

Пискарёв А.Л.^{1,2}, Казанин Г.С.³, Киреев А.А.^{1,2}, Мищенко О.Н.¹, Павлов С.П.³, Поселов В.А.¹, Савин В.А.¹, Смирнов О.Е.¹, Супруненко О.И.¹, Черных А.А.^{1,2}, Шлыкова В.В.³ (1 — ФГУП «ВНИИОкеан-геология», 2 — Санкт-Петербургский государственный университет, 3 — ОАО «МАГЕ»)

СТРОЕНИЕ ВОСТОЧНОГО БОРТА СЕВЕРО-БАРЕНЦЕВСКОЙ ВПАДИНЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОТКРЫТИЯ В РЕГИОНЕ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ

В северной части Баренцева моря после выполнения региональных комплексных геофизических работ, включающих сейсморазведку МОВ ОГТ 2D, надводную гравиметрию и дифференциальную гидромагнитную съемку, рассчитаны и построены 3D модели земной коры (плотностная и магнитная). В восточном борту Северо-Баренцевской впадины выявлена шовная зона палеонадвиг, представляющая особый интерес для детальных исследований нефтегазоносности. Ключевые слова: Баренцево море, сейсморазведка, гравиметрия, магниторазведка, моделирование, тектоника, нефть.

Piskarev A.L.^{1,2}, Kazanin G.S.³, Kireev A.A.^{1,2}, Mischenko O.N.¹, Pavlov S.P.³, Poselov V.A.¹, Savin V.A.¹, Smirnov O.E.¹, Suprunenko O.I.¹, Chernykh A.A.^{1,2}, Shlykova V.V.³ (1 — VNIIOkeangeologiya, 2 — St. Petersburg State University, 3 — MAGE)

THE EASTERN SLOPE STRUCTURE IN THE NORTH BARENTS BASIN AND PROSPECTS OF THE GIANT OIL FIELD DISCOVERY IN THE REGION

The regional combine geophysical survey including 2D seismic reflection CDP, marine gravimetric and differential magnetic survey was recently carried out in the northern part of the Barents Sea. Based on this data a 3D model of the earth's crust (a density and magnetic) was designed and constructed. At the eastern slope of North Barents Basin a suture zone of ancient overthrust zone was revealed, which have a particular interest for the future oil and gas exploration. Key words: Barents Sea, seismic CDP, gravity, magnetic, modeling, tectonics, oil.

Изучение Баренцевского шельфа началось с конца 1970-х годов, когда Морская арктическая геологоразведочная экспедиция (МАГЭ) начала выполнять геологическое картирование масштаба 1:1 000 000. Изучение общих черт геологического строения региона проводилось работами КМПВ и ГСЗ, а вторым направлением сейсмических исследований были поиски площадей, перспективных с точки зрения нефтегазоносности. Одновременно проводилось изучение геологического строения арктических архипелагов Новая Земля и Земля Франца-Иосифа.

Цельные представления о геологическом строении Баренцевского шельфа впервые были сформулированы к концу 1980-х годов после завершения регионального этапа геофизических съемок и выполнения буровых работ на ряде морских структур и на островах [2, 3, 6]. К началу 1990-х годов геолого-геофизическими исследованиями на акватории Баренцева моря была установлена общая мощность осадков, получены данные о генеральных взаимоотношениях толщ внутри осадочного чехла. Разведочными работами был открыт ряд крупнейших месторождений нефти и газа — Штокманов-

ское, Лудловское и Ледовое. Вместе с тем оставались неясными вопросы глубинного строения региона: характер и ареалы распространения ниже-среднепалеозойских отложений, состав и время формирования складчатого и кристаллического фундамента, возраст и ареалы магматических образований. Остро дискуссионной и в целом неясной оставалась проблема приуроченности открытых крупных месторождений углеводородов к тем или иным глубинным структурам.

Характер прогибания и осадконакопления во впадине и ее бортах, начиная с пермского времени, обсуждался в работах Я.П. Маловицкого [5] и В.С. Суркова [7]. В работе М.В. Коротаева [4] история региона, начиная с раннего девона, разделена на 11 этапов, среди которых выделены два этапа быстрого погружения: поздний девон (370 млн. лет) и пермь-триас (255–248 млн. лет).

