территории производилось путем классификации многопараметровых цифровых геофизических данных по методике «К-средних» в комплексе спектрально-корреляционного анализа трехмерных геоданных «COSCAD-3D» [10]. С помощью алгоритма, реализованного в этой программе, осуществляется разбиение площади на области (кластеры), однородные по уровням значений и структуре взаимосвязей геофизических параметров. Наименее плотным и немагнитным породам соответствуют классы голубого и синего оттенков, а плотным и магнитным образованиям – красного (см. рис. 5).

По аналогичному принципу выполнена совместная классификация локальной составляющей магнитного и гравитационного полей. (рис. 6,

рис. 7). Локальная составляющая отражает наиболее приповерхностные объекты, что в нашем случае соответствует неоднородностям в осадочном чехле, в том числе, относящимся к магматическим образованиям.

Структура гравитационного и магнитного полей формируется за счет суперпозиции аномалий разного происхождения, обусловленных, соответственно, плотностными и магнитными неоднородностями геологических тел. Они имеют разные латеральные размеры, разные контрасты физических свойств относительно фоновых характеристик и разную глубину залегания аномалиеобразующих объектов. Именно эти факторы объясняют появление аномалий, которые принято называть или региональными, или локальными.

Разбиение на эти два типа аномалий определяется масштабом исследований. При детальных съемках крупного масштаба в пределах шельфовых

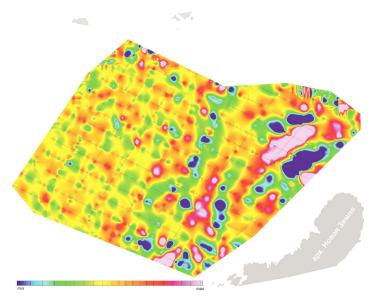


Рис. 4. Локальная составляющая аномального магнитного поля

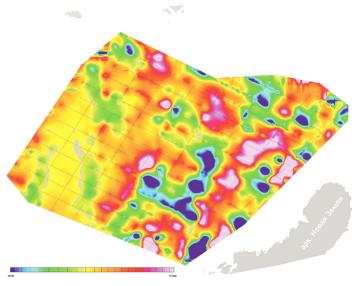


Рис. 5. Локальная составляющая аномалий поля силы тяжести

поле, нТл

Науки о Земле

плит региональные аномалии отличаются от локальных только глубинностью источника, но обе приурочены к контрастным объектам в пределах осадочного чехла. При исследовании на длинных геотраверсах или при площадной съемке мелкого масштаба удается классифицировать региональные аномалии, образующиеся за счет неоднородностей в фундаменте. На этом фоне более мелкие, локальные аномалии, как правило, приурочены к осадочному чехлу.

Существующие хорошо апробированные методы трансформации потенциальных полей позволяют отфильтровать глубинные региональные аномалии и приповерхностные локальные, причем выбор алгоритма трансформации дает возможность делать, по существу, томографические срезы аномального поля на различных глубинах.

Наиболее часто применяемыми методами преобразования потенциальных полей являются осреднение, аналитическое продолжение (трансформация) поля в верхнее или нижнее полупространство, вычисление высших производных потенциала. Поле аномалий Δg и ΔT , взятое, например, вдоль некоторого профиля, представляет чаще всего довольно сложную кривую, отражающую суперпозицию взаимного влияния различных тел, расположенных на разных уровнях в земной коре. Удаляясь или приближаясь к аномальным массам, мы будем тем самым ослаблять или усиливать те или иные аномалии, потому что величина потенциала гравитационного и магнитного полей обратно пропорциональна расстоянию до возмущающего объекта. Гравитаци-

