

УДК 550.83.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-88-97

ВОЗМОЖНОСТИ НАБОРТНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ И ГИДРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ШЕЛЬФЕ

Михаил Владимирович Кочетов¹, Алексей Андреевич Шепелев²✉, Сергей Владимирович Челышев³

¹ АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», Москва, Россия; kochetov.mv@mage.ru

² АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция»; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alexsey.shepelev@mage.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9312-3725>

³ АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», Москва, Россия; chelishev.sv@mage.ru

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения набортной гравиметрии и гидромагнитометрии в комплексе с высокоразрешающей сейсморазведкой в рамках инженерно-геологических изысканий на арктическом шельфе Российской Федерации. Исследования выполнялись в южной части шельфа Карского моря в районе работ площадью 25 км² с целью выявления потенциально опасных зон для постановки плавучей буровой установки. Исследования выполнены по регулярной сети наблюдений, состоящей из 51 рядовых и 26 секущих профилей. Длина каждого профиля 5 км. Гравиметрические исследования осуществлялись морским набортным гравиметром «Чекан-АМ». Магнитометрические исследования выполнялись с использованием буксируемых морских магнитометров SeaSPY2. Густая сеть наблюдений, высокоточная аппаратура и методика полевых работ позволили получить высокую результирующую точность съемок: 0,14 мГал и 1,12 нТл. Глубина исследований при выполнении инженерно-геологических изысканий представленным комплексом методов варьировалась от первых сотен метров до одного километра. Многолетний опыт проведения инженерно-геологических изысканий в пределах арктического шельфа сотрудниками компании АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», показывает, что распространенными опасностями геологической природы данного региона являются палеоврезы и палеодолины. Данные структуры традиционно заполнены слабоконсолированными, часто газонасыщенными, осадками с включением крупнообломочного материала. Палеоврезы отчетливо проявляются в высокочастотной составляющей магнитного поля и для их выявления была рассчитана локальная составляющая аномального магнитного поля. В результате комплексной интерпретации аномалий поля силы тяжести и данных магниторазведки локализована изогнутая линейная зона, пересекающая весь участок исследований. Выделенная аномальная зона приурочена к границам палеовреза, который первоначально был обнаружен по данным сейсмоакустических исследований. По результатам интерпретации магнитометрических исследований в восточной части исследуемого участка была выделена область отрицательных магнитных аномалий. По материалам сейсмоакустических исследований в данной зоне прослеживаются палеоврезы сложной пространственной и глубинной конфигурации. Примечательно, что данные структуры не проявлены в магнитном поле. По полученным значениям гравитационного поля и по сейсмоакустическим данным через всю площадь построен сейсмоплотностной разрез меридионального простирания. В результате 2D сейсмоплотностного моделирования подобраны плотности для подсеченного палеовреза и обнаружены два разуплотнения на глубине 200 м. Обнаруженные области разуплотнения могут быть вызваны газонасыщенностью осадочной толщи и требуют учета при постановке плавучей буровой платформы. Интерпретация аномального гравитационного поля в указанном комплексе геофизических методов с априорной геологической информацией позволяет спрогнозировать плотностное строение изучаемого породного массива и дает рекомендации по дальнейшим исследованиям.

Ключевые слова: набортная гравиметрия, гидромагнитометрия, потенциальные методы, сейсморазведка, инженерно-геологические изыскания, палеоврезы

Для цитирования: Кочетов М.В., Шепелев А.А., Челышев С.В. Возможности набортных гравиметрических и гидромагнитных исследований при решении инженерно-геологических задач на шельфе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 88–97.

POSSIBILITIES OF ON-BOARD GRAVIMETRIC AND HYDROMAGNETIC SURVEY IN SOLVING ENGINEERING-GEOLOGICAL PROBLEMS ON THE SHELF

Michael V. Kochetov¹, Alexei A. Shepelev²✉, Sergey V. Chelyshev³

¹ Marine Arctic Exploration Expedition JSC, Moscow, Russia; kochetov.mv@mage.ru

² Marine Arctic Exploration Expedition JSC; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alexsey.shepelev@mage.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9312-3725>

³ Marine Arctic Exploration Expedition JSC; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; chelishev.sv@mage.ru

Abstract. This article shows the possibilities of using on-board gravimetry and hydromagnetometry in combination with high-resolution seismic surveys in the framework of site surveys on the Arctic shelf. Geotechnical surveys were carried out in the southern part of the Kara Sea shelf on a study area of 25 km² in order to identify potentially hazardous areas for setting up a floating drilling rig. The studies were carried out using a regular network of observations, consisting of 51 line and 26 secant profiles. The length of each profile is 5 km. Gravimetric research were carried out with the Chekan-AM marine on-board gravimeter in conjunction with magnetometric research using SeaSPY 2 towed marine magnetometers. The depth of research when performing engineering and geological surveys using the presented set of methods is the first 100 meters, up to 1 km. In this case, objects and phenomena of both technogenic and geological nature can represent a potential hazard. As the experience of carrying out this type of work in the south of the Arctic shelf shows, paleoincisions and paleovalleys are common hazards of the geological nature of the region under study. These structures are traditionally filled with weakly consolidated, often gas-saturated, sediments with inclusions of coarse-grained material. Paleoincisions are clearly manifested in the high-frequency component of the magnetic field, and the local component of the anomalous magnetic field was calculated to reveal them. As a result of a complex interpretation of gravity field anomalies and magnetic survey data, a curved linear zone was localized, crossing the entire study area. The identified anomalous zone is confined to the boundaries of the paleoincision, which was originally discovered according to seismoacoustic studies. Based on the results of gravity surveys, an area of negative anomalies was identified in the eastern part of the study area. According to the materials of seismoacoustic in this zone, paleocuts of a complex spatial and deep configuration are traced. It is noteworthy that these structures are not manifested in a magnetic field. Based on the obtained values of the gravitational field and seismoacoustic data, a seismic-density section of meridional strike was constructed across the entire area. As a result of 2D density modeling, the densities for the undercut paleoincision were selected and two deconsolidations were found at a depth of 200 meters. One of the model “artifacts” does not appear according to seismoacoustic studies and hydromagnetometry. The detected areas of decompaction can be caused by the gas saturation of the sedimentary strata and must be taken into account when setting up a floating drilling platform. The interpretation of the anomalous gravitational field in the specified complex of geophysical methods with a priori geological information makes it possible to predict the density structure of the studied rock mass and gives recommendations for further research.

