

УДК 550.83

DOI 10.31087/0016-7894-2020-2-107-120

Геологическая и экономическая эффективность применения гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геолого-разведочных работ

© 2020 г. | К.С. Черников, С.В. Горбачев, Д.Ю. Голованов, Л.Н. Клещина, А.В. Мазекина, Г.В. Ульянов, О.М. Мятчин

ООО «РН-Шельф-Арктика», Москва, Россия; kschernikov@rnsha.rosneft.ru; svgorbachev@rnsha.rosneft.ru; dyugolovanov@rnsha.rosneft.ru; lnkleschina@rnsha.rosneft.ru; gvulyanov@rnsha.rosneft.ru; ommyatchin@rnsha.rosneft.ru; avmazekina@rnsha.rosneft.ru

Поступила 26.11.2019 г.

Доработана 10.12.2019 г.

Принята к печати 20.01.2020 г.

Ключевые слова: *гравиразведка; магниторазведка; сейсморазведка; комплексная интерпретация; фундамент; осадочный чехол; антиклинальные структуры; дайки; геологическая и экономическая эффективность.*

Аннотация: В статье приведены результаты геологической интерпретации грави- и магнитометрических данных в комплексе с материалами сейсморазведки, полученными по нескольким участкам шельфа морей: Лаптевых, Баренцева и Печорского, на разных стадиях геолого-разведочных работ: региональной и поисковой совместно с сейсморазведкой 2D и 3D. В рамках этих работ по материалам грави- и магниторазведки уточнена информация о физических свойствах изучаемой среды и успешно решены поставленные геологические задачи. Представленные примеры подтверждают геологическую и экономическую целесообразность комплексирования разных геофизических методов для изучения геологического строения и уменьшения геологических неопределенностей при поисках месторождений нефти и газа, особенно в условиях сложного геологического строения изучаемых регионов.

Для цитирования: Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю., Клещина Л.Н., Мазекина А.В., Ульянов Г.В., Мятчин О.М. Геологическая и экономическая эффективность применения гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геолого-разведочных работ // Геология нефти и газа. – 2020. – № 2. – С. 107–120. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-2-107-120.

Geological and economic efficiency of the use of gravity and magnetic exploration at different stages of geological exploration

© 2020 | K.S. Chernikov, S.V. Gorbachev, D.Yu. Golovanov, L.N. Kleschina, A.V. Mazekina, G.V. Ulyanov, O.M. Myatchin

RN-Shelf-Arctic, Moscow, Russia; kschernikov@rnsha.rosneft.ru; svgorbachev@rnsha.rosneft.ru; dyugolovanov@rnsha.rosneft.ru; lnkleschina@rnsha.rosneft.ru; gvulyanov@rnsha.rosneft.ru; ommyatchin@rnsha.rosneft.ru; avmazekina@rnsha.rosneft.ru

Received 26.11.2019

Revised 10.12.2019

Accepted for publication 20.01.2020

Key words: *gravimetry; magnetometry; seismic exploration; integrated interpretation; basement; sedimentary cover; anticlinal structures; dikes; geological and economic efficiency.*

Abstract: The paper presents the results of geological interpretation of gravi- and magnetometry data in conjunction with seismic materials acquired in several areas of the Laptev Sea, Barents Sea and Pechora Sea shelves in different exploration stages: regional and prospecting together with 2D and 3D seismics. Regional airborne gravity and magnetic surveys in the Laptev Sea resulted in updating geological structure of the Anabar-Khatanga Saddle sedimentary cover, namely: outlines of anticline structures, occurrence of salt diapirism and tectonic deformations. Subsequently, this information was helpful in planning 2D seismic surveys. The geologists of the project qualified the marine gravi- and magnetometry data obtained in the Pechora Sea together with 2D seismic survey as “road maps”. Potential fields and their continuations were actively used during the course of structural interpretation to trace faults, main structure-forming thrusts, oblique thrusts and build a structural and tectonic model of the Vashutkino-Talotinsky fold and thrust zone. In the stage of 3D seismic survey in the Barents Sea, the accompanying gravi- and magnetometry allowed obtaining additional information on geological structure of sedimentary cover and basement of the Admiralteyskiy Swell. In particular, numerous plutonic formations are found in sedimentary cover. Magnetometry in conjunction with geotechnical surveys allowed revealing dikes and sills, which were accounted for in preparing the hazard map for the designed site of well construction. Relative costs of the works and mitigation of geological uncertainty were estimated for all the presented projects. They confirm geological practicability and economic feasibility of seismic, gravity, and magnetic surveys within the framework of exploration and prospecting for oil and gas, particularly in the case of complicated geological architecture of the regions under investigations.

For citation: Chernikov K.S., Gorbachev S.V., Golovanov D.Yu., Kleschina L.N., Mazekina A.V., Ulyanov G.V., Myatchin O.M. Geological and economic efficiency of the use of gravity and magnetic exploration at different stages of geological exploration. *Geologiya nefi i gaza*. 2020;(2):107–120. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-2-107-120. In Russ.

Введение

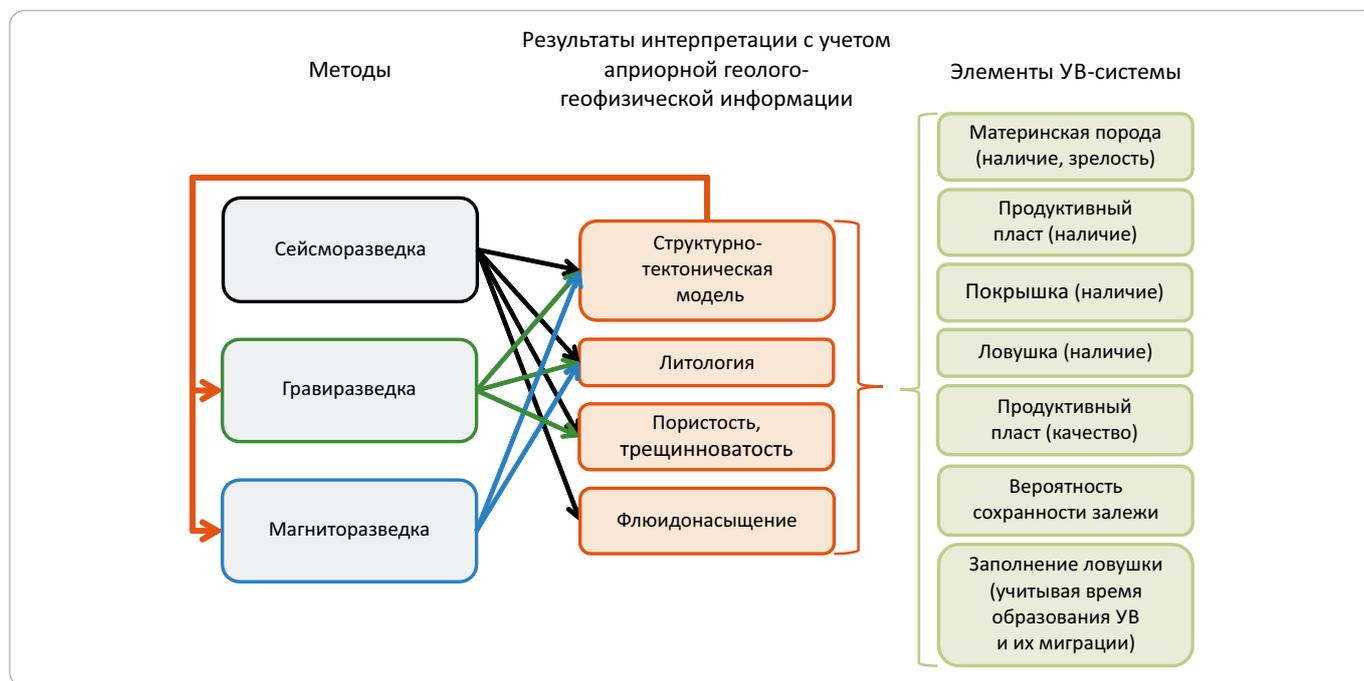
На этапе планирования геолого-геофизических работ на нефть и газ как для регионального изучения, так и в пределах лицензионных участков нередко

возникает вопрос о целесообразности применения несейсмических методов геофизики, таких как грави- и магниторазведка, в комплексе с сейсморазведкой. Очевидно, что в слабоизученных регионах при-



GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 1. Взаимосвязь методов, свойств среды и целей комплексной интерпретации
 Fig. 1. Interrelation of methods, medium properties, and objectives of integrated interpretation



менение несейсмических методов на региональной стадии целесообразно и эффективно, а использование их на следующих этапах часто вызывает вопросы. При этом, как известно, ни один из перечисленных методов не является прямым методом поиска УВ. С помощью сейсморазведочных работ получают информацию о скоростях распространения упругих волн в осадочном чехле и морфологии отражающих горизонтов, гравиразведки — о плотностных неоднородностях и структуре осадочного чехла и фундамента, магниторазведки — о свойствах и структуре магнитоактивных объектов в осадочном чехле и фундаменте. С помощью каждого из этих методов можно выявлять определенные физические свойства горных пород. При этом очевидно, что более подробная информация о свойствах изучаемой среды позволит сделать более корректные выводы о структурно-тектонической модели участка, литологическом составе пород и их коллекторских свойствах (рис. 1).