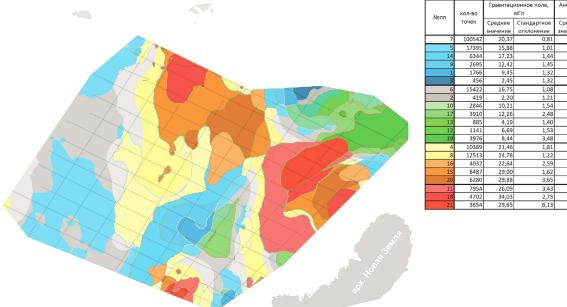


Рис. 6. Результат классификации аномального магнитного и гравитационного полей

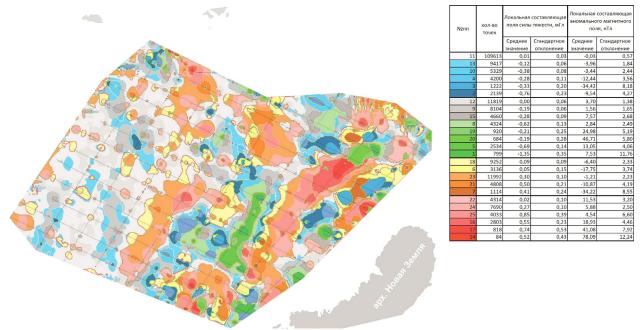


Рис. 7. Результат классификации локальных составляющих магнитного поля и поля силы тяжести

онный и магнитный потенциалы являются гармоническими функциями, т.е. слабо меняющимися при малых приращениях аргумента и многократно дифференцируемые.

Согласно теореме Гаусса о среднем значении гармонической функции, она обладает важным свойством: будучи заданной на плоскости и на сфере, гармоническая функция может быть определена в любой точке пространства. Иными словами, значение гармонической функции, например, в центре круга равно интегральному среднему ее значений на окружности (плоская задача). При этом оказывается, что при пересчете поля в верхнее и нижнее полупространства наиболее сильно изменяется поле от небольших по размерам объектов, расположенных близко к поверхности. Поле от глубоко расположенных крупных геологических объектов мало подвержено изменению при трансформациях. Пересчитывая поле Δg или ΔT вверх, мы в значительной степени исключаем влияние локальных структур и подчеркиваем поле, вызванное действием крупных региональных объектов. С другой стороны, пересчитывая наблюденное поле в нижнее полупространство, например, на уровень кристаллического фундамента, мы в значительной мере усиливаем интенсивность локальных аномалий, вызванных близко расположенными к поверхности небольшими объектами. Таким образом, операция трансформации аналогична фильтрации: при пересчете вверх подавляются высокочастотные составляющие кривых Δg или ΔT и выделяются низкочастотные, при пересчете вниз, наоборот, происходит усиление высокочастотного фона аномалий и относительное уменьшение низкочастотных составляющих. Аналогичный пересчету в верхнее полупространство эффект производит осреднение поля по площадям. Вычисление высших производных Δg или ΔT , так же как и пересчет в нижнее полупространство, усиливает высокочастотные составляющие поля. Таким образом, зная распределение Δg или ΔT на поверхности воды или Земли, можно рассчитать их значение выше или ниже этой поверхности.

Следует отметить, что при пересчете в нижнее полупространство сильно возрастает влияние ошибок измерений. Поэтому для их уменьшения производят предварительно на каждом уровне пересчета сглаживание кривой Δg или ΔT . Разумеется, что эти операции ведут и к искажению первичной информации, появлению ложных аномалий или, наоборот, затушевыванию существующих аномалий. Поэтому проведение операций трансформации требует выполнения высокоточных наблюдений.

Не менее важной геологической задачей является выделение и ранжирование разрывных нарушений. На основании совместной интерпретации и анализа геолого-тектонических и геофизических данных установлены следующие основные гео-

физические критерии выделения и прослеживания разрывных нарушений:

- 1. Зоны интенсивных линейных горизонтальных градиентов типа магнитных ступеней, выделяемых на границах блоков, отличающихся вертикальной мощностью, размерами, формой, глубиной залегания контактной поверхности.
- 2. Резкие изменения направлений и смещение изолиний по простиранию, резкие изгибы и пережимы их в плане, торцевое замыкание или обрыв.
- 3. Смена уровня, знака, характера и формы аномалий на контакте блоков.
- 4. Цепочки знакопеременных магнитных аномалий, приуроченные к контакту блоков.