Keywords: on-board gravimetry, hydromagnetometry, potential methods, seismic exploration, site surveys, paleoincisions

For citation: Kochetov M.V., Shepelev A.A., Chelyshev S.V. Possibilities of on-board gravimetric and hydro-magnetic survey in solving engineering-geological problems on the shelf. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 3: 88–97. (In Russ.).

Введение. Главная задача инженерно-геологических исследований на шельфе заключается в комплексном изучении особенностей строения верхней части разреза преимущественно горизонтально-слоистой толщи, определении инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий района работ, а также поиске потенциально опасных объектов и неблагоприятных явлений для строительства морской нефтегазовой инфраструктуры. Как правило, объекты исследований при решении приведенных задач приурочены к интервалу глубин от поверхности морского дна до первых сотен метров, но не более километра [СП 47.13330.2016]. Данный диапазон глубин весьма условно называют верхней частью разреза (ВЧР). Конечной целью исследования является определение возможности размещения полупогружных и плавучих буровых установок в проектной точке.

Комплексный подход при проведении геолого-геофизических исследований имеет ряд преимуществ по сравнению со съемками отдельными геофизическими методами. Одним из важнейших условий эффективного изучения ВЧР является выбор оптимального комплекса методов исследований, как с точки зрения их потенциальных возможностей, так и информативности и совместимости разнородных данных [Никитин, 2012].

В сентябре 2020 года на научно-исследовательском судне (НИС) «Геолог Дмитрий Наливкин»

специалистами морской арктической геологоразведочной экспедиции («МАГЭ») были выполнены опытные набортные гравиметрические исследования в комплексе с дифференциальной гидромагнитной съемкой и высокоразрешающей сейсморазведкой. Исследования проводились на участке инженерно-геологических изысканий в южной части шельфа Карского моря (рис. 1).

Инженерно-геологические изыскания выполнены на 51 меридиональном (рядовом) и 26 широтных (секущих) профилях. Расстояние между меридиональными профилями — 100 м, широтными — 200 м. Длина каждого профиля 5 км. Всего на объекте выполнено 385 пог. км комплексных наблюдений (рис. 2).

Гидромагнитная съемка входит в стандартный комплекс геофизических методов при инженерно-геологических изысканиях и выполняется с целью обнаружения и картирования магнитоактивных неоднородностей на морском дне и в ВЧР осадочного чехла, как техногенного характера, так и геологической природы [Кочетов, 2018, 2019]. Примеры эффективности применения гидромагнитных исследований при картировании всевозможных металлосодержащих конструкций и сооружений, созданных и утраченных когда-то человеком, представлены в работах большого количества авторов [Boyce, 2004; Shepelev, 2021; Weiss, 2007; Семевский, 2002; Стариков, 2021]. Гидромагнитные исследо-

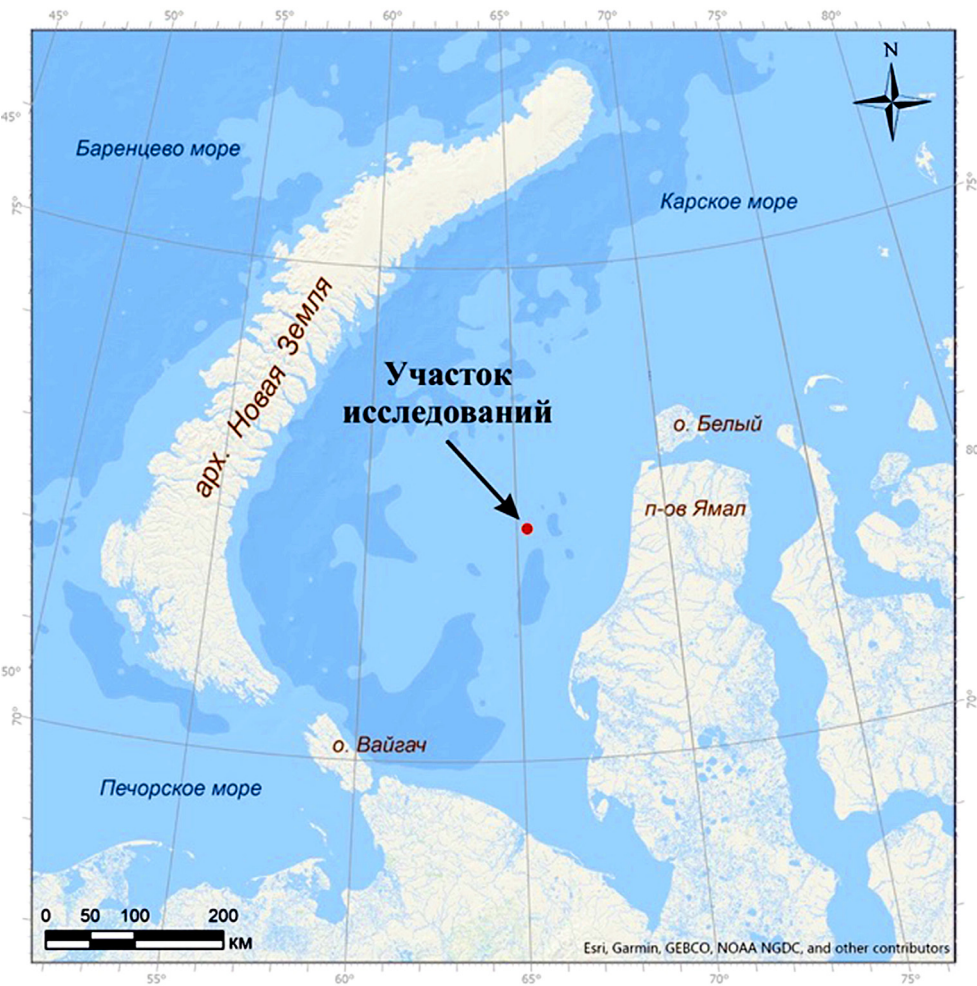


Рис. 1. Схема местоположения района работ

вания подтвердили свою эффективность в рамках поиска затонувших кораблей, самолетов, военной техники и неразорвавшихся боеприпасов со времен войны, а также археологических ценностей и остатков сооружений. Гидромагнитная съемка занимает важное место и при картировании геологических образований: подводных вулканов, зон развития моренных отложений, возможных погребенных речных долин и древних русел, палеодепрессий, зон трещиноватости и разрывных нарушений, скрытых под современными отложениями, при поисках месторождений углеводородов [Колюбакин, 2016].