Важным этапом для оценки эффективности и целесообразности применения грави- или магниторазведки в комплексе с сейсморазведкой является этап планирования и проектирования геолого-разведочных работ, который включает следующие подэтапы:

- определение перечня задач/неопределенностей, которые необходимо решить;
- сбор и обобщение геолого-геофизических данных разных методов по району работ;
- анализ собранной информации, по результатам которого принимается предварительное решение о необходимости выполнения грави- и магниторазведки;

– геолого-геофизическое моделирование гравитационного и магнитного эффектов от объектов поиска, в результате которого появляется возможность решения поставленных геологических задач, определяется необходимая плотность и объемы исследований;

– проектирование работ: определение методики и технологии, сроков и стоимости;

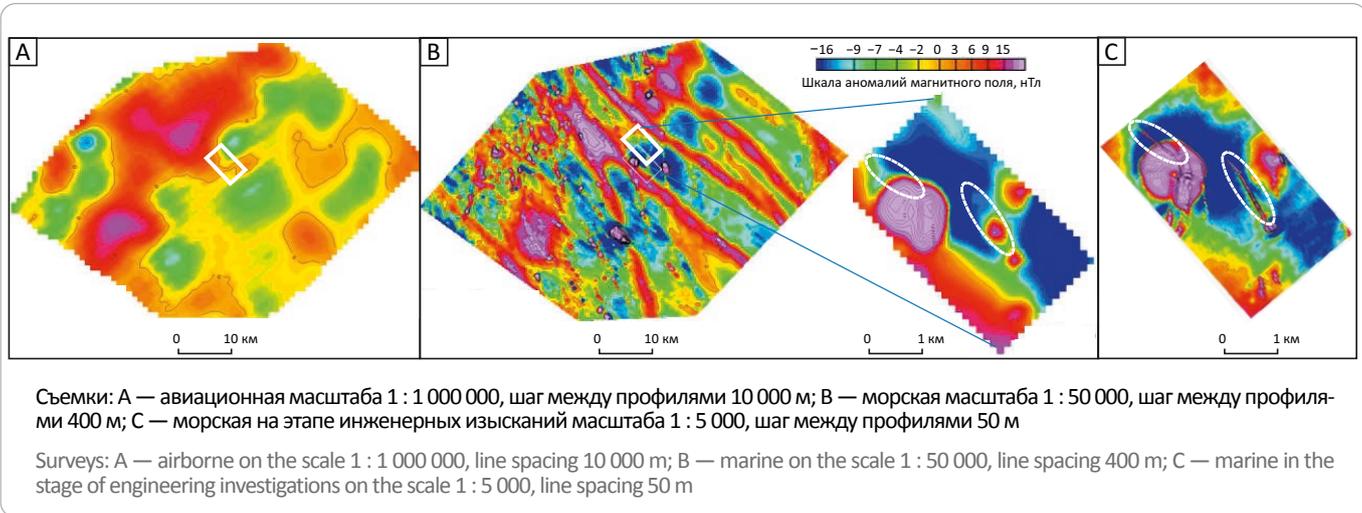
– сравнительный анализ целесообразности и эффективности планируемых работ с анализом возможностей подрядчиков.

Как показывает накопленный опыт, применение грави- и магниторазведки в комплексе с сейсморазведкой для изучения шельфа на всех стадиях геофизических исследований, от региональной до детальной, дополняет информацию о геологическом строении изучаемой площади, что позволяет успешно решать поставленные геологические задачи [1].

Сравнение грави- или магнитометрических съемок разных лет и масштабов показывает значительное, при благоприятных геологических условиях, увеличение информативности данных при укрупнении масштаба исследований (рис. 2). Поэтому при анализе ретроспективных региональных данных на этапе планирования работ не всегда удается предвидеть то, что можно получить от потенциальных методов. Очевидно, что чем более детальными материалами располагаем, тем больше дополнительной геологической информации можно получить из грави- и магнитометрических данных.

В рамках выполнения производственных проектов применение грави- и магнитометрических

Рис. 2. Сравнение высокочастотной составляющей магнитного поля (фильтр Гаусса, 20 км), полученной съемками разных масштабов
Fig. 2. Comparison of high-frequency component of magnetic field (the Gaussian filter, 20 km) obtained in the different-scale surveys



данных в комплексе с материалами сейсморазведки позволило решить следующие геологические задачи:

- прогноз морфологии поверхности и петрофизических свойств фундамента;
- прогноз разрывной тектоники фундамента и осадочного чехла;
- поиск антиклинальных структур осадочного чехла в районах с редкой сетью сейсмических профилей;
- изучение морфологии и физических свойств аномальных объектов в осадочном чехле;
- изучение соляно-купольной тектоники;
- изучение сложнодислоцированных осадочных толщ, надвиговой тектоники;
- уточнение глубинно-скоростной модели;
- изучение верхней части разреза, выявление объектов, представляющих опасность для установки буровой платформы и бурения.

Рассмотрим некоторые результаты интерпретации грави- и магнитометрических данных в комплексе с материалами сейсморазведки на разных этапах изучения геологического строения участков: региональном, поисковом (сейсморазведка 2D) и детальном (сейсморазведка 3D), полученные в арктических морях Лаптевых, Печорское и Баренцево.

Море Лаптевых. Анабаро-Хатангская седловина

Тектонический план района работ определяется сочленением в его пределах двух крупных структур: северной части Сибирской древней (эпикарельской) платформы — Анабаро-Хатангской седловины и западного фланга Хатангско-Лаптевоморской молодой (эпипозднекиммерийской) платформы (на верхоянском основании). Анабаро-Хатангская седловина представляет собой положительную структуру, разделяющую Лено-Анабарский и Енисей-Хатангский

прогибы Сибирской платформы, выполненные мощными толщами мезозойских отложений.

В строении северной окраины Сибирской платформы участвуют образования двух структурных этажей. Нижний этаж сложен архей-нижнепротерозойскими метаморфическими комплексами кристаллического фундамента. Верхний этаж образован терригенно-карбонатными породами осадочного чехла, представленными рифей-вендскими, палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими образованиями [2, 3].

Основная часть участка работ находится на территории Хатангского залива, переходящего в северо-восточном направлении в море Лаптевых. На начало 2016 г. район работ в геолого-геофизическом отношении был слабоизучен. Установить контуры перспективных структур по редкой сети ретроспективных сейсмических профилей не представлялось возможным. Площадные гравиметрические съемки в акватории Хатангского залива не выполнялись. На большей части площади в начале 1960-х гг. проведена аэромагнитная съемка масштаба 1 : 200 000. В 2010–2014 гг. выполнялись комплексные геофизические работы (сейсмо-, грави-, магниторазведка) по нескольким региональным профилям.

На этапе планирования был выполнен комплексный анализ геолого-геофизических данных и сейсмоплотностное и сейсмомангнитное моделирование, что позволило сделать следующие выводы.

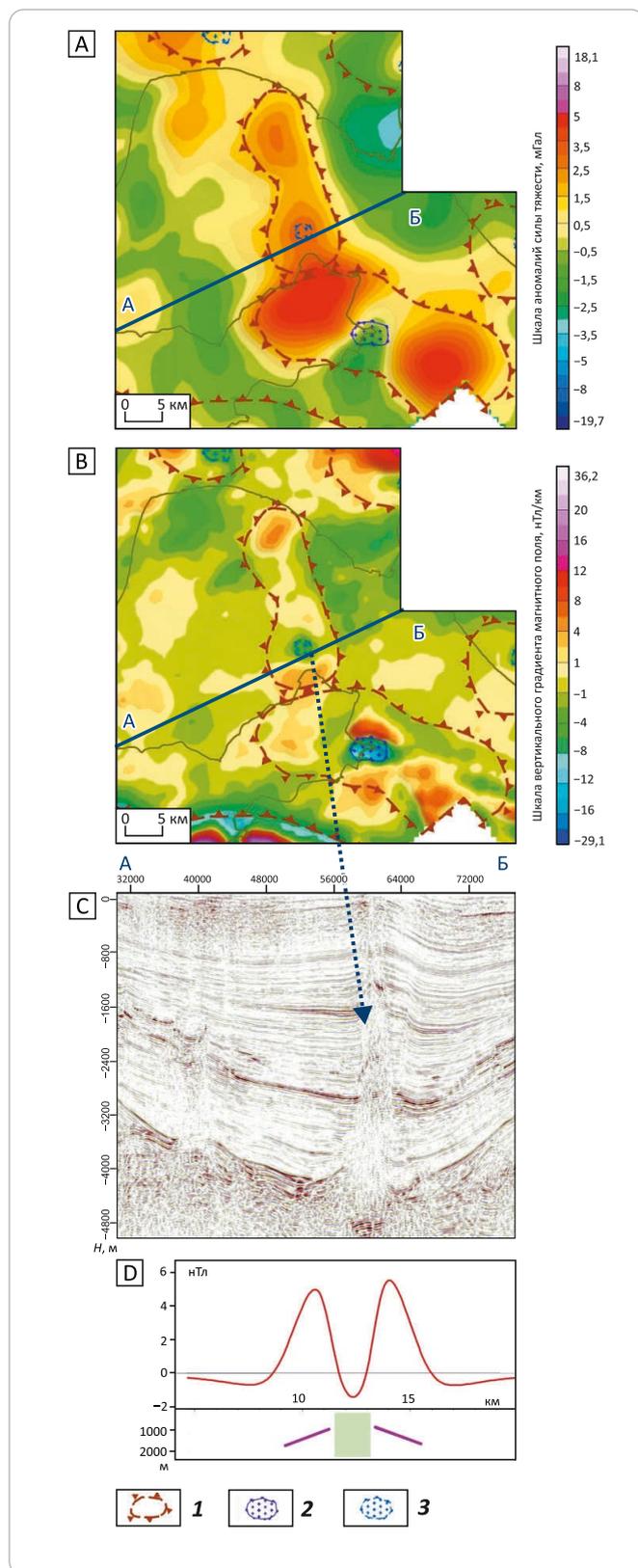
1. Антиклинальные структуры осадочного чехла проявляются в гравитационном и магнитном полях.
2. В условиях сложного рельефа местности и ограничений по времени рекомендуется выполнение грави- и магниторазведки в аэроварианте.
3. Выполнение аэрогеофизических работ с шагом между рядовыми профилями 2 км позволит уверенно закартировать антиклинальные структуры шириной



GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 3. Картирование антиклинальных структур и соляных диапиров в осадочном чехле по данным грави- и магниторазведки в Хатангской седловине

Fig. 3. Mapping of anticline structures and salt diapirs within sedimentary cover in accordance with gravimetry and magnetometry data from the Khatanga Saddle



Усл. обозначения к рис. 3

Legend for Fig. 3

A — локальная составляющая гравитационного поля; B — вертикальный градиент магнитного поля; C — сейсмический разрез по профилю А-Б, отработанному после интерпретации данных грави- и магниторазведки; D — модель магнитного поля от соляного диапира, прорывающего магнитный слой.