Позднепермский-триасовый этап тектонической активизации детально рассмотрен в работе [1] на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных. Предполагается, что быстрое углубление Восточно-Баренцевского ареала осадконакопления произошло в течение 20–25 млн. лет, в результате чего сформировалась гигантская линза отложений мощностью 8–9 км. Максимальное поднятие Пай-Хой-Новоземельского пояса произошло в позднем триасе-ранней юре, причем с конца триаса, когда рифтогенный режим в Восточно-Баренцевском бассейне угас, двустороннее сжатие сменилось на одностороннее, и массы складчатых сооружений начали смещаться в западном направлении.

Последующая позднекембрийская тектоно-магматическая эпоха широко проявлена в центральной части и на севере Баренцевской плиты. Трапповый комплекс юрско-мелового возраста особенно широко развит на архипелаге Земля Франца-Иосифа, где он представлен силами и дайками долеритов и покровами базальтов. По радиологическим данным пик базальтового магматизма на Земле Франца-Иосифа соответствует возрасту 123 млн. лет. Согласно недавним исследованиям [8] формирование и рост локальных структур открытых гигантских месторождений углеводородов в Восточно-Баренцевском бассейне и процесс интрузивной магматической деятельности проистекали практически одновременно.

Северная часть Баренцева моря остается не затронутой опорно-параметрическим бурением. Как следствие, неоднозначно интерпретируются материалы изучения сейсмических границ, существует множество вариантов толкования характера и эволюции глубинных структур региона, и, что особенно важно для геологоразведочного процесса, остается открытым вопрос о приуроченности к тем или иным глубинным структурам известных месторождений углеводородов.

Суровые климатические условия арктических морей России, отдаленность от промышленных центров и отсутствие на побережьях развитой инфраструктуры делают экономически целесообразным поиски в морских арктических бассейнах только крупных и гигантских месторождений нефти [10]. По общемировым данным крупные и гигантские месторождения приурочены к определенным тектоническим зонам. Это либо зоны субдукции, палеосубдукции, палеонадвигов (бассейны Персидского залива, Кавказа — Копет-Дага, Венесуэлы,

Калифорнии, Волго-Уральской провинции), либо крупнейшие рифтогенные зоны, лежащие, как предполагается, в фундаменте бассейнов Западной Сибири и Северного моря [9]. Именно такого типа тектонические зоны и должны в первую очередь привлекать внимание геологов и геофизиков при проведении поисково-разведочных работ в арктических морях.

В северной части Баренцева моря после выполнения региональных комплексных геофизических работ, включающих сейсморазведку МОВ ОГТ 2D, надводную гравиметрию и дифференциальную гидромагнитную съемку, решалась задача уточнения глубинного структурно-тектонического плана Северо-Баренцевского шельфа. Для решения этой задачи были проанализированы и местами откорректированы структурные карты сейсмических горизонтов, скомпилированы и обновлены базы потенциальных полей изучаемой области, рассчитано положение источников аномалий потенциальных полей, рассчитаны и построены 3D модели земной коры (плотностная и магнитная).

Осадочный чехол исследованного региона сложен отложениями нижнепалеозойско-мелового возраста. Стратиграфическая привязка прослеженных отражающих горизонтов осуществлялась передачей корреляции по связующим профилям от скважин Адмиралтейская, Крестовая, Лунинская, и Лудловская. В результате основные сейсмические несогласия получили следующую возрастную привязку: Π_2 ; PZ_{1+2} — D_3 ; Ia: C_3 , P_1 ; A: P_3 — T_1 ; B: T — J , K_1 ; B: J_3 ; Гп: K_{inc} .

Фундамент осадочной толщи уверенно прослеживается только в Предновоземельской структурной области, где он находится на сравнительно небольших глубинах. В пределах Северо-Баренцевской синеклизы прослеживание фундамента затруднено из-за значительных глубин залегания и экранирующих свойств мощного осадочного чехла, в котором широко развиты пластовые интрузивные тела. Поскольку несогласие Π_2 нивелирует депрессивные формы фундамента и имеет форму эрозионного среза, указывающую на длительный период тектонической стабилизации района исследования, именно это несогласие, прослеженное во всей области исследования, было условно принято нами при моделировании за поверхность фундамента.