Гравиметрические исследования не входят в стандартный комплекс геофизических методов при инженерных изысканиях на шельфе, однако возможности современных технологий позволяют пересмотреть ее роль при комплексировании геофизических данных. Перспективы гравirazведки связаны с совершенствованием гравиметрической аппаратуры, повышением ее точности и надежности, а также с развитием математического аппарата интерпретации данных [Костицын, 2002; Глазнев, 2020].

Качественный скачок в развитии инерциально-спутниковых технологий сделал возможным выполнение гравиметрических измерений не только с морских судов, но и с самолетов. К настоящему моменту достижимая точность аэрогравиметрических наблюдений составляет 0,5–1 мГал, точность мор-

ских набортных съемок может достигать 0,1 мГал, а точности наземных и донных гравиметрических наблюдений уже достигают первых десятков микрогалл (мкГал), 10 мкГал = 0,01 мГал [Пешехонов, 2017; Журавлев, 2020]. Высокоточные-микрогальные гра-

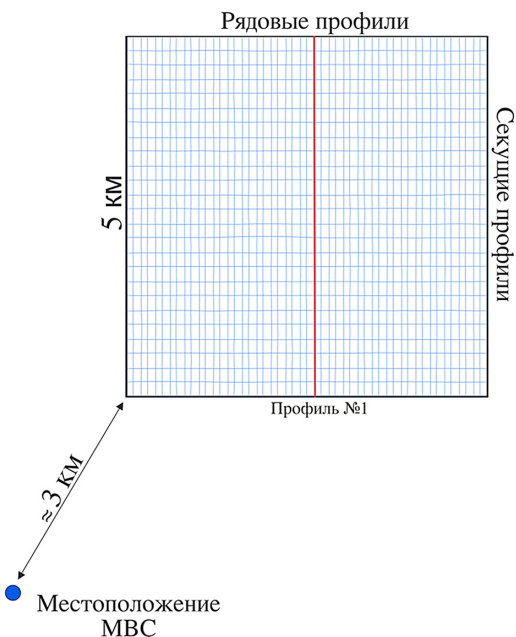


Рис. 2. Карта фактического материала участка исследований

виметрические съемки позволяют изучать тонкую структуру поля силы тяжести и фиксировать ее минимальные изменения.

Гравиметрические исследования с использованием современных методов интерпретации позволяют успешно выделять нефтегазоперспективные объекты, изучать строение соляных толщ, трассировать тектонические нарушения в осадочном чехле и фундаменте, выявлять аномальные зоны в отдельных интервалах разреза и т.д. [Андреев, 2012]. Кроме того, гравиразведка способна дать оценку возможности развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов и явлений, таких как газонасыщенные грунты и с аномально высоким пластовым давлением в ВЧР, разжижение поверхностных грунтов и их подвижки [Бычков, 2013]. Гравиметрические исследования применяются при мониторинге газовых и газоконденсатных месторождений при их разработке, как на шельфе, так и на суше [Eikenl, 2017; Krahenbuhl, 2011; Ruiz, 2020; Андреев, 2012]. Донные гравиметрические исследования, выполняемые с целью гравиметрического мониторинга, позволяют отслеживать и контролировать изменения положения уровня газо-водяного контакта (ГВК) и таким образом могут предупредить проникновение воды в добывающие скважины. В комплексе методов гравиразведка решает специфические задачи: определение плотностного строения толщи пород вносит свой вклад в построение модели геологического строения изучаемой территории и используется для прогнозирования геофизической обстановки и состояния окружающей среды.

Методика съемки и обработки данных. Измерения модуля полного вектора напряженности магнитного поля T проводились магнитометром SeaSPY2 на частоте 1 Гц и с точностью измерительного датчика равной 0,1 нТл. Для определения высоты прибора над дном (альтитуды) в магнитометре установлен альтиметр — высокоточный эхолот с частотой 200 кГц, а также датчик давления. Для корректной пространственной привязки съемочных галсов и дальнейшей локализации магнитных аномалий применялась система подводного гидроакустического позиционирования Sonardyne Ranger 2 USBL с точностью позиционирования 0,3–0,5 м в режиме реального времени. Цифровая регистрация данных осуществлялась с частотой дискретизации 1 с. Обработка данных проводилась с помощью программного комплекса Geosoft Oasis montaj 7.3. (Geosoft Inc. Copyright © 2011)

Гидромагнитная съемка выполнена с огибанием рельефа морского дна. На протяжении всех работ магнитометр удерживался в коридоре 5–7 м от донной поверхности и буксировался на удалении от судна равному 216 м, что составляет три длинны НИС «Геолог Дмитрий Наливкин». Данный методический подход позволил регистрировать сигнал от самых незначительных по размерам магнитоактивных не-

однородностей и минимизировать девиационную помеху в наблюдениях — влияние магнитного поля (МП) судна на измерительный датчик. Оставшаяся девиационная составляющая и совокупность ошибок наблюдений, связанных с методическими особенностями гидромагнитных измерений МП, компенсировалась на стадии уравнивания съемки.

Для учета вариаций магнитного поля использовалась донная магнитовариационная станция (МВС) *Sentinel*, установленная непосредственно в районе работ на удалении 3 км от юго-западной границы исследуемого участка. Приведенная методика наблюдений с МВС хорошо зарекомендовала себя и подробно описана в статье [Шепелев, 2021]. Используемая конфигурация оборудования позволяет получить значения модуля полного вектора напряженности постоянного магнитного поля Земли T . Для расчета аномального магнитного поля ΔT_a использовалась следующая математическая формула [Гордин, 1986; Блох, 2012]:

$$\Delta T_a = T - T_n - \delta T,$$

где T — модуль полного вектора напряженности магнитного поля (измеряемая величина), T_n — нормальное магнитное поле Земли, δT — вариации магнитного поля.

По вычисленным значениям аномального магнитного поля в точках пересечения рядовых и секущих профилей рассчитывалась средняя квадратичная погрешность (СКП) σ съемки:

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i^2}{2n}},$$

где n — количество повторных измерений, δ_i — разность (невязки) значений поля в точках пересечения профилей [Журавлев, 2000; Новиков, 2013].

Далее выполнялось уравнивание сети гравиразведочных наблюдений итеративным способом, включающим следующие операции:

- сортировку профилей на две группы секущие и рядовые,
- расчет разности значений аномального магнитного поля исходных секущих и рядовых профилей,
- аппроксимацию невязок полиномами по секущим профилям, которые имеют наибольшее количество точек пересечений,
- корректировку секущих профилей,
- расчет невязки откорректированных секущих профилей с исходными рядовыми,
- аппроксимацию невязки полиномом по рядовым профилям и их дальнейшую корректировку,
- повторение цикла увязки до достижения желаемого результата.