Уточнение элементов залегания некоторых контактных поверхностей произведено нами путем вычисления пространственных координат сингулярных источников с помощью алгоритма деконволюции Эйлера (рис. 8). Анализ размещения особых точек потенциальных полей позволяет уточнить ранг и положение, направление падения плоскости сместителя тектонических нарушений, выделяемых по геофизическим данным.

По профилю 200705 (рис. 9) выполнено моделирование потенциальных полей. Исходными данными для построения модели послужили временной разрез МОВ ОГТ и данные по петрофизическим свойствам пород.

На первом этапе выполнена оцифровка временного разреза, отражающих горизонтов, динамически выраженных в волновом поле дискордантных горизонтов группы α (см. рис. 9), которые отождествляются с пластовыми магматическими интрузиями (силлы) (природа этих образований установлена по результатам бурения скважины «Лудловская-1», где вблизи забоя вскрыты несколько пластов габбро-долеритов), а также очень необычных («столбообразные» волновые аномалии) субвертикальных интрузивных тел (дайки) с минимальными амплитудами смещения. Характерной особенностью этих аномалий является хаотичная сейсмическая запись внутри «столба» и прекращение прослеживания отражающих горизонтов на его границах. Столбообразные аномалии коррелируются от профиля к профилю, образую протяженные (до 100 км) линеаменты, выраженные в рельефе в виде тектонических уступов северо-западного простирания (см. рис. 9).

В результате получена блоковая модель, каждому блоку которой было присвоено соответствующее значение плотности.

Используя алгоритм Нейфа-Дрейка [8], были рассчитаны скорости сейсмических волн для каждого блока (рис. 9, Б). Затем, используя алгоритм пересчета, реализованный в модуле GM-SYS программного комплекса OASIS MONTAJ [9], из временного разреза получен глубинный.

Путем моделирования рассчитан грави-магнит-

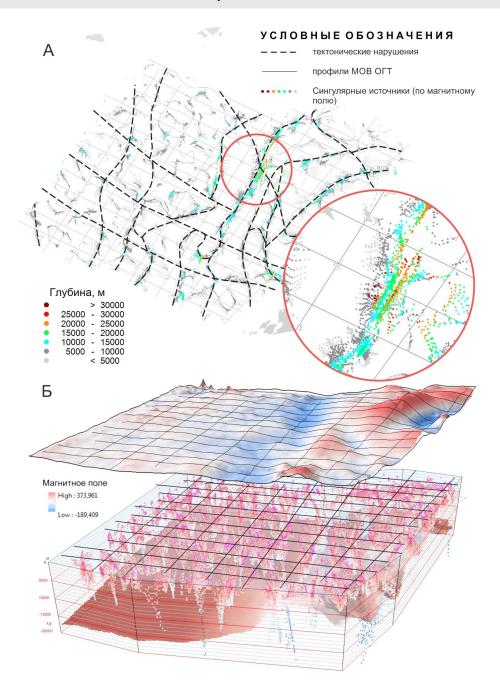


Рис. 8. Сингулярные источники по магнитному полю (A). Пространственное размещение особых точек магнитного поля (Б)

ный эффект, который сравнивался с наблюденными магнитным и гравитационным полями. Уточнив геометрию границ блоков и их свойства, получили модель, грави-магнитный эффект от которой наиболее соответствовал наблюденным полям (рис. 10). Было принято допущение о постоянстве физических параметров в выделенном модельном блоке — геокомплексе.

Реальная более сложная картина распределения физических параметров делает модельные границы условными, возможные вариации которых при изменении параметров внутри тел могут достигать 15-20%. Ошибки за счет аппроксимации реального трехмерного геологического пространства могут достигать 15% для выбранной структуры распре-

деления геокомплексов. В этой связи не было необходимости при моделировании добиваться полного соответствия модельного поля наблюденному, остаточное расхождение составляло 3 мГал и 20 нТл. Эти различия были обусловлены, в основном, реальными неоднородностями глубинного строения, которые не имели какого-либо отражения в сейсмических данных и не учитывались в моделях.