1 — антиклинальные поднятия; **соляные диапиры (2, 3): 2** — установленные, **3** — предполагаемые

A — local component of gravity field; B — vertical gradient of magnetic field; C — seismic section along A-B line, the data acquired following gravity and magnetic data interpretation; D — model of magnetic field of salt diapir breaking through magnetic layer.

1 — anticline highs; **salt diapirs (2, 3): 2** — known, **3** — assumed

5 км и более, создающие гравитационные аномалии с амплитудой более 2 мГал, учитывая погрешность аэрогравиметрической съемки.

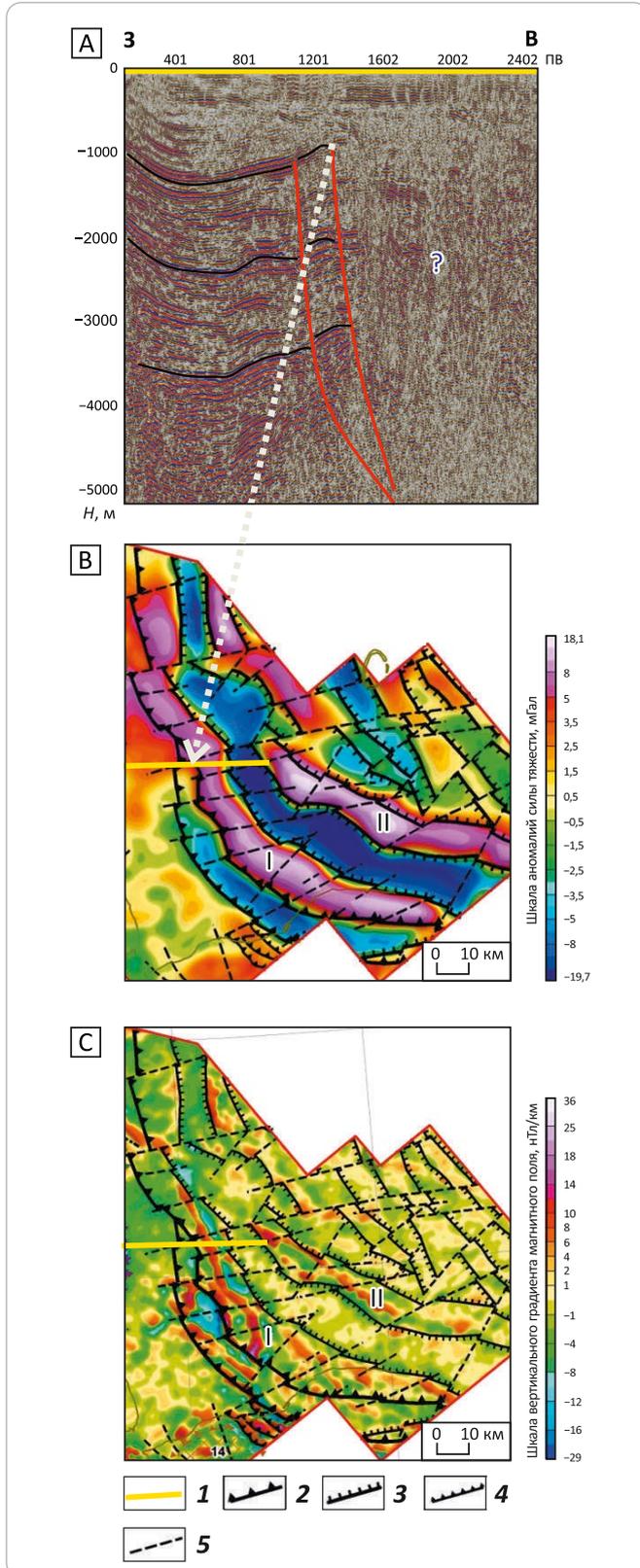
В 2016 г. в рамках программы поисково-оценочных работ была выполнена комплексная аэрогравиметрическая и аэромагнитометрическая съемка масштаба 1 : 200 000. Одной из основных задач этих работ являлось картирование структурных элементов осадочного чехла для последующего проектирования сети сейсморазведочных профилей.

В процессе интерпретации данных удалось смоделировать поверхность и петрофизические свойства (плотность и намагниченность) верхней части магнитного фундамента [4]. Остаточные аномалии гравитационного и магнитного полей после учета влияния фундамента, связанные с источниками в осадочном чехле, позволили закартировать антиклинальные структуры, элементы соляно-купольной тектоники и сеть тектонических нарушений. Причем практически все антиклинальные структуры, выделенные ретроспективными сейсморазведочными профилями, совпали с положительными аномалиями гравитационного поля. Исключение составила одна структура, проявившаяся отрицательной гравитационной аномалией, что, вероятно, связано с наличием солей с отрицательной избыточной плотностью, компенсирующих гравитационный эффект от структуры. Вновь выделенные гравиразведкой структуры впоследствии были подтверждены и уточнены сейсморазведкой.

В качестве интересного факта можно отметить прогноз элементов соляно-купольной тектоники по данным магниторазведки. Поскольку в районе работ широко распространены пластовые интрузии триасовых габбродолеритов, которые в первом приближении можно аппроксимировать магнитным слоем, прорывающие его соляные диапиры создают в магнитном поле локальные отрицательные аномалии. В гравитационном поле соляные диапиры проявляются слабо в связи с их приуроченностью к антиклинальным структурам. В результате можно оценить суммарный гравитационный эффект структуры и внедрившихся солей (рис. 3).

Рис. 4. Проявление сложнодислоцированной зоны сочленения Сибирской и Лаптевоморской платформ в сейсмических, грави- и магнитометрических данных

Fig. 4. Evidence of structurally complicated faulted and folded junction zone of the Siberian and Laptev Sea platforms in seismic, gravity, and magnetic data



Усл. обозначения к рис. 4

Legend fo Fig. 4

A — сейсмический разрез по ретроспективному профилю, B — локальная составляющая гравитационного поля, C — вертикальный градиент магнитного поля.

1 — линия сейсмического разреза; 2 — региональный разлом сбросового типа (Бегичевский разлом); второстепенные сейсмические нарушения (3–5): 3 — сбросы, 4 — взбросы, 5 — сбрососдвиги.

I, II — горсты.

A — seismic section along the legacy line, B — local component of gravity field, C — vertical gradient of magnetic field.

1 — seismic line; 2 — regional normal-type fault (Begichevsky fault); secondary seismic disturbances (3–5): 3 — normal faults, 4 — reverse faults, 5 — transtensional faults.

I, II — horsts.

С помощью грави- и магнитометрических данных получена дополнительная информация о геологическом строении сложнодислоцированной зоны сочленения Сибирской и Лаптевоморской платформ, где ретроспективные сейсмические материалы малоинформативны. В гравитационном и магнитном полях здесь наблюдаются интенсивные линейные аномалии, которые можно связать с приподнятыми и опущенными блоками (рис. 4).

В результате использования данных грави- и магниторазведки получена следующая дополнительная информация о геологическом строении:

- тектонические нарушения в фундаменте и осадочном чехле;
- прогнозируемые контуры антиклинальных структур и проявлений соляного диапиризма в осадочном чехле;
- прогнозируемое геологическое строение сложнодислоцированной зоны.

Эта информация позволила выполнить проектирование сети сейсморазведочных профилей в пределах прогнозируемых структур, а также оценить и ранжировать возможные структуры для дальнейшей разведки.

Оценка экономической эффективности проведения комплекса работ (полевые работы, обработка, интерпретация) показывает, что затраты на аэрогравиразведку и аэромагниторазведку составили менее 3 % общих затрат на геолого-разведочные работы. Для сравнения, если бы вместо потенциальных методов выполнялась сейсморазведка по сети 10 × 10 км, то общая стоимость работ увеличилась бы на 40 % (рис. 5). При этом, как было описано выше, были сняты геологические неопределенности и скорректирована программа геолого-разведочных работ по всему участку.