При количестве пересечений точек наблюдений рядовых профилей с секущими $n=1326$ СКП съемки до уравнивания составила: $\pm 3,71$ нТл, после уравнивания итеративным методом по постоянной

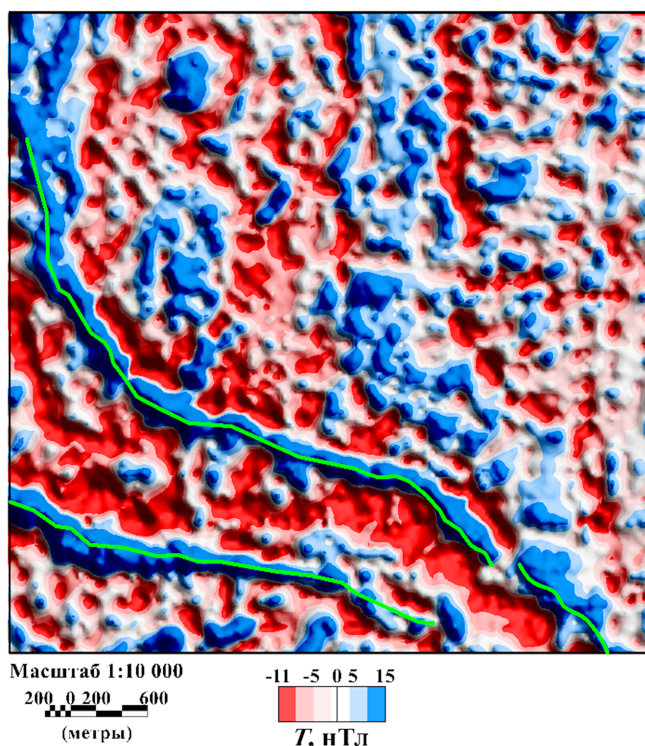


Рис. 3. Цифровая модель локальной составляющей АМП исследуемого участка инженерно-геологических изысканий. Зеленым цветом обозначены оси линейных магнитных аномалий

составляющей $\pm 1,50$ нТл, после уравнивания полиномом 3-й степени несколькими циклами $\pm 1,12$ нТл. Выбор степени полинома был обусловлен погодными условиями во время выполнения съемки, так как волнение моря и подводные течения оказывали большое воздействие на буксируемое оборудование.

К наиболее распространенным опасным геологическим объектам можно отнести: области распространения предположительно мерзлых грунтов, палеоврезы и палеодепрессии, а также интервалы разреза с повышенной газонасыщенностью.

Исследуемые объекты поисков проявляются в высокочастотной составляющей МП, и для их выделения использовалась локальная составляющая аномального магнитного поля, которая рассчитывалась методом пересчета исходного поля в верхнее полупространство на высоту 150 м и дальнейшего вычитания результатов пересчета из исходных данных (рис. 3).

Наблюдения ускорения силы тяжести проводились морским набортным гравиметром «Чекан-АМ» (разработчик АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР», 2016). Гравиметр был включен при отходе судна из порта г. Мурманск и находился в рабочем режиме всё время рейса. Обработка данных гравиметра проводилась по стандартной методике программой Chekan_PP (программное обеспечение гравиметра «ЧЕКАН-АМ», предназначенное для сбора и последующей обработки гравиметрических данных), которая включает в себя расчет поправки за совместное действие горизонтальных ускорений и остаточных наклонов гироскопов гравиметра,

поправки Этвеша, поправки за смещение нуля-пункта гравиметра, вычисление приращений и аномалий поля силы тяжести. Полученные значения были загружены в базу данных Geosoft Oasis Montaj 7.3 (Geosoft Inc. Copyright © 2011)

Далее по вычисленным значениям аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе в точках пересечения рядовых и секущих профилей рассчитывалась СКП σ съемки. Расчет СКП гравиметрических измерений выполнялся аналогично гидромагнитным.

Уравнивание сети наблюдений повышает итоговую точность съемки и делает поле более однородным. При уравнивании выделяется систематическая погрешность измерений на отдельных галсах и оценивается по методу наименьших квадратов. В данном случае была построена полная матрица пересечений и погрешность оценивалась путем осреднения расхождений на каждом галсе. При анализе расхождений вдоль галса предполагается, что погрешности измерений остальных галсов в точках пересечений с данным, взаимно независимы и имеют нулевое математическое ожидание. Поэтому отличие среднего расхождения на галсе от нуля интерпретируется как постоянная погрешность этого галса. Если же обнаруживается медленно изменяющаяся составляющая, то она также интерпретируется как погрешность этого галса [Михайлов, 2017].

При количестве пересечений точек наблюдений рядовых профилей с секущими $n=1326$ погрешность наблюдений до уравнивания составила $\pm 0,48$ мГал, после уравнивания по постоянной составляющей $\pm 0,24$ мГал, после уравнивания полиномами $\pm 0,14$ мГал. Полиномы применялись для удаления небольших по значениям профильных погрешностей, ухудшавших вид первоначальной цифровой модели (ЦМ). Степень полинома — 7. Обоснованность применения полиномов была подтверждена после анализа полученного аномального поля. Искажений, имеющих в поле аномалий, не наблюдалось. При большом количестве пересечений 7-я степень полинома дает плавную кривую, близкую к постоянной, со значениями поправок значительно ниже исходной погрешности, что не влияет на локальные аномалии, но исключает неучтенные профильные погрешности, сглаживает аномалии и подчеркивает их (рис. 4).