Выводы

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- 1. Рассчитанная мощность осадочного чехла составляет 18-20 км.
- 2. Предполагаемые, по данным сейсморазведки, магматические образования в осадочном чехле

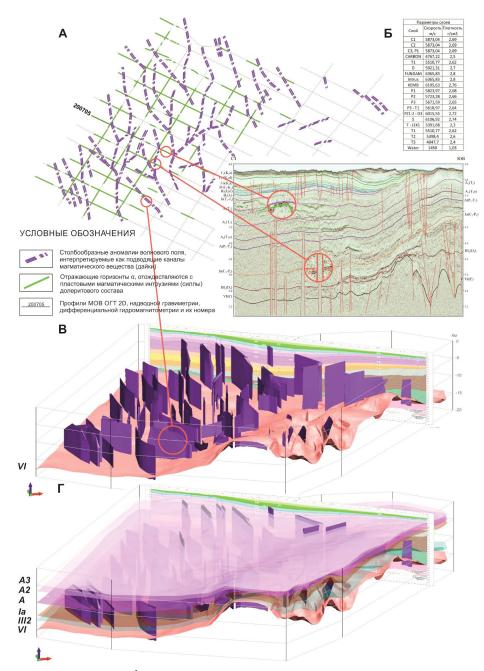


Рис. 9. Область распространения рефлекторов группы α, приуроченных к верхнетриасовому интервалу разреза (A). Параметры слоев (Б).

Пространственная модель рефлекторов группы α : B — соответствует рефлекторам группы α , фиксируемым на отражающем горизонте VI, представляющим собой поверхность кристаллического фундамента; Γ — уровень рефлекторов группы α , фиксируемых от VI до ОГ A-A2-A3, т.е., охватывая палеозойскую и триасовую части осадочного чехла

в виде даек и силлов долеритов, а также «столбообразные» аномалии волнового поля в приведенной модели логично объясняются интрузивными образованиями преимущественно в верхней части осадочного чехла (глубина верхней кромки порядка 3—4 км при мощности пластовых частей интрузий 500—1500 м). Локализуются интрузии в основном в верхнепермско-триасовых толщах.

3. Гравитационный эффект от интрузивных образований при плотности долеритов 2.78 г/см³ может достигать 10 мГал, что вносит существенный вклад в наблюденное поле силы тяжести и свидетельствует о значительных масштабах магматизма

в позднепермское время и практически на протяжении всего триасового периода. Четко фиксируемые в волновом поле «столбообразные» тела, очевидно, являлись долгоживущими, приуроченными к зонам разломов, подводящими каналами магматического вещества.

- 4. Породы фундамента характеризуются блоковым строением с различной плотностью (от 2.76 до 2.85 г/см³) и намагниченностью (от 100 до $300\cdot10^{-5}$ СИ).
- 5. Границам блоков, как правило, соответствуют тектонические нарушения, которые так же уверенно выделяются при интерпретации

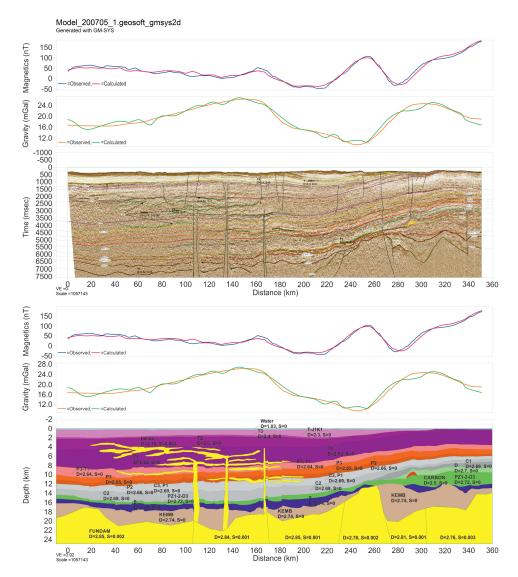


Рис. 10. Геолого-геофизический разрез (по профилю 200705) по результатам моделирования потенциальных полей

площадных данных.