Печорское море. Вашуткино-Талотинская складчато-надвиговая зона

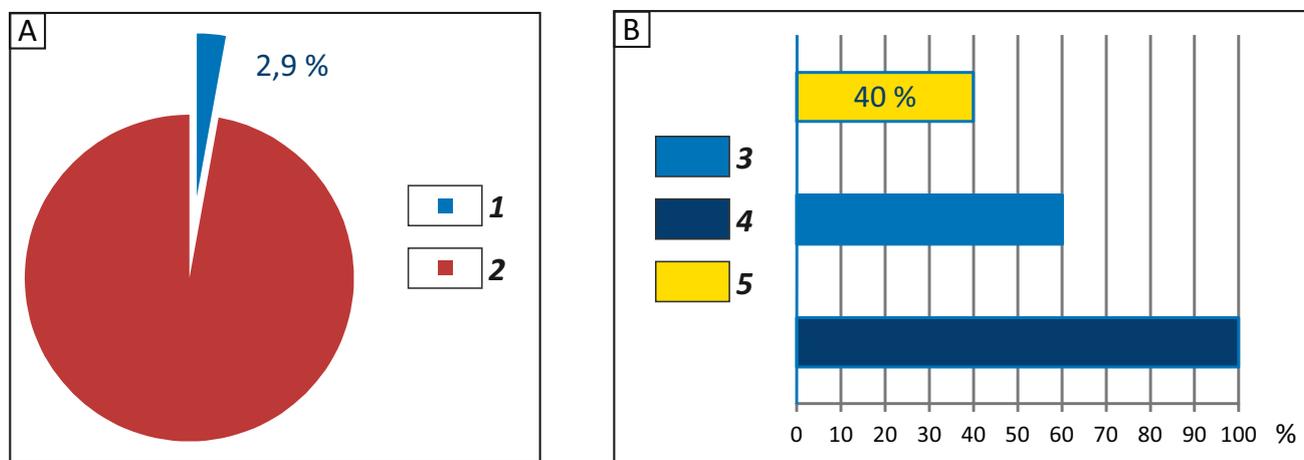
Вашуткино-Талотинская складчато-надвиговая зона входит в состав Предуральяского краевого



GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 5. Оценка относительной стоимости геофизических методов в комплексе и двух альтернативных вариантов геолого-разведочных работ

Fig. 5. Estimation of relative costs of geophysical methods in a package and two alternative options of exploration works



А — стоимость методов в комплексе (полевые работы, обработка, интерпретация), В — сравнение стоимости двух вариантов геолого-разведочных работ (полевые работы, обработка, интерпретация).

Стоимость методов (1, 2): 1 — аэрогравитационной и аэромагнитной разведки, 2 — сейсмической 2D; **стоимость вариантов геолого-разведочных работ (3–5):** 3 — комплекса: аэрогравитационной и магнитной разведки + сейсмической 2D на структурах, 4 — сейсмической по сети 10 × 10 км на весь участок + сгущение на структурах до 5 × 5 км, 5 — экономичная

A — costs of methods in a package (acquisition, processing, interpretation), B — comparison of costs of two exploration options (acquisition, processing, interpretation).

Methods costs (1, 2): 1 — airborne gravity and magnetic survey, 2 — 2D seismic survey; **costs of exploration options (3–5):** 3 — package: airborne gravimetry and magnetometry + 2D seismics over structures, 4 — 2D seismics, grid 10 × 10 km over the whole area + refining up to 5 × 5 km over structures, 5 — savings

прогиба и характеризуется протяженной системой взбросо-надвиговых деформаций преимущественно северо-западного простирания, осложненных сдвигами субширотного направления. Амплитуда надвигов составляет 2500–4000 м, а углы падения плоскостей смесителя достигают 17–40°.

Разрез осадочного чехла представлен палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими отложениями. В его строении принимают участие три структурных этажа, резко различающихся составом слагающих формаций и историей геотектонического развития: нижний (ордовик-среднедевонский карбонатно-терригенный), средний (верхнедевон-нижекарбонатноугольный терригенно-карбонатный, нижекарбонатноугольно-нижепермский карбонатный и ниже-верхнепермско-триасовый терригенный) и верхний (юрско-кайнозойский терригенный) [5].

В 2014 г. в восточной части Печорского моря выполнены комплексные морские геофизические работы 2D по сети 2 × 3 км: сейсмо-, гравитационной и магнитной разведка с продольным градиентометром [6].

Если сосредоточиться только на изучении геологического строения осадочного чехла, то при крутых углах падения отражающих горизонтов возникают сложности определения их конфигурации. Сложное строение складчато-надвиговой зоны уточнено по показателям гравитационного и магнитного полей, которые геологи проекта назвали «дорожными кар-

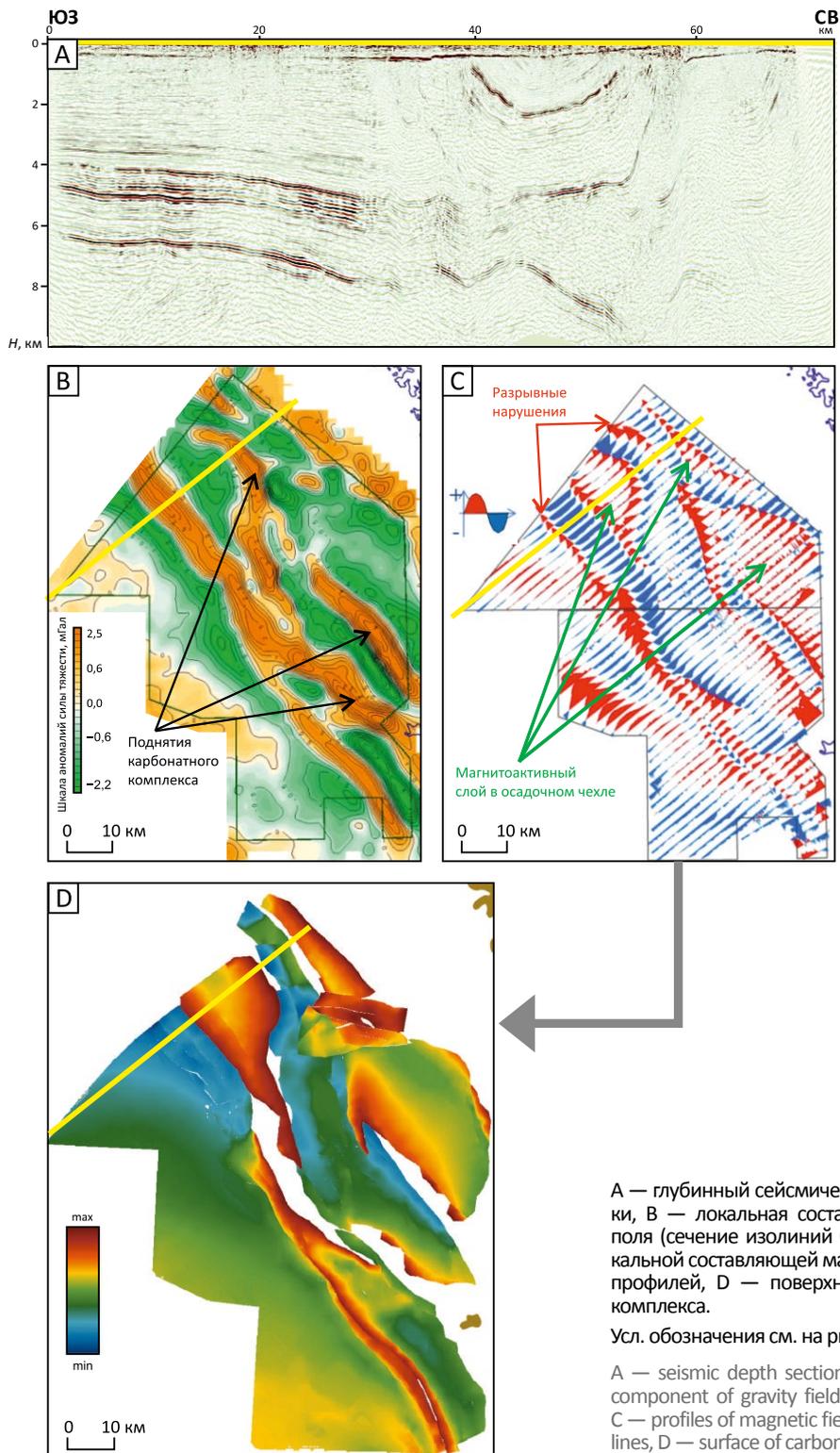
тами». Потенциальные поля и их трансформации активно использовались в процессе структурной интерпретации для выделения разрывных нарушений, основных структурообразующих надвигов, взбросо-надвигов и создания структурно-тектонической модели исследуемой площади (рис. 6).

В результате качественной и количественной интерпретации гравитационных и магнитометрических данных [7] в комплексе с данными сейсмической разведки установлена связь локальных положительных аномалий гравитационного поля с поднятиями карбонатного комплекса. Сейсмогравитационное моделирование позволило изучить пространственную морфологию карбонатной толщи и выявить зоны разуплотнения карбонатных пород в своде перспективной структуры. С помощью сейсмомагнитного моделирования установлено наличие магнитоактивного слоя в перм-триасовых отложениях, предположительно вулканогенно-осадочных пород, что позволило изучить его пространственную морфологию. Сейсмомагнитное моделирование высокоамплитудной сейсмической аномалии вблизи эрозионной поверхности предсреднеюрского несогласия (А–В) подтвердило предположение о ее связи с эффузивным магматическим комплексом (рис. 7).

Важно отметить, что первоначальная сейсмогравитационная модель строилась путем пересчета глубинно-скоростной модели по зависимостям ско-

Рис. 6. Комплексная интерпретация сейсмических, грави- и магнитометрических данных в Вашуткино-Талотинской складчато-надвиговой зоне

Fig. 6. Integrated interpretation of seismic, gravity, and magnetic data in the Vashutkino-Talotinsky fold and thrust zone



A — глубинный сейсмический разрез после обработки, B — локальная составляющая гравитационного поля (сечение изолиний 0,5 мГал), C — графики локальной составляющей магнитного поля вдоль линий профилей, D — поверхность кровли карбонатного комплекса.