Чтобы не потерять возможные низкоамплитудные аномалии, фильтрация наблюденных значений гравитационного поля по профилям изначально была минимально возможной — применялся фильтр Баттеруорта (Butterworth Filter) в окне 15 метров. После уравнивания была рассчитана цифровая модель аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе с ячейкой гридирования 50×50 м, обусловленной расстоянием между профилями 50 м (рис. 5, а). После анализа аномального поля был применен низкочастотный 2D фильтр Баттеруорта с окном фильтрации 150 м (рис. 5, б). Модель рельефа морского дна

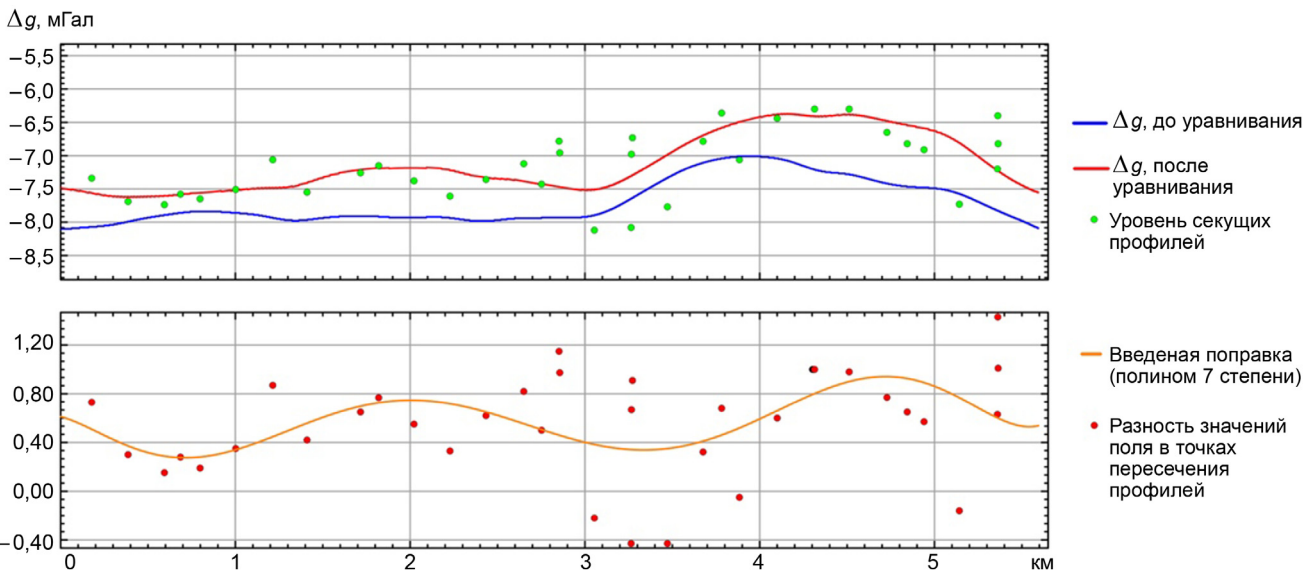


Рис. 4. Пример аппроксимация невязки полиномом 7 степени при уравнивании гравиметрических наблюдений

была подвергнута фильтрацией низкочастотным фильтром Баттеруорта с окном фильтрации 400 м (рис. 6).

Результаты интерпретации и их обсуждение.

Поле локальных магнитных аномалий в северной и северо-восточной части участка исследований имеет мозаичную структуру, с амплитудами на уровне погрешности съемки. Локальные аномалии с амплитудами заметно выше погрешности наблюдений развиты в основном в юго-западной части изучаемой площади, где они прослеживаются в виде узких линейных зон западного — северо-западного направления (рис. 3). Амплитуда положительных

аномалий составляет в среднем 6–10 нТл, максимум 14 нТл. Вероятно, выделенные аномалии отражают геологические неоднородности в осадочном чехле, что подтверждается сейсмоакустическими данными, на которых в волновой картине фиксируются очертания данной геологической структуры (рис. 7).

Палеоврезы и палеодолины относятся к одному из видов геологических опасностей и представляют большую угрозу для строительства нефтегазовой инфраструктуры. Природа палеодепрессий в изучаемом районе может быть различной — они могут представлять собой эрозионные врезы, выработанные палеореками во время наиболее крупных

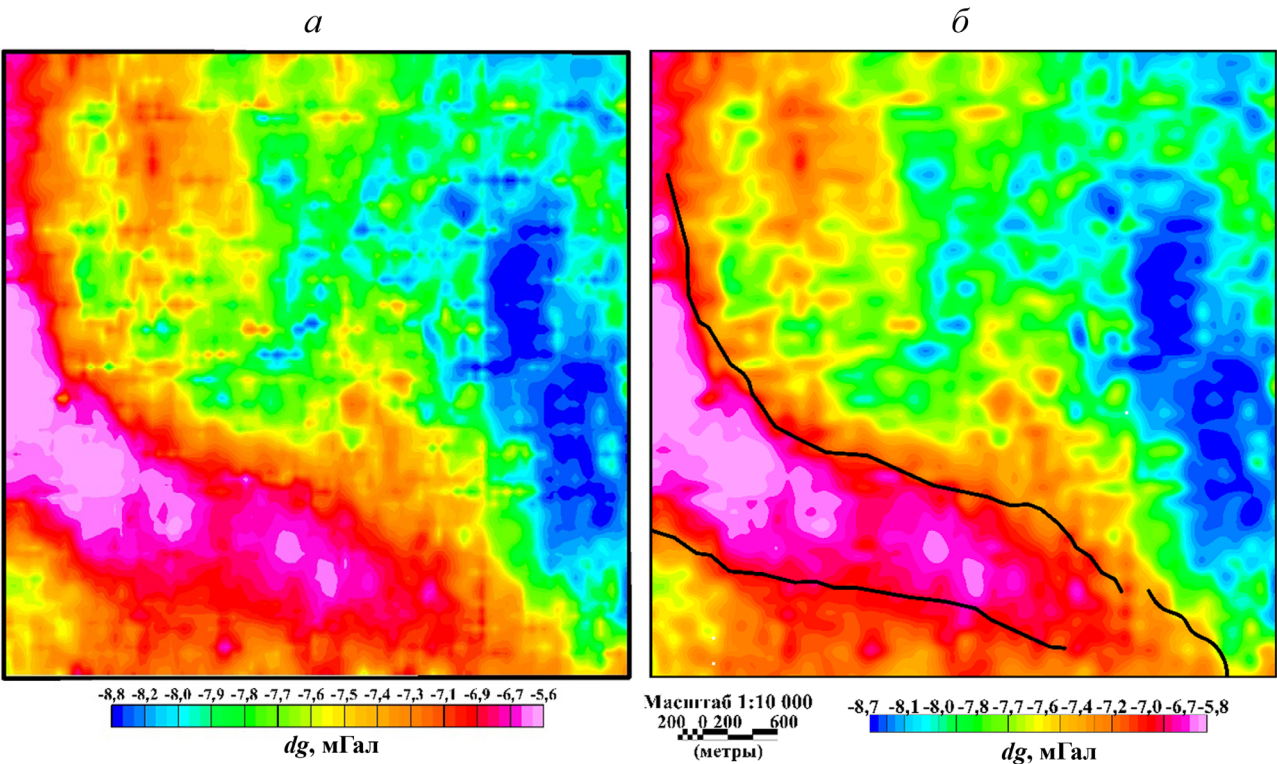


Рис. 5. Цифровая модель аномалий поля силы тяжести в редукции свободный воздух до фильтрации (а) и после (б)

регрессий (в позднем миоцене, в среднем плиоцене, в среднем и позднем неоплейстоцене), структуры проседания, образовавшиеся при развитии подрусловых таликов, крупные посткриогенные деформации и др. По сейсмическим данным не всегда возможно достоверно идентифицировать такие образования и определить их генезис. В связи с этим фактом в качестве термина «палеоврезы» ко всем подобным объектам в данной работе применяется более общий термин: палеоврезы и палеодепрессии (или палеоврезы и палеопонижения). В случаях, когда интерпретация не вызывает сомнений, используются более специальные термины — палеоврез, канал стока и погребенная термокарстовая котловина [Колюбакин, 2016].