Карта глубины поверхности фундамента (горизонт Π_2), составленная по сейсмическим материалам, а затем выверенная и откорректированная в процессе моделирования, представлена на рис. 1. Расположение в плане изопакит осадочного чехла Северо-Баренцевской площади в интервалах между приведенными выше главными сейсмическими несогласиями отображает изменение во времени тектонической обстановки и характера осадконакопления. Линии изопакит осадочного чехла в интервале Ia— Π_2 отображают историю палео-

зойского, вплоть до позднего карбона, осадконакопления. Граница нарастания (к востоку) мощности палеозойских толщ проведена на рис. 1 примерно по значению мощности этих толщ в 2,5 км. Эта четко выраженная в плане градиентная зона отражает на карте западную границу преимущественно палеозойского осадочного бассейна, протягивающегося из Северо-Карской впадины.

Наибольший объем осадков в Северо-Баренцевской впадине накоплен, согласно принятой на сегодня стратификации сейсмических несогласий, в интервале Ia—A (поздний карбон — пермь, до 5 км) и в интервале A—B (поздняя пермь—ранний триас, до 7 км). Именно эти толщи и определяют общую конфигурацию Северо-Баренцевского осадочного бассейна, за исключением его северо-восточной области, где резко возрастает мощность ранне- и среднепалеозойских толщ. В интервале B—B (поздний триас—ранняя юра) осадконакопление со значительно меньшей скоростью (мощность толщ до 1–1,5 км) происходило на той же площади, что и в предыдущие два периода. В интервале B—Гп (поздняя юра—неоком) заметное осадконакопление (мощность толщ до 1 км) происходило только вблизи юго-западного края изучаемой площади. И наконец для отложений самого молодого возраста в интервале Гп—дно характерно наличие резко дифференцированных по скорости осадконакопления площадей. Один из районов значительного (до 2 км) осадконакопления охватывает область, непосредственно прилегающую с запада к палеозойскому бассейну, а второй район с осадками этого возраста примерно такой же мощности расположен в области наибольшего прогибания фундамента Северо-Баренцевского бассейна.

На первом этапе моделирования при анализе строения Северо-Баренцевского осадочного бассейна вы-

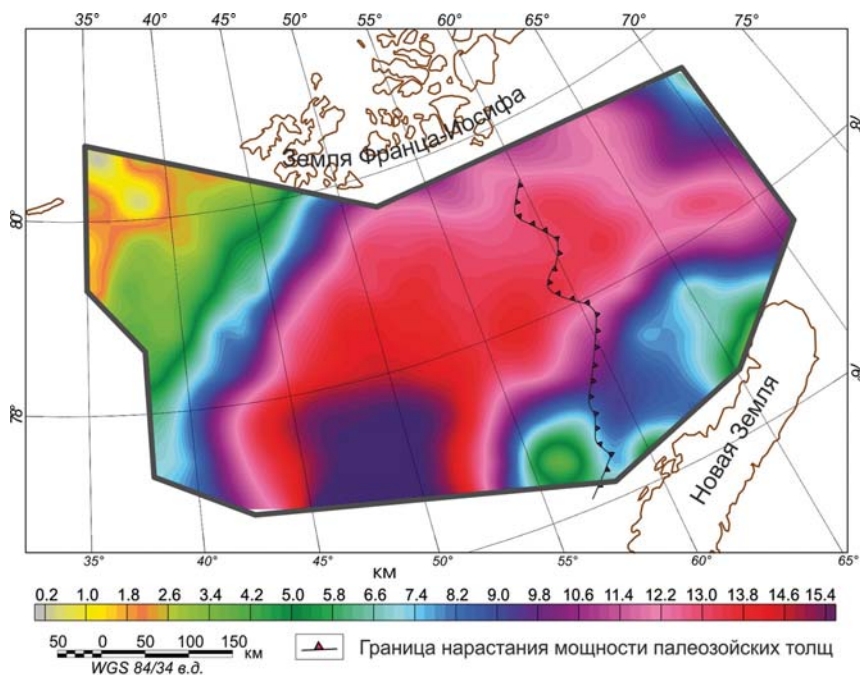


Рис. 1. Глубина поверхности фундамента (горизонт Π_2) и граница нарастания мощности палеозойских толщ. Данные извлечены из 3D сейсмо-гравитационной модели земной коры Северо-Баренцевской площади