Проведенный комплексный анализ потенциальных полей совместно с данными сейсморазведки, моделирование элементов тектоники с использованием современных алгоритмов и программных комплексов, районирование территории по геофизическим данным, а также моделирование потен-

циальных полей позволили уточнить результаты предыдущих работ [11-16] и получить расширенное представление об особенностях магматизма, петрофизической характеристике и структурно-тектоническом строении северо-восточной части Баренцевоморского шельфа.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы № 0135-2015-0021.

Список литературы

- 1. Журавлев В.С., Раабен М.Е. Гипотеза Баренции в свете современных данных. В кн.: Тектоника Восточно-Европейской платформы и ее обрамления. М.: Наука. 1975. С. 75-92.
- 2. Сакулина Т.С., Верба М.Л., Иванова Н.М., Рослов Ю.В., Беляев И.В.. Глубинное строение северной части Баренцево-Карского региона вдоль профиля 4-АР. В кн.: Сборник материалов 7-го форума «Топливно-энергетический комплекс России». С-Пб., 2007. С. 371-374.
- 3. Bhattacharya B.K., 1966, Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. Geophysics, Vol. 31. P. 97-121.
- 4. Gupta V.K., Grant F.S., 1985, Mineral exploration aspects of gravity and aeromagnetic survey in Sudbury-Cobalt area, Ontario. SEG; The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps. W.J. Hinze (Editor). P. 392-411.
- 5. Macleod I.N., Vierra S., Chaves A.C. (1993a). Analytic signal and reduction to the pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. Proceedings of the third international congress of the Brazilian society of geophysicists.
- 6. Spector A., Grant F.S., 1970, Statistical models for interpreting aeromagnetic data. Geophysics. Vol. 35. N. 2. P.293-302.
- 7. Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В., и др. Геотермия Арктических морей. Москва: ГЕОС 2013. 231 с. [Труды Геологического института РАН, выпуск 605].



- Цыбуля Л.А., Левашкевич В.Г., Заливчий О.А., Школа И.В. Тепловой поток на акватории Карского мора и его островах. Геология и геофизика. 1994. №11 С. 93-98.
- Geosoft Software, Oasis montaj. URL: http://www.geosoft.com/ru (дата обращения 05.03.2017)
- 10. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных COSCAD-3D, URL: http://coscad3d.ru/
- 11. Хуторской М.Д., Подгорных Л.В. Геотермия Арктического бассейна проблемы и решения // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. №1. С. 3-26.
- 12. Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В., Хуторской М.Д. Тепловой поток и температуры в земной коре западнее Шпицбергена (26-й и 27-й рейсы НИС «Академик Николай Страхов») // Мониторинг. Наука и технологии. 2011. №1. С. 6-18.
- 13. Поляк Б.Г., Хуторской М.Д. Тепловой поток в континентальной коре: суперпозиция нестационарных факторов // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. №2 С. 46-55.
- 14. Хуторской М.Д., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Кременецкая Е.О., Кваерна Т. Сейсмичность, тепловой поток и тектоника Западно-Арктического бассейна // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. №3. С. 23-32.
- 15. Никитин Д.С., Иванов Д.А. Структурно-тектонические условия нефтегазоносности Северо-Восточной части Баренцевоморского шельфа // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 2. С. 48-54.
- 16. Хуторской М.Д., Тевелева Е.А. Тепловой поток в абиссальных котловинах Пацифики и Атлантики // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. №4. С. 20-28.