В полученном поле аномалий силы тяжести отчетливо выделяются несколько зон. В первую очередь, это изогнутая линейная зона положительных амплитуд запад-северо-западного, переходящего в северное простирание, интенсивностью 1–2 мГал (рис. 5, б). Эта зона практически полностью совпадает с аномальной зоной, полученной по данным магниторазведки (рис. 3), что коррелирует и с результатами интерпретации данных сейсморазведки (рис. 7). В результате анализа данных сейсморазведки высокого разрешения в верхних 500-та метрах разреза было выделено 4 сейсмокомплекса (СК), границами которых являются 5 опорных отражающих горизонтов: Н0 (морское дно), Н1, Н2, Н3, Н4 (рис. 6). Стратиграфическая привязка указанных рефлекторов производилась путем сопоставления сейсмических данных с разрезами скважины № 1, расположенной в 7,2 км к югу от площадки, и № 2, расположенной в 18,4 км к северо-западу от площадки. При этом использовалась региональная сейсмостратиграфическая схема и результаты ранее проведенных изысканий на исследуемом участке.

По результатам сопоставления отражающий горизонт Н2 приурочен к границе верхнего мела — нижнего палеогена, отражающий горизонт Н3 к кровле кампана. Границы Н3.1 и Н3.2 были выделены внутри сейсмического комплекса Н3 по априорным скважинным данным.

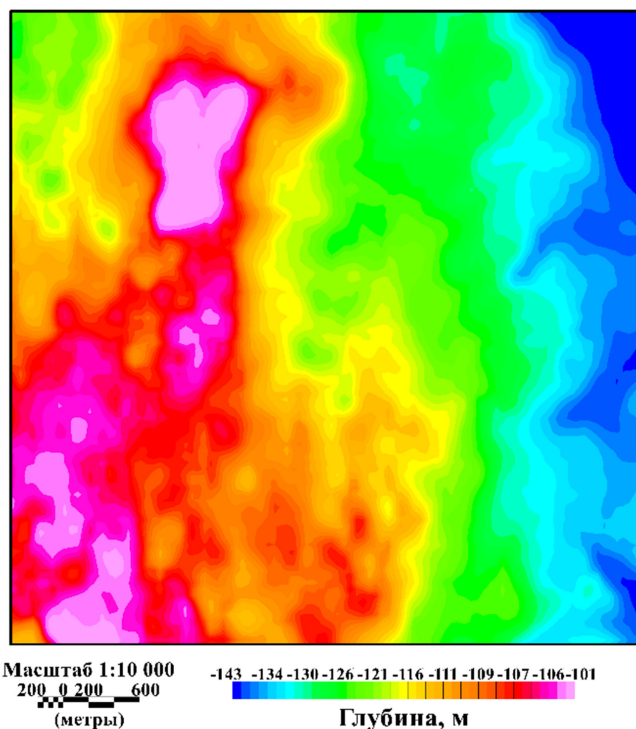


Рис. 6. Цифровая модель рельефа морского дна исследуемой площади по данным многолучевого эхолотирования

В восточной части исследуемой площадки наблюдается изометричная зона отрицательных аномалий поля силы тяжести интенсивностью до $-0,8$ мГал (рис. 5, б). По сейсморазведочным материалам выделенная область прослеживается врезам сложной конфигурации, но при этом не отражается в магнитном поле. Область отрицательных аномалий может быть связана с разуплотнением осадочных слоев, вызванным газонасыщенностью.

По полученным значениям аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе и глубин и по сейсмоакустическим данным (рис. 7) через всю площадь был построен сейсмоплотностной разрез до глубины 500 м направления Ю–С (рис. 8). На начальных этапах геоплотностного моделирования подбор оптимальной плотности промежуточного слоя выполнялся по методу Неттлтона [Миронов, 1980]. Для

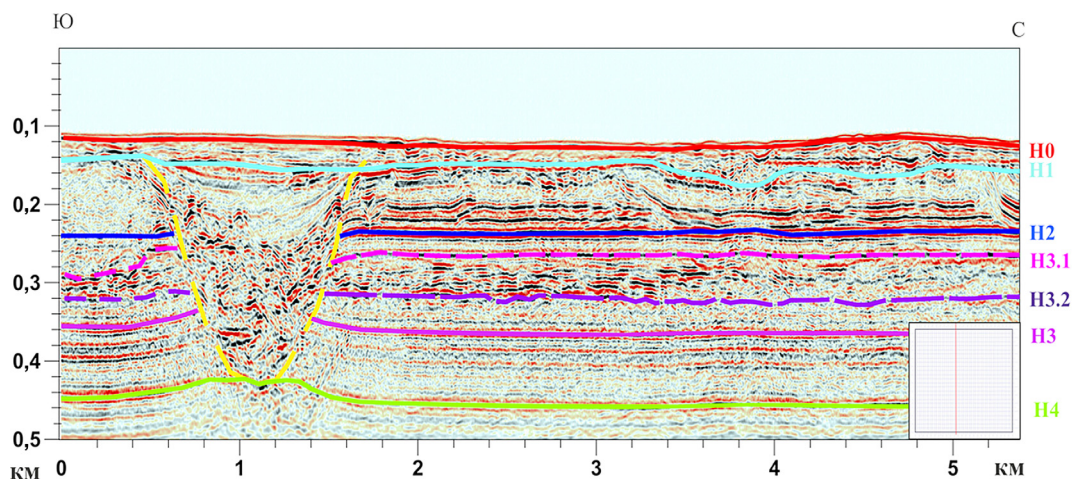


Рис. 7. Сейсмический разрез по данным сейсморазведки высокого разрешения. Желтым цветом обозначено положение палеовреза (Vrez5), цветными линиями — границы сейсмокомплексов. На врезке показано положение профиля № 1