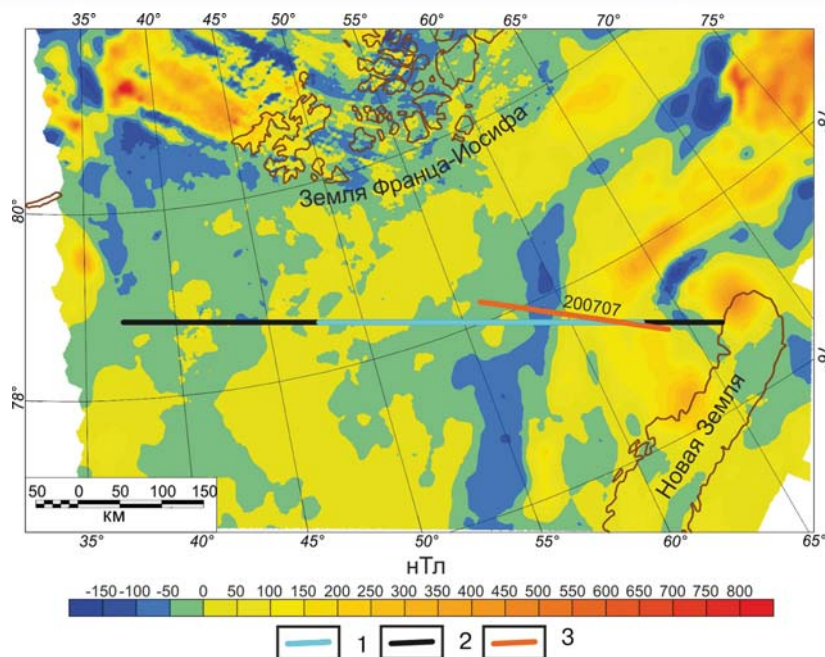


Рис. 2. Магнитные аномалии Северо-Баренцевской площади и схема расположения модельных и сейсмического профилей: 1 — профиль 3D магнитной модели земной коры; 2 — профиль 3D гравитационной модели земной коры; 3 — фрагмент профиля МОВ по рекогносцировочному участку (ОАО «МАГЭ»)

полнено обновление баз данных аномалий потенциальных полей. Для составления и анализа карты магнитных аномалий Северо-Баренцевского шельфа произведена компиляция и объединение данных аэромагнитных съемок с гидромагнитными съемками последних лет. Предварительный анализ рабочего макета карты магнитных аномалий показал, что для расчетов необходимо использовать данные обеих съемок, взаимно дополняющих друг друга. После этого были составлены файлы исходных значений, гридированных значений аномалий и карты аномального поля. Выполнена увязка и уравнивание нормального поля для магнитных съемок, покрывающих исследуемую площадь. В конечную базу данных вошли разномасштабные гидромагнитные и аэромагнитные (выполненные на высотах от 100 до 1000 м) съемки.

Для расчетов положения источников аномалий и последующей комплексной интерпретации оказалось удобным использовать базу данных магнитных аномалий, пересчитанных на единый уровень наблюдения — высоту 1000 м. Составленная таким путем карта магнитных аномалий приведена на рис. 2.

Отметим главные черты аномального магнитного поля рассматриваемого региона.

В районе архипелага Земля Франца-Иосифа четко выражены локальные (короткопериодные) магнитные аномалии северо-западного направления. Источником этих аномалий являются трапповые тела: дайки, силлы и покровы, сложенные долеритами, базальтами и андезитами раннемелового возраста. Анализ характера локальных аномалий на исследованной площади показывает, что аномалии такой же природы заметны на всей площади Северо-Баренцевской впадины, за исключением Приновоземельской области. По-видимому, эти

аномалии соответствуют площади распространения раннемеловых траппов в осадочных породах Северо-Баренцевской впадины, что и подтверждается сейсмическими материалами, включая и приводимые ниже данные по разрезу МОВ ОГТ 200707.