Усл. обозначения см. на рис. 4

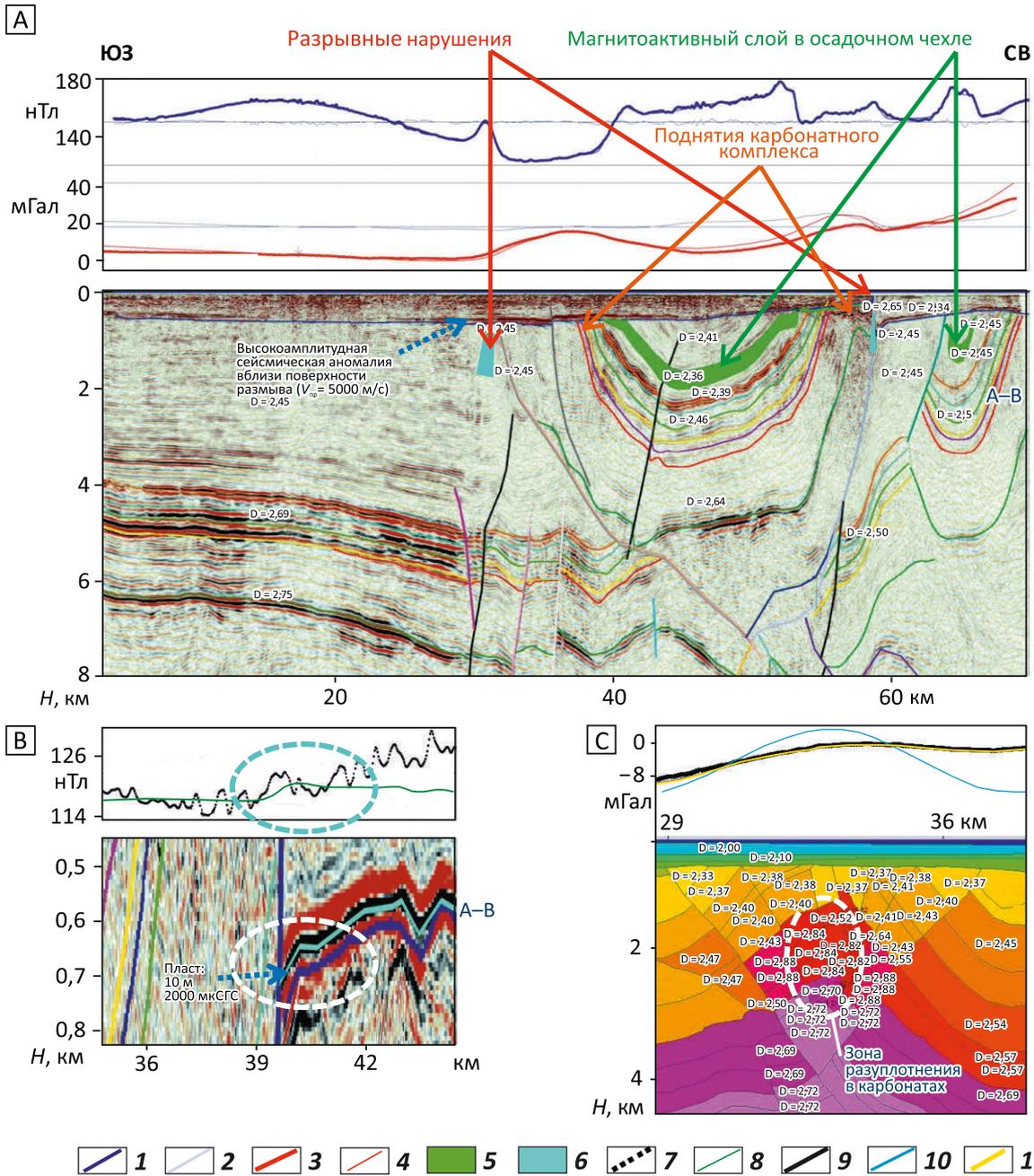
A — seismic depth section after processing, B — local component of gravity field (contour interval 0.5 mGal), C — profiles of magnetic field local component along the lines, D — surface of carbonate sequence top.

For other Legend see Fig. 4

GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 7. Сейсмоденситное и сейсмоманнитное моделирование вдоль профилей, пересекающих Вашуткино-Талотинскую складчато-надвиговую зону

Fig. 7. Seismic density and seismic magnetic modelling along the lines crossing the Vashutkino-Talotinsky fold and thrust zone



Модели: А — сейсмогравиманнитная вдоль интерпретационного профиля, В — сейсмоманнитная эффузивного магматического слоя, С — сейсмогравитационная разуплотнения в карбонатной толще.

Аномальное магнитное поле (А) (1, 2): 1 — наблюдаемое, 2 — модельное; **аномальное гравитационное поле (3, 4):** 3 — наблюдаемое, 4 — модельное; **объекты с магнитной восприимчивостью, мкСГС (5, 6):** 5 — 450, 6 — 2000; **магнитное поле (В) (7, 8):** 7 — наблюдаемое, 8 — модельное; **гравитационное поле (С) (9–11):** 9 — наблюдаемое, модельное; 10 — модели без латерального изменения плотностей всех слоев, 11 — модели, представленной на рисунке

Models: А — seismic, gravity, and magnetic model along the interpretation line, В — seismic magnetic model of igneous effusive layer, С — seismic gravity model of decompaction in carbonate sequence.

Anomalous magnetic field (A) (1, 2): 1 — observed, 2 — modelled; **anomalous gravity field (3, 4):** 3 — observed, 4 — modelled; **objects having magnetic susceptibility, 10-6 CGS (5, 6):** 5 — 450, 6 — 2000; **magnetic field (B) (7, 8):** 7 — observed, 8 — modelled; **anomalous gravity field (C) (9–11):** 9 — observed, modelled; 10 — models without lateral density changes in all the layers, 11 — of the model shown in the figure

рость – плотность, подобранным по данным скважин на соседнем участке. Причем скорость в карбонатной толще принималась постоянной – 5700 м/с, а в вышележащей терригенной толще – изменчивой как по вертикали, так и по горизонтали. Первоначальная сейсмогравитационная модель плохо удовлетворяла наблюдаемому гравитационному полю. А после подбора латерального распределения плотностных неоднородностей в модели по одному из профилей для минимизации расхождения модельного и наблюдаемого гравитационных полей максимальное расхождение плотностей в карбонатной толще составило 0,1 г/см³, а в одном из блоков вышележащей терригенной толщи, заключенном между двумя надвигами, – 0,13 г/см³. Такое разуплотнение в карбонатах может быть обусловлено повышенной трещиноватостью в деформированных сводах структур. Если обратно пересчитать скорректированную плотностную модель в скоростную, то для карбонатной толщи максимальное изменение скорости составит около 1160 м/с, а для вышележащей терригенной – около 1000 м/с. Такая информация может быть полезной при построении и уточнении глубинно-скоростной модели.

Кроме того, интерпретация высокочастотной составляющей магнитного поля выявила зоны распространения приповерхностных магнитных объектов, которые могут быть связаны с моренными отложениями и представлять опасность для установки буровой платформы и бурения скважин.

Для оценки геологической эффективности грави- и магниторазведки на стадии сейсморазведочных работ 2D вычислено относительное уменьшение геологической неопределенности за счет применения этих методов совместно с сейсморазведкой из расчета вероятности обнаружения УВ в трех перспективных структурах на площади работ. Вероятность обнаружения УВ, или вероятность геологической успешности, рассчитывалась как произведение вероятностей семи факторов: материнская порода (наличие, зрелость), продуктивный пласт (наличие), региональная покрывка (наличие), ловушка (наличие), продуктивный пласт (качество), вероятность сохранности залежи, заполнение ловушки (учитывая время образования УВ и их миграции) для каждой из трех структур. Дополнительная геологическая информация, полученная по данным грави- и магниторазведки, позволила изменить значения трех вероятностей из семи.

1. Ловушка (наличие): с привлечением данных грави- и магниторазведки выделены две перспективные структуры, образованные взбрососдвиговой тектоникой.

2. Региональная покрывка (наличие): региональная юрская покрывка с предполагаемым развитием эффузивного магматического пласта.

3. Продуктивный пласт (качество): разуплотнение в своде структуры по результатам сейсмоплотностного моделирования.

Относительное уменьшение геологической неопределенности за счет применения грави- и магниторазведки в комплексе с сейсморазведкой из расчета вероятности обнаружения УВ составило 18 % (по экспертному мнению геологов проекта).

Экономическая эффективность грави- и магниторазведки на стадии сейсморазведочных работ 2D подтверждается сопоставлением вычисленного относительного уменьшения геологической неопределенности с затратами, произведенными на выполнение полевых работ, обработки и интерпретации, которые составили менее 6 % стоимости комплексных исследований (рис. 8).

Кроме того, выделенные магниторазведкой магматические объекты в верхней части разреза позволяют выявить и оценить риски установки буровой и бурения.

Баренцево море. Адмиралтейский вал

Адмиралтейский вал находится в пределах Предновоземельской складчатой области и представляет собой протяженное поднятие, вытянутое в северо-восточном направлении. Вал приурочен к выступу кристаллического фундамента, который существовал на ранней стадии заложения Предновоземельской складчатой области в докаледонское время.

В строении вала выделяются фундамент и осадочный чехол, представленный палеозойскими и мезозойскими отложениями. Осадочный чехол разделяется на три структурных этажа, резко отличающихся составом слагающих отложений и историей развития: нижний (франский терригенно-карбонатный), средний (верхнедевон-нижнепермский карбонатный и глинисто-карбонатный), верхний (нижнетриас-неоген-четвертичный терригенно-глинистый) [8]. Суммарная мощность отложений осадочного комплекса в сводовой части Адмиралтейского вала составляет 4–6 км, а в погруженных зонах мощность осадочного чехла достигает 7–8 км.

В 2014 г. в пределах Адмиралтейского вала выполнены морские сейсморазведочные работы 3D в комплексе с грави- и магниторазведкой с продольным градиентометром. Ранее с сейсморазведкой 2D грави- и магниторазведка не выполнялась.