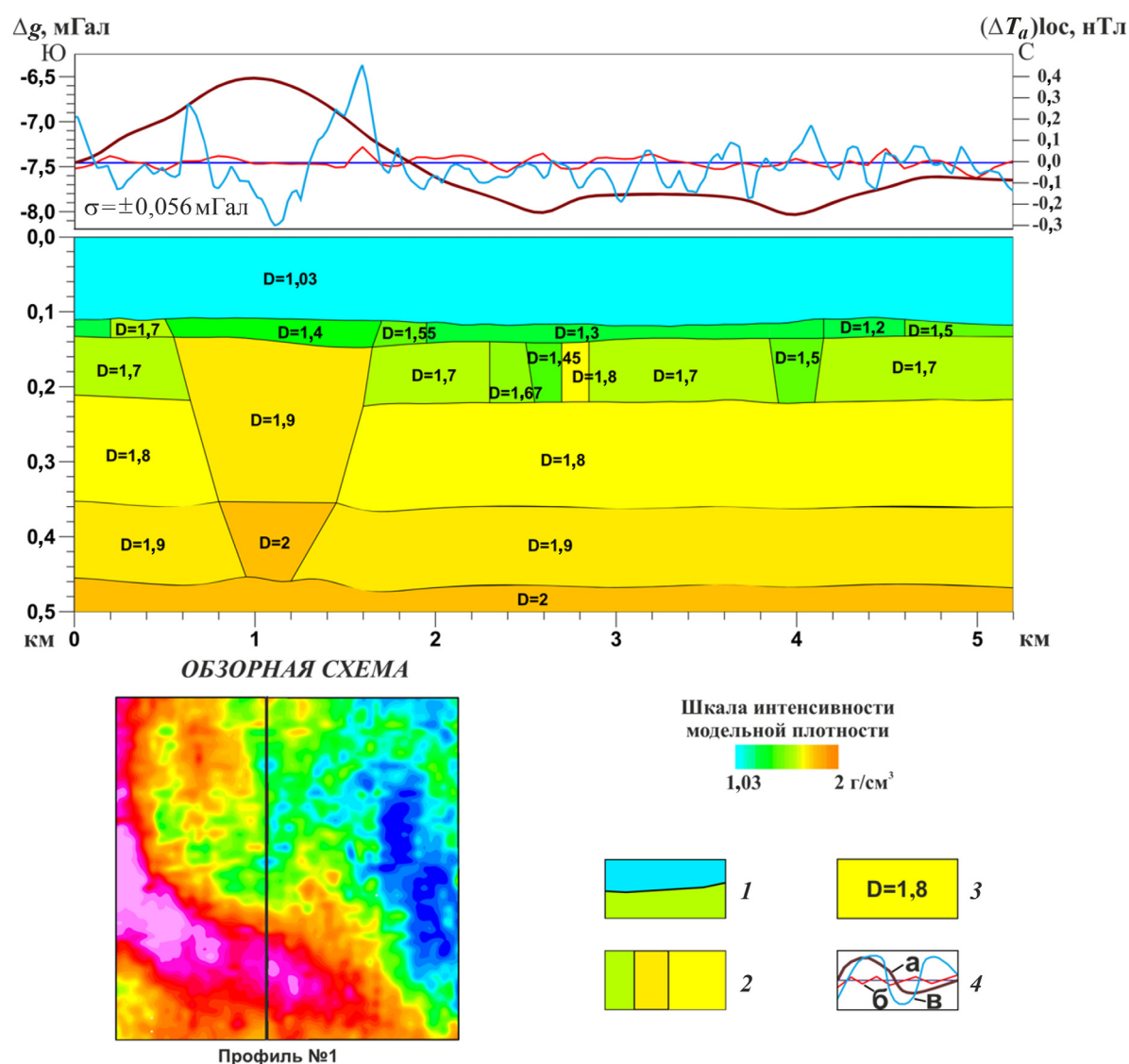


Рис. 8. Сейсмоплотностной разрез по результатам 2D плотностного моделирования: 1 — отражающие горизонты по данным сейсморазведки высокого разрешения, 2 — границы блоков по результатам моделирования, 3 — модельные значения плотности, 4 — наблюдаемый и вычисленный графики аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе: а — Δg , мГал; б — σ , мГал: график разности наблюдаемых и вычисленных значений Δg ; в — $(\Delta T_a)_{loc}$, нТл: график наблюдаемых значений локальной составляющей АМП

определения плотности первого слоя осадочного чехла привлекались данные донного опробования [Козлов, 2005]. Перебор плотности промежуточного слоя методом Неттлтона из диапазона осадочных пород выявил оптимальное значение не выше $1,5 \text{ г/см}^3$, что соответствует глинистым отложениям морского дна. Данная плотность практически не создает ложных аномалий от промежуточного слоя, но в то же время и не компенсирует известную часть локальных аномалий наблюдаемого поля силы тяжести от рельефа дна.

Таким образом, ввиду резкой изменчивости поля на рассматриваемой площади инженерно-геологических изысканий, и его частичном усложнении при редуцировании, было принято решение для моделирования использовать аномалии в редукции свободный воздух, с учетом результатов исследований, описанных выше, как отправную точку для уплотнения разреза с глубиной. Моделирование

проводилось до получения сходимости графиков измеренного и модельного поля с точностью не хуже погрешности съемки $\pm 0,14$ мГал.

В результате 2D сейсмоплотностного моделирования для подсеченного палеовреза в южной части профиля было установлено уплотнение разреза на глубине 450 м до 2 г/см^3 , что соответствует аномалии в 1 мГал. На отметках 2,8 и 4,2 км от начала профиля обнаружены два разуплотнения на глубине 200 м величиной $1,45$ и $1,5 \text{ г/см}^3$, с отрицательными значениями аномалий до $-0,35$ мГал. Важно заметить, что малоамплитудная гравитационная аномалия на севере профиля (4,2 км на рис. 8) выделяется и по сейсмоакустическим данным хаотичной волновой картиной и проседанием фрагмента границы Н1 (рис. 7).

В свою очередь выделенное разуплотнение в центральной части профиля по результатам геоплотностного моделирования (2,8 км на рис. 8) никак

не детерминировано по данным сейсмоакустики и гидромагнитометрии. Обнаруженный «артефакт» может быть вызван газонасыщенностью осадочной толщи и требует учета при постановке плавучей буровой платформы в проектную точку. Результаты геоплотностного моделирования дополняют сейсмоакустические данные и дают количественное представление о распределении плотности разреза.