References

- 1. Zhuravlev V.S., Raaben M.E. The Barentsi hypothesis in the light of the modern data. *V kn.: Tektonika Vostochno-Evropeiskoi platformy i ee obramleniya* [Tectonics of the East European platform and its frame]. Moskow. Science publ. 1975. Pp. 75-92.
- 2. Sakulina T.S., Verba M.L., Ivanov N.M., Roslov Yu.V., Belyaev I.V. A deep structure of the northern part of the Barents-Kara region along 4-AR profile. *V kn.: Sbornik materialov 7-go foruma «Toplivno-energeticheskii kompleks Rossii»* [Collection of materials of the 7th forum «Fuel and Energy Complex of Russia»]. St. Petersburg. 2007. Pp. 371-374.
- 3. Bhattacharya, B.K. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics*. 31. 1966. Pp. 97-121.
- 4. Gupta V.K., Grant F.S. Mineral exploration aspects of gravity and aeromagnetic survey in Sudbury-Cobalt area. Ontario. SEG. *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*. W.J.Hinze (Ed.). 1985. Pp. 392-411.
- 5. Macleod I.N., Vierra S., Chaves A.C. Analytic signal and reduction to the pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Proceedings of the third international congress of the Brazilian society of geophysicists.* 1993.
- 6. Spector A., Grant F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*. 35. No. 2. 1970. Pp. 293-302.
- Khutorskoy M.D., Akhmedzianov V.R., Ermakov A.V. et al. Geothermics of the Arctic Seas. Moscow. GEOS. 2013. 231 p. Proceed. of the RAS Geological Institute. V. 605.
- 8. Tsybulia L.A., Levashkevich V.G., Zalivchi O.A., Shkola I.V. Heat flow on the Kara Sea area and on its islands. *Geologiya i geofizika*. 1994. No. 11. Pp. 93-98.
- 9. Geosoft Software. Oasis montaj. 2017. Available at: http://www.geosoft.com/ru (accessed 5 March 2017).
- 10. Complex of the spectral and correlation analysis of data COSCAD-3D. 2017. Available at: http://coscad3d.ru/ (accessed 5 March 2017).
- 11. Khutorskoy M.D., Podgornyh L.V. Геотермия Geothermics of the Arctic basin the problems and solutions. I. Geothermal field and the Arctic shelf oil and gas bearing. *Monitoring. Nauka i tehnologii*. 2010. No. 1. Pp. 3-26. (in Russian).
- 12. Akhmedzianov AV.R., Ermakov A.V., Khutorskoy M.D. Heat flow and terrestrial temperature in the Earth crust westwards Svalbard (rv «Akademik Nikolaj Strakhov» 26-th and 27-th cruises). *Monitoring. Nauka i tehnologii.* 2011. No. 1. Pp. 6-18. (in Russian).
- 13. Poliak B.G., Khutorskoy M.D. Heat flow in the continental crust: superposition of unsteady factors. *Monitoring. Nauka i tehnologii*. 2015. No. 2. Pp. 46-55. (in Russian).
- 14. Khutorskoy M.D., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Kremenetskaya E.O., Kvaerna T. Seismicity, heat flow and tectonics of the Western Arctic basin. *Monitoring. Nauka i tehnologii.* 2015. No. 3. Pp. 23-32. (in Russian).
- 15. Nikitin D.S., Ivanov D.A. Structural and tectonic conditions of oil and gas content of Northeast part of the Barents sea shelf. *Monitoring. Nauka i tehnologii.* 2016. No. 2. Pp. 48-54. (in Russian).
- 16. Khutorskoy M.D., Teveleva E.A. Heat flow in Pacific and Atlantic abyssal basins. *Monitoring. Nauka i tehnologii.* 2016. No. 4. Pp. 20-28. (in Russian).

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Горских Павел Павлович

геофизик 1 категории, ПАО Горно-металлургическая компания «Норильский никель», Норильск, Россия

Иванов Дмитрий Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры исторической геологии и палеонтологии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Никитин Дмитрий Сергеевич

старший научный сотрудник лаборатории тепломассопереноса, Геологический институт РАН, Москва, Россия

Хуторской Михаил Давыдович

доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией тепломассопереноса ГИН РАН, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Gorskih Pavel Pavlovich

Geophysicist, Mining and Metallurgical Company «Norilsk nickel», Norilsk, Russia

Ivanov Dmitriy Andreevich

Candidate of Geology and Mineralogy, Docent of the Department of Historical Geology and Paleontology, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Nikitin Dmitrii Sergeevich

Senior Researcher Laboratory of Heat and Mass Transfer, Geological Institute, RAS, Moscow, Russia

Khutorskoi Mihail Davydovich

Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer, Geological Institute, RAS, Moscow, Russia