Особый интерес представляет отрицательная магнитная аномалия северо-северо-восточного направления, разделяющая две площади с различной интенсивностью длиннопериодных магнитных аномалий, источники которых по расчетам должны определяться неоднородностью кристаллического фундамента области. Как это отчетливо видно на приводимой карте интенсивность аномалий в Приновоземельской области, расположенной восточнее описываемой отрицательной аномалии, заметно выше, чем на площади, расположенной к западу от нее. Этот качественный признак уже свидетельствует о различном составе и происхождении фундамента Северо-Баренцевской впадины по обе стороны от отрицательной магнитной аномалии, ширина которой составляет 30–60 км. Заметим также, что аномалия

протягивается близко к границе нарастания мощности палеозойских осадочных толщ (рис. 1).

Исходными материалами при составлении базы данных гравитационных аномалий являлись значения аномалий в свободном воздухе международного проекта ArcGP и карты аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе, созданные в МАГЭ при работе на отдельных участках Северо-Баренцевской впадины. В результате были рассчитаны цифровые модели с размером ячейки 2×2 км, что позволило существенно улучшить и детализировать цифровую модель ArcGP. Цифровая модель аномалий поля силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$ получена в результате учета 3D-поправки Буге, рассчитанной на основе цифровой батиметрической модели IBCAO.

Построение сейсмоплотностной, а затем и магнитной моделей Северо-Баренцевской впадины произведено с использованием программы GRAV-3D, осуществляющей решение обратной задачи гравиразведки и магниторазведки на основе сеточной аппроксимации. Программа позволяет производить подбор плотностей и намагниченностей тел в заданных пределах изменений, при закреплённой геометрии разреза и всего нижнего полупространства. При этом используются данные сейсмометрии, характеризующие строение осадочного чехла акватории, петрофизические данные, а также данные о структуре магнитоактивного слоя и плотностной структуре земной коры.

При плотностном моделировании использовались аномалии силы тяжести в редукции Буге, что упростило учет влияния водной толщи. Модель охватывает прямоугольную площадь размером 600×840 км, глубина модели — 40 км. Модель опирается на 11 профилей, отстоящих на 60 км друг от друга. Подбор границ и плотностей

отдельных толщ производился до достижения средневадра-тического расхождения между наблюдаемыми и рассчитанными аномалиями в 2,5–3 мГал.

Магнитная 3D модель включает 3 профиля длиной по 385 км и глубиной 20 км. Профили пересекают зону минимума аномального магнитного поля, простирающуюся вдоль восточного борта Северо-Баренцевской впадины и Адмиралтейского поднятия. В основе строения осадочной части разреза магнитной модели, так же как и в случае плотностной модели, лежат сейсмические данные. Для моделирования структуры осадочного чехла были выбраны сейсмические несогласия: Π_2 , Ia, A, Б, В, Гн (рис. 3).

На всех трех пересечениях аномалия подобрана блоком пород пониженной намагниченности в кристаллическом фундаменте, поверхность которого под аномалией находится на глубине 12–14 км. Асимметрия аномалии объясняется наклоном границ блока с аномально низкой намагниченностью по направлению на восток. При этом угол наклона составляет порядка 10–15°. К западу от аномальной зоны расчетная эффективная намагниченность фундамента составляет 1,9 А/м, что характерно для многих кристаллических пород среднего и основного составов. К востоку (в самой зоне намагниченность фундамента составляет 1,2 А/м) намагниченность образований фундамента резко возрастает до 3,6 А/м. Такие значения характерны для базальтов и долеритов, а также для многих метаморфических пород основного и ультраосновного составов.

Результаты моделирования показывают, что, отмечаемая отрицательной магнитной аномалией крупней-

шая шовная зона, соответствует фронту палеонадвиг и прослеживается на стыке Северо-Баренцевского мезозойского и Северо-Карского палеозойского осадочных бассейнов. Региональными геофизическими работами она прослеживается на многие сотни километров вдоль западного склона Адмиралтейского поднятия, переходя к северу от Новой Земли в ступень Теттетгофа. Характер отмеченной магнитной аномалией зоны палеонадвиг изучен нами на ряде пересекающих эту зону сейсмических профилей. На рис. 4 приведен временной разрез по профилю 200707.