В результате анализа данных и объемного сейсмоплотностного и сейсмагнитного моделирования ниже поверхности акустического фундамента установлено наличие крупного магматического очага – магнитного объекта с повышенной избыточной плотностью (рис. 9), выше которого, в осадочном чехле, обнаружены многочисленные интрузивные образования предположительно юрско-мелового возраста [9].

GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 8. Оценка относительной стоимости геофизических методов в комплексе и уменьшения геологической неопределенности за счет применения грави- и магниторазведки совместно с сейсморазведкой 2D

Fig. 8. Estimation of relative costs of geophysical methods in a package and reduction of geological uncertainty due to the use of gravi- and magnetometry in the package with 2D seismics

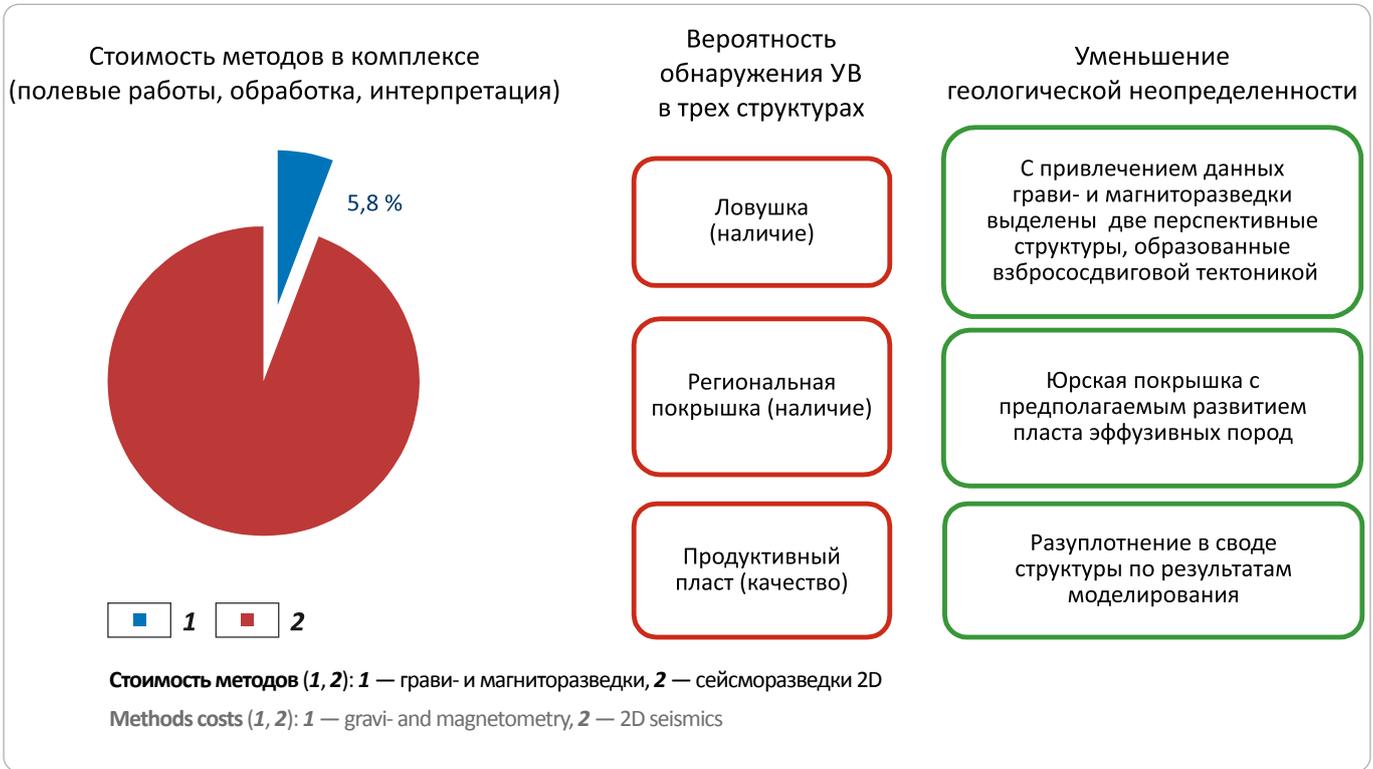


Рис. 9. Выделение глубинного магматического очага по данным магнито- и гравиразведки ниже акустического фундамента

Fig. 9. Identification of the deep-seated magma chamber using magnetic and gravity data below the acoustic basement

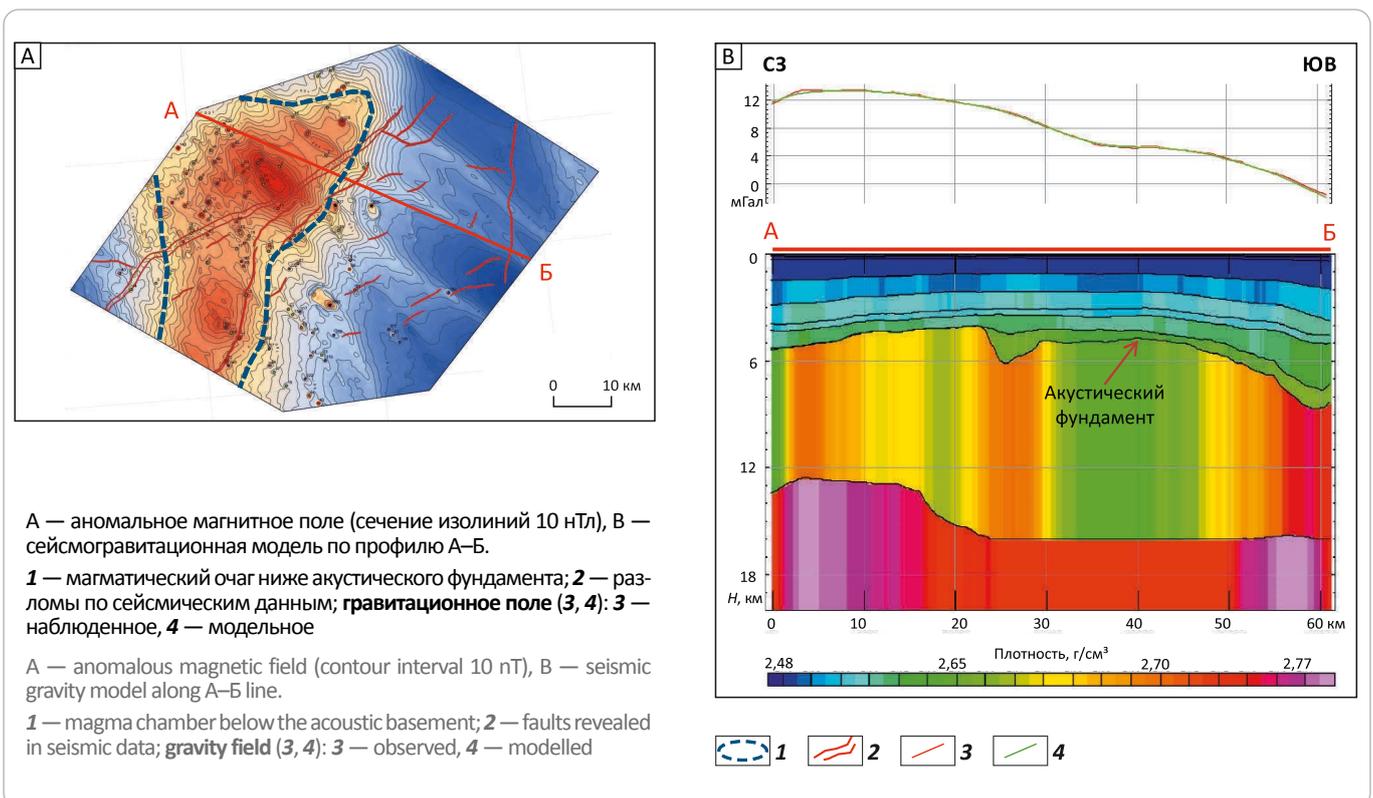
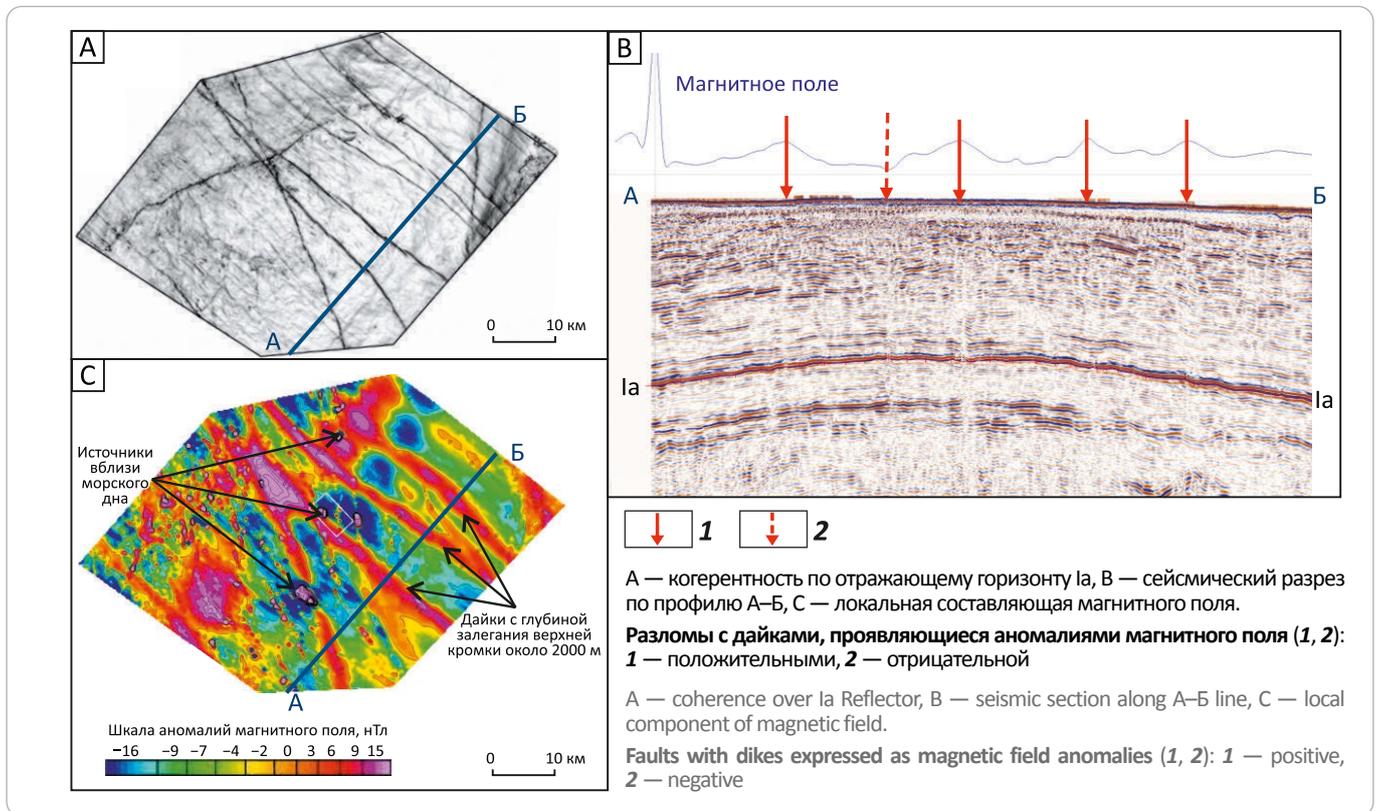


Рис. 10. Выделение магматических интрузивных образований в пределах Адмиралтейского вала
Fig. 10. Identification of igneous intrusive formations within the Admiralteisky Swell



На сейсмических разрезах 3D субвертикальные разрывные нарушения выделяются очень слабо из-за отсутствия смещений осей синфазности, но хорошо проявляются в когерентности по одному из отражающих горизонтов. Магнитометрические данные еще до начала изучения сейсмических материалов позволили обнаружить положительные линейные аномалии разной интенсивности, секущие участок работ. Совместная качественная и количественная интерпретация сейсмических и магнитометрических данных [7] позволила сделать вывод о наличии разрывных нарушений, заполненных интрузивными образованиями (рис. 10). Интересно отметить, что одно из разрывных нарушений по сейсмическим данным совпало с отрицательной аномалией магнитного поля. Вероятно, это связано с разным временем внедрения интрузий.

На этапе инженерных изысканий для оценки площадки, предназначенной для буровой установки, выполнялись специализированные сейсмические и магнитометрические работы. По сейсмическим данным инженерных исследований был выявлен объект, схожий по своим характеристикам с газовой аномалией. Комплексный анализ всех данных позволил установить природу объекта как интрузию (рис. 11).

Для оценки эффективности грави- и магниторазведки на стадии сейсморазведочных работ 3D, по аналогии с предыдущими примерами, было вы-

числено относительное уменьшение геологической неопределенности за счет применения грави- и магниторазведки совместно с сейсморазведкой из расчета вероятности обнаружения УВ в перспективной структуре. Дополнительная геологическая информация позволила изменить значения двух вероятностей из семи:

- сохранности залежи: запечатывание разрывных нарушений интрузиями;
- заполнения ловушки (учитывая время образования УВ и их миграции): ускорение генерации УВ за счет локального прогрева материнских пород глубинным магматическим очагом, ограничение латеральной миграции УВ субвертикальными дайками.

Относительное уменьшение геологической неопределенности за счет применения грави- и магниторазведки в комплексе с сейсморазведкой из расчета вероятности обнаружения УВ составило 14 % (по экспертному мнению геологов проекта).

Экономическая эффективность грави- и магниторазведки на стадии сейсморазведочных работ 3D подтверждается сопоставлением вычисленного относительного уменьшения геологической неопределенности с затратами, произведенными на выполнение полевых работ, обработки и интерпретации, которые составили менее 1 % стоимости комплексных исследований (рис. 12).

GEOPHYSICAL SURVEYS

Рис. 11. Выделение приповерхностных магматических образований в пределах площадки инженерных изысканий по сейсмическим и магнитометрическим данным

Fig. 11. Identification of near-surface plutons within the site of geotechnical survey (using seismic and magnetometry data)

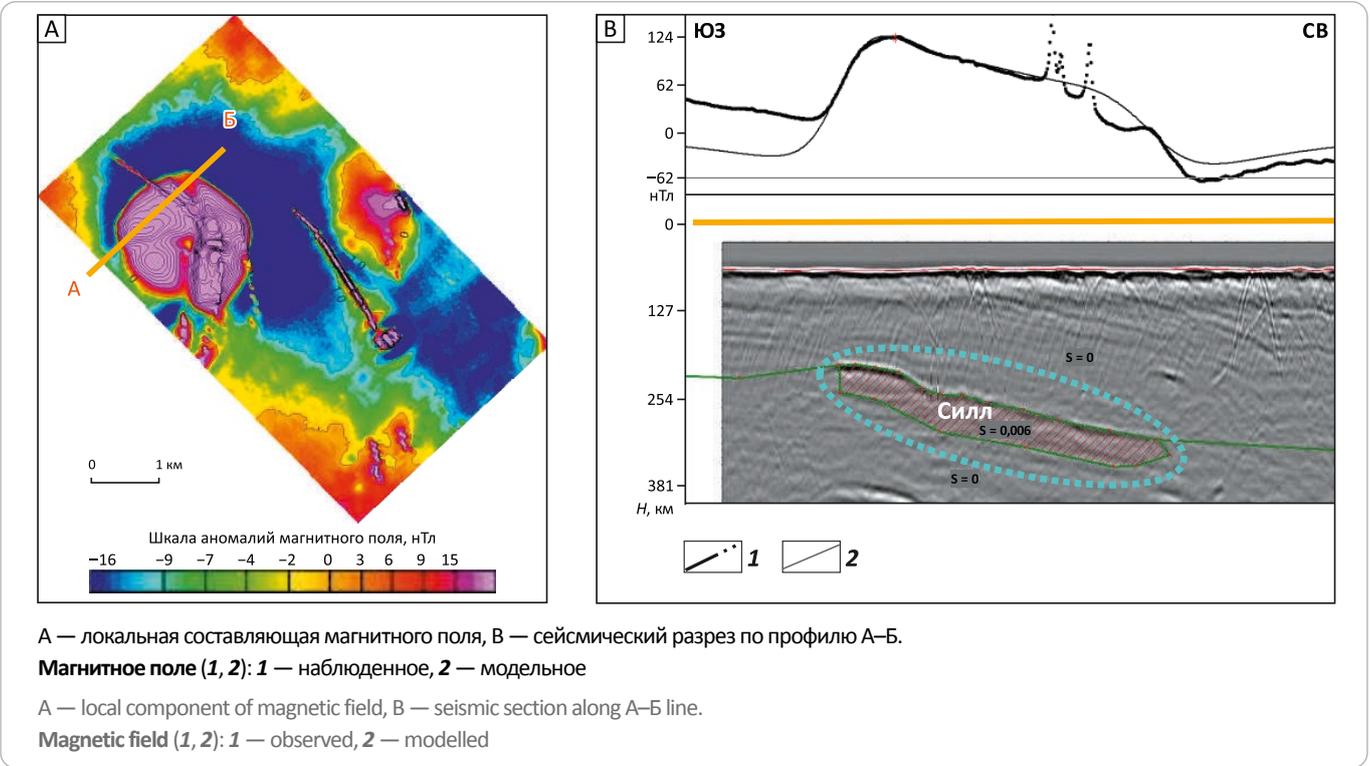
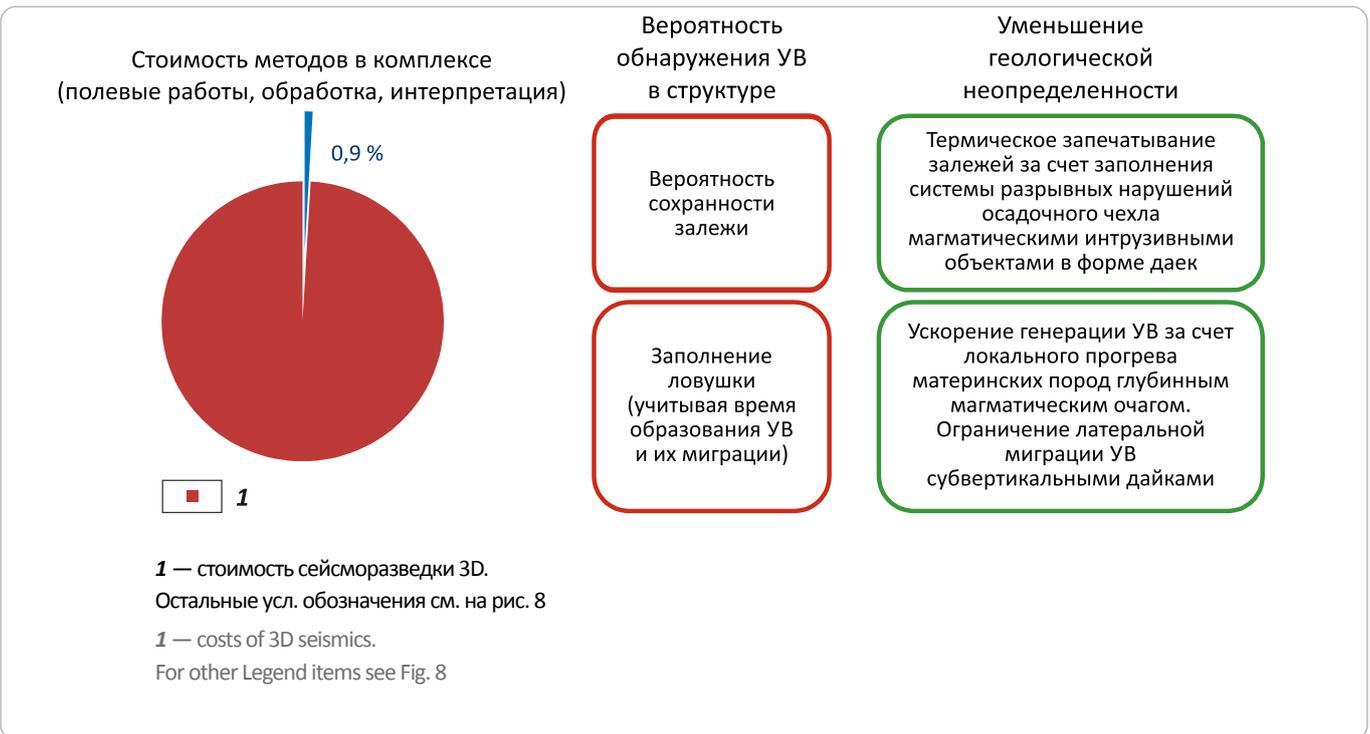