В качестве одной из объективных характеристик разреза в помощь сейсмическим материалам нами был выполнен анализ источников магнитных аномалий. Первоначально оценка глубины залегания источников выполнялась в двумерной постановке вдоль профилей съемки, отстоящих друг от друга на 1 км. Расчеты проводились с использованием деконволюции Вернера при помощи программы Oasis Montaj. Затем кромки путем проецирования сносились на сейсмические разрезы в полосе 10 км (по 5 км в каждую сторону от профиля). При этом глубина залегания магнитных источников пересчитывалась согласно скоростным законам, полученным по результатам работ на изучаемой площади.

В Предновоземельской области источники магнитных аномалий располагаются преимущественно в фундаменте или в нижних горизонтах осадочной толщи (рис. 4). Западнее, в основной области Северо-Баренцевской впадины, источники магнитных аномалий заключены главным образом в пермо-триасовой толще А–Б. Синей пунктирной линией на разрезе показана

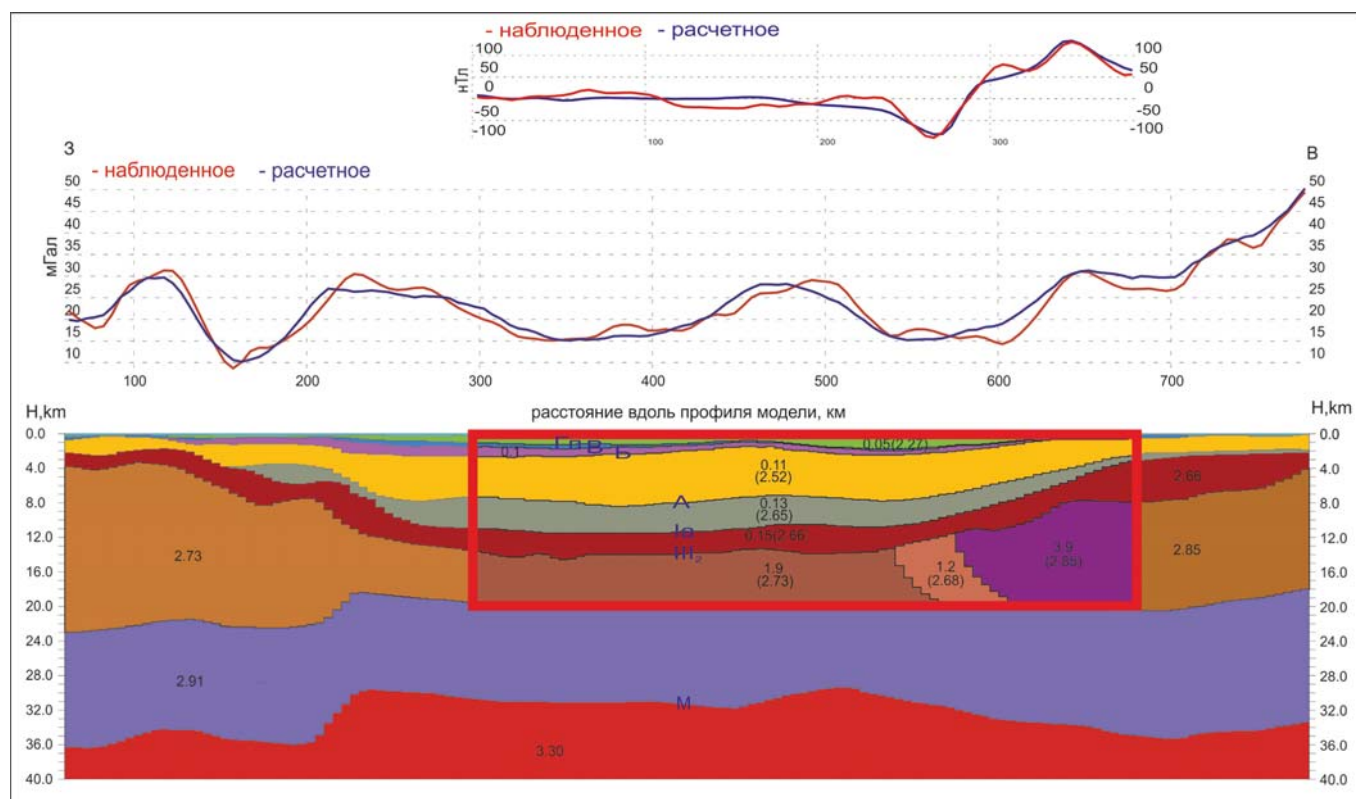


Рис. 3. Разрез через 3D плотностную и магнитную модели Северо-Баренцевской впадины. Цифры на разрезе соответствуют плотности толщ в г/см³ и в пределах магнитной модели (красный прямоугольник) — намагниченности в А/м

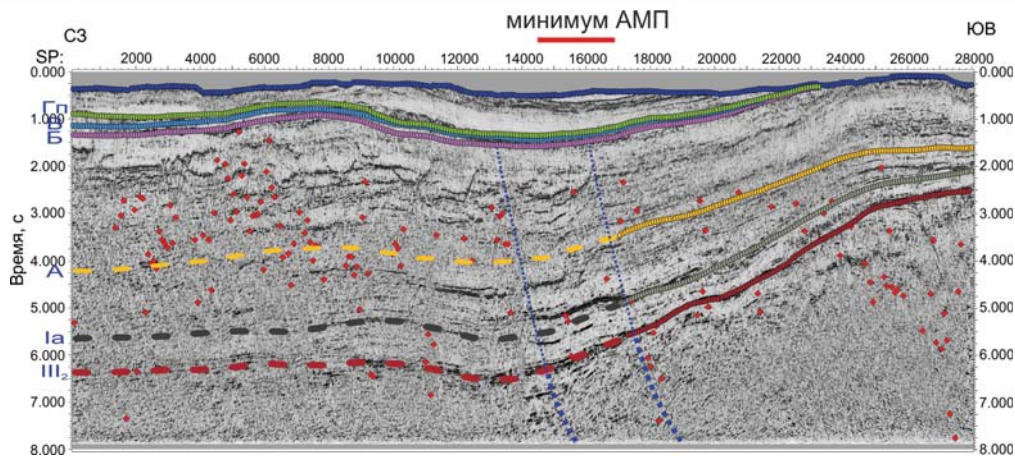


Рис. 4. Фрагмент временного разреза МОВ ОГТ по профилю 200707. Красными точками показано положение источников магнитных аномалий

зона пониженной намагниченности фундамента, вынесенная на разрез из модели (рис. 3). Тонким пунктиром положение границ этой зоны экстраполировано выше в осадочный чехол до горизонта Б.

Таким образом, главным выводом изучения магнитных аномалий и их источников становится вывод о кардинальном различии разрезов земной коры в Северо-Баренцевской впадине и на Адмиралтейском поднятии. Шовная зона в фундаменте, разделяющая эти две структуры, имеет пологое наклонение в восточном направлении. Мы видим несколько отличительных признаков, отмечающих особое тектоническое значение зоны, пространственно совпадающей с минимумом магнитного поля. Источники магнитных аномалий, за небольшим исключением, в этой зоне отсутствуют. Резко изменяется характер сейсмической записи, соответствующей несогласиям III_2 , Ia и A. К востоку от зоны (в пределах Предновоземельской области) несогласия проявляются четко, западнее — весьма неуверенно. Полностью выдержанным характер несогласий становится для горизонтов Б, В и Гп, т.е. для покровного осадочного комплекса, накапливающегося с поздне триасового времени. В западной части разреза осложнения записи, соответствующие, скорее всего, силлам и покровам, расположены в толще А—Б. В восточной части осложнения записи, отдельные рельефно выделяющиеся горизонты и «яркие пятна» распределены по всему разрезу.

Все перечисленные признаки позволяют рассматривать описываемую область как зону палеонадвиг, развивавшегося в триасовое время. Существование такого гигантского надвига предполагалось ранее в работе Н.А. Богданова с соавторами [1]. Вдоль него Новая Земля и Предновоземельская область оказались надвинуты на образовавшуюся к тому времени Северо-Баренцевскую впадину.