Рис. 12. Оценка относительной стоимости геофизических методов в комплексе и уменьшения геологической неопределенности за счет применения грави- и магниторазведки совместно с сейсморазведкой 3D

Fig. 12. Estimation of relative costs of geophysical methods in a package and reduction of geological uncertainty due to the use of gravi- and magnetometry in the package with 3D seismics



Выделенные и идентифицированные геологические объекты в верхней части разреза позволили скорректировать положение планируемой точки бурения скважины.

Выводы и рекомендации

1. По материалам грави- и магниторазведки в комплексе с сейсморазведкой получена дополнительная информация о физических свойствах изучаемой среды, позволяющая делать более корректные выводы об элементах УВ-системы и решать достаточно широкий спектр геологических задач.

2. Результаты опережающих аэрогравиразведочных и аэромагниторазведочных работ в районах с редкой сетью сейсмических профилей доказывают эффективность этих геофизических методов как в геологическом, так и в экономическом плане.

3. Как показывает накопленный опыт, применение грави- и магниторазведки на всех стадиях геофизических работ, от региональной до детальной,

позволяет получать дополнительную информацию о геологическом строении изучаемой площади и в комплексе с сейсморазведкой строить более обоснованные геологические модели.

4. Из анализа стоимости геофизических работ следует, что включение грави- и магниторазведки в комплекс с сейсморазведкой увеличивает стоимость работ на 1–6 %, в то время как снижение геологической неопределенности, по оценкам геологов, составляет 14–18 %.

5. На этапе построения сейсмической глубинно-скоростной модели в районах со сложным геологическим строением рекомендуется привлечение гравиметрических данных.

6. При планировании геолого-разведочных работ рекомендуется выполнять анализ всей имеющейся геолого-геофизической информации и моделирование гравитационных и магнитных эффектов от объектов поиска.

Литература

1. Устрицкий В.И., Тугарова М.А. Уникальный разрез перми и триаса, вскрытый скважиной Адмиралтейская 1 (Баренцево море) [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8. – № 2. – С. 1–20. – Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2013.pdf (дата обращения: 04.02.2019).
2. Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю., Клещина Л.Н. Гравиметрические и магнитометрические данные как источник дополнительной информации о геологическом строении арктического шельфа // Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия-2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». – Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2019. – С. 86–91.
3. Малышев Н.А. Тектоника, эволюция и нефтегазоносность осадочных бассейнов европейского севера России. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 348 с.
4. Андиева Т.А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2008. – Т. 3. – № 1. – С. 1–28. – Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/4/8_2008.pdf. (дата обращения: 04.02.2019).
5. Городницкий А.М., Филин А.М., Малютин Ю.Д. Морская магнитная градиентная съемка. – М. : Наука, 2004. – 140 с.
6. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // Геофизика. – 2003. – № 6. – С. 55–58.
7. Заварзина Г.А., Шкарубо С.И. Тектоника западной части шельфа моря Лаптевых [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7. – № 3. – С. 1–18. – Режим доступа: http://www.ngtp.ru/rub/4/39_2012.pdf. (дата обращения: 04.02.2019).
8. Блох Ю.И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. – М. : Изд-во МГГА, 1998. – 88 с.
9. Шипилов Э.В., Карякин Ю.В. Юрско-меловой базальтоидный магматизм Баренцево-Карской континентальной окраины: геологические и геофизические свидетельства и геодинамические обстановки проявления // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектонического совещания. – М. : ГЕОС, 2008. – Т. 1. – С. 153–170.

References

1. Ustritskii V.I., Tugarova M.A. Barents sea – Permian and Triassic reference section, encountered by the well Admiralteyskaya-1. *Neftgazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2013;8(2):1–20. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2013.pdf (accessed 04.02.2019). In Russ.
2. Chernikov K.S., Gorbachev S.V., Golovanov D.Yu., Kleshchina L.N. Gravimetricheskie i magnitometricheskie dannye kak istochnik dopolnitel'noi informatsii o geologicheskom stroenii arkticheskogo shel'fa [Gravimetry and magnetometry data as a source of additional information on geological structure of the Arctic shelf] In: *Sbornik tezisev Mezhdunarodnoi geologo-geofizicheskoi konferentsii i vystavki «GeoEvrasiya-2019. Sovremennye tekhnologii izucheniya i osvoeniya neдр Evrazii»*. Tver': ООО «PoliPRESS»; 2019. pp. 86–91. In Russ.
3. Malyshev N.A. Tektonika, evolyutsiya i neftegazonosnost' osadochnykh basseinov evropeiskogo severa Rossii [Sedimentary basins of the Tectonics, evolution, and oil and gas potential of the European north of Russia]. Ekaterinburg: UrO RAN; 2002. 348 p. In Russ.
4. Andieva T.A. Tectonic position and major structures of the Laptev Sea. *Neftgazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2008;3(1):1–28. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/8_2008.pdf. (accessed 04.02.2019). In Russ.
5. Gorodnitskii A.M., Filin A.M., Malyutin Yu.D. Morskaya magnitnaya gradientnaya s"emka [Marine magnetic gradiometry]. Moscow: Nauka; 2004. 140 p.
6. Babayants P.S., Blokh Yu.I., Trusov A.A. Izuchenie stroeniya kristallicheskogo osnovaniya platformennykh oblastei po dannym magnitorazvedki i gravirazvedki. *Geofizika*. 2003;(6):55–58. In Russ.

GEOPHYSICAL SURVEYS

7. Zavarzina G.A., Shkarubo S.I. Tectonics of the western part of the Laptev sea shelf. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2012;7(3):1–18. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/39_2012.pdf. (accessed 04.02.2019). In Russ.

8. Blokh Yu.I. Kolichestvennaya interpretatsiya gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii [Quantitative interpretation of gravity and magnetic anomalies]. Moscow: Izdatelstvo MGGA; 1998. 88 p.

9. Shipilov E.V., Karyakin Yu.V. Yursko-melovoi bazal'toidnyi magmatizm Barentsevo-Karskoi kontinental'noi okrainy: geologicheskie i geofizicheskie svidetel'stva i geodinamicheskie obstanovki proyavleniya [Jurassic-Cretaceous basaltoid magmatism of the Barents-Kara continental margin: geological and geophysical evidence and geodynamic conditions of manifestation]. In: Obschie i regional'nye problemy tektoniki i geodinamiki. Materialy XLI Tektonicheskogo soveshchaniya. Moscow: GEOS; 2008. V. 1. pp. 153–170. In Russ.

Информация об авторах

Черников Константин Сергеевич

Кандидат геолого-минералогических наук,
главный специалист

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: kschernikov@rnsha.rosneft.ru

Горбачев Сергей Викторович

Кандидат технических наук, начальник управления

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: svgorbachev@rnsha.rosneft.ru

Голованов Дмитрий Юрьевич

Кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель генерального директора по геологии

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: dyugolovanov@rnsha.rosneft.ru

Клещина Людмила Николаевна

Старший геофизик

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: lnkleschina@rnsha.rosneft.ru

Мазекина Анна Валерьевна

Главный специалист

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: avmazekina@rnsha.rosneft.ru

Мятчин Олег Михайлович

Менеджер

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: ommyatchin@rnsha.rosneft.ru

Ульянов Григорий Викторович

Кандидат геолого-минералогических наук, старший геолог

ООО «РН-Шельф-Арктика»,
121151 Москва, Можайский вал, д. 8 стр. 6
e-mail: gvulyanov@rnsha.rosneft.ru

Information about authors

Konstantin S. Chernikov

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Chief Specialist

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: kschernikov@rnsha.rosneft.ru

Sergei V. Gorbachev

Candidate of Engineering Sciences, Head of Administration

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: svgorbachev@rnsha.rosneft.ru

Dmitrii Yu. Golovanov

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Deputy Director-General for Geology

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: dyugolovanov@rnsha.rosneft.ru

Lyudmila N. Kleshchina

Senior Geophysicist

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: lnkleschina@rnsha.rosneft.ru

Anna V. Mazekina

Chief Specialist

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: avmazekina@rnsha.rosneft.ru

Oleg M. Myatchin

Manager

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: ommyatchin@rnsha.rosneft.ru

Grigori V. Ul'yanov

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Geologist

RN-Shelf-Arctic,
8 str. 6, Mozhaiskii val, Moscow, 121151, Russia
e-mail: gvulyanov@rnsha.rosneft.ru