Шовная зона на восточном борту Северо-Баренцевской впадины представляет особый интерес для детальных исследований нефтегазоносности. Учитывая ее высокую раздробленность, в том числе разломами, глубоко проникающими в осадочный чехол и в фундамент, можно предполагать, что она создает хорошие возможности для миграции флюидов различного происхождения, в том числе нефти и газа из нефтематеринских

толщ палеозойского интервала разреза в вышележащие коллекторские толщи. Главный вопрос, подлежащий решению при дальнейших исследованиях, — типы возможных ловушек УВ и надежность изолирующих толщ. С учетом высокой раздробленности зоны в строении ловушек важную роль играют разломы. Хотя разломы могут нарушать сплошность покровов, часть из них, по-видимому, служила путями миграции нефти и газа из на-

рушенных относительно глубоко залегающих ловушек в более надежные вышележащие. Вероятным типом ловушек могут служить и рифовые массивы. Выявление наиболее перспективных ловушек — главная задача будущих исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов Н.А., Хаин В.Е., Шипилов Э.В. Раннемезозойская геодинамика Баренцево-Карского региона // ДАН. — 1997. — Т. 357. — № 4. — С. 511–515.
2. Верба М.Л., Павленкин А.Д., Тулина Ю.В. Глубинная геологическая структура шельфа Баренцева моря / Неоднородности глубинного строения земной коры океанов. — Л.: ПГО «Севморгеология», 1986. — С. 75–88.
3. Геологическое строение Баренцево-Карского шельфа. — Л.: ПГО «Севморгеология», 1985. — 115 с.
4. Коротаев М.В., Никишин А.М., Шипилов Э.В. и др. История геологического развития Восточно-Баренцевского региона в палеозое по данным компьютерного моделирования // ДАН. — 1998. — Т. 359. — № 5. — С. 654–658.
5. Маловицкий Я.П., Мартиросян В.Н., Федоровский Ю.Ф. Геолого-геофизическая изученность и нефтегазоносность дна Баренцева и Печорского морей // Разведка и охрана недр. — 1998. — № 4–5. — С. 8–12.
6. Погребницкий Ю.Е. и др. Арктический нефтегазоносный супербассейн. Нефтегазоносность Мирового океана. — Л.: ПГО «Севморгеология», 1984. — С. 7–21.
7. Сурков В.С., Смирнов Л.В., Гурари Ф.Г. Динамика накопления мезозойско-кайнозойского осадочного слоя Западно-Сибирского бассейна // Геология и геофизика. — 1997. — Т. 38. — № 5. — С. 919–926.
8. Шипилов Э.В. Позднемезозойский магматизм и кайнозойские тектонические деформации Баренцево-морской континентальной окраины: влияние на распределение углеводородного потенциала // Геотектоника. — 2015. — № 1. — С. 60–85.
9. Mann P. and L. Gahagan. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields // M.T. Halbouty (ed). Oil and Gas Giants of the Decade 1990–1999. AAPG Memoir 78, 2003, p. 15–105.
10. Piskarev A.L., Shkatov M.Yu. Energy Potential of the Russian Arctic Seas: Choice of the Development Strategy. Developments in Petroleum Science, V. 58. Elsevier, Amsterdam.

© Коллектив авторов, 2016

Пискарёв Алексей Лазаревич // apiskarev@googlemail.com
 Казанин Геннадий Семенович // kazaning@mage.ru
 Киреев Артём Анатольевич // loombravo@gmail.com
 Мищенко Оксана Николаевна // yami_13@mail.ru
 Павлов Сергей Петрович // sergeyp@mage.ru
 Поселов Виктор Антонович // vap@vniio.nw.ru
 Савин Василий Анатольевич // savinvasily@rambler.ru
 Смирнов Олег Евгеньевич // smirnov.olegevg@gmail.com
 Супруненко Олег Иванович // onaimo@centurion.vniio.nw.ru
 Черных Андрей Алексеевич // andy@vniio.nw.ru
 Шлыкова Валентина Владимировна // valyash@mage.ru