Выводы. Главным фактором эффективности решения геофизических задач при выполнении инженерно-геологических изысканий на арктическом шельфе является комплексный подход к интерпретации данных сейсморазведки и потенциальных методов геофизики. Приведенные в статье результаты интерпретации данных гидромагнитных исследований показали высокую эффективность метода при комплексировании с данными сейсморазведки и гравиразведки при локализации палеоврезов и трассирования их границ. Опыт проведенных работ показывает, что даже при попутных гравиметрических наблюдениях, имеется возможность надежного выделения аномалий до 0,5 мГал, а при благоприятных условиях до 0,1–0,2 мГал.

Комплексная интерпретация потенциальных полей с данными сейсморазведки позволяет получить достоверную картину о распространении палеоврезов, тектонических нарушений и других потенциально опасных геологических и техноген-

ных структур. Как показывает практика, результаты методов хорошо подтверждают друг друга. Важно отметить, что гравиразведка способна выявить опасные области разуплотнений различной геологической природы, например такие, как скопление газа в ВЧР, не пригодные и опасные для постановки плавучих буровых установок.

В комплексе с материалами сейсморазведки и другими геолого-геофизическими данными гравиметрия позволяет получить представление об объемном плотностном строении изучаемого породного массива, дать рекомендации по дальнейшим исследованиям, что, несомненно, поможет задать правильную точку для установки платформы и безопасного проведения бурения на стадии разработки. Результаты комплексной интерпретации подтверждают высокую чувствительность гравиметрии и магнитометрии их продуктивность и совместимость при морских инженерных изысканиях. Высокоточная аппаратура позволяет изучать тонкую структуру геофизических полей, повышает требовательность к обработке и интерпретации наблюдений, тем самым ставит новые задачи перед геофизиками.

Благодарности. Авторы выражают благодарность д-р физ.-мат. наук, проф. В.Н. Глазеву и канд. геол.-минерал. наук М.В. Косныревой за редакцию, содержательные рекомендации и плодотворное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К. и др. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Состояние, проблемы, перспективы. М.: ООО «Издательский дом Недра», 2012. 374 с.
2. Блох Ю.И. Теоретические основы комплексной магниторазведки. М., 2012. 160 с.
3. Бычков С.Г., Геник И.В., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Современная гравиразведка при геологоразведочных работах на нефть и газ // Геофизика. 2013. № 5. С. 42–45.
4. Глазев В.Н., Якуба И.А. Мощность земной коры территории Республики Нигер по данным стохастической интерпретации гравитационного поля // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. 2020. № 4. С. 46–58.
5. Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магнитометрия. М.: Недра, 1986. 232 с.
6. Журавлев В.А. К вопросу оценки погрешности уравненных геофизических съемок // Сб. докладов Международной научной школы-семинара: «Вопросы теории и практики комплексной геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Ухта: Изд. УГТУ, 2000. С. 57–62.
7. Журавлев В.А., Чельшев С.В., Кочетов М.В. Опыт использования гравиметра Чекан и перспективы развития морской гравиметрии в ОАО МАГЭ // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г. Успенского — В.Н. Страхова: Сборник. Воронеж, 2020. С. 124–127.
8. Козлов С.А. Оценка устойчивости геологической среды на морских месторождениях углеводородов в Арктике // Нефтегазовое дело. 2005. № 1. С. 29.
9. Колюбакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков А.Г. и др. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. 2016. № 10–11. С. 38–51.
10. Костицын В.И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки. Пермь: ПГУ, 2002. 220 с.
11. Кочетов М.В., Журавлев В.А. Оптимизация методики дифференциальной гидромагнитной съемки // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер: Геология. 2018. № 2. С. 127–131.
12. Кочетов М.В. Имитационное моделирование дифференциальной гидромагнитной съемки в стохастических средах // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер: Геология. 2019. № 3. С. 99–103.
13. Миронов В.С. Курс гравиразведки: Учебное пособие. Л.: Недра. Ленинградское отделение, 1980. 543 с.
14. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. Тверь: ГЕРС, 2004. 294 с.
15. Новиков К.В. Магниторазведка. Ч. 1. М., 2013. 141 с.
16. Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общ. ред. В.Г. Пешехонова; науч. ред. О.А. Степанов. СПб.: ГНЦ РФ. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.

17. Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002. 228 с.
18. Стариков В.С. Методы инженерной геофизики при поисках техногенных объектов на мелководных акваториях // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. 2021. № 1. С. 75–81.
19. Шепелев А.А., Жилин Ф.Е., Демонов А.П. Эффективность выполнения гидромагнитных градиентометрических исследований с использованием магнитовариационной станции при инженерно-геологических изысканиях на континентальном арктическом шельфе // Инженерные изыскания. 2021. Т. XV, № 3–4. С. 32–41.
20. Boyce J.I., Reinhardt E.G. Marine Magnetic Survey of a Submerged Roman Harbour, Caesarea Maritima, Israel. // The International Journal of Nautical Archaeology. 2004. Vol. 33. P. 122–136.
21. Eiken O. et al. Four decades of gravity monitoring of the Groningen gas field // First EAGE Workshop on Practical Reservoir Monitoring. — European Association of Geoscientists & Engineers. 2017. P. 505–0030.
22. Krahenbuhl R.A., Li Y. 4D gravity modeling: Integrating seismic data with highly constrained gravity inversions for effective reservoir monitoring // 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. — European Association of Geoscientists & Engineers. 2011. P. 264–00072.
23. Ruiz H., Lien M., Lindgård J.E. 4D gravity and subsidence monitoring as cost-effective alternatives to 4D seismic // EAGE Seabed Seismic Today: from Acquisition to Application. — European Association of Geoscientists & Engineers. 2020. Vol. 2020. № 1. P. 1–5.
24. Shepelev A.A., Zhilin F.E. Comparison of Processing Results of Magnetometric Data Using Magnetic Base Station and Gradiometer in Offshore Engineering Survey // Engineering and Mining Geophysics 2021. — European Association of Geoscientists & Engineers. 2021. Vol. 2021. № 1. P. 1–7.
25. Weiss E, Ginzburg B, Cohen T.R. et al. High Resolution Marine Magnetic Survey of Shallow Water Littoral Area. Sensors (Basel) // Sensors. 2007. P. 1697–1712.
26. СП 47.13330.2016 Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП.11-02-96.

Статья поступила в редакцию 19.09.2022,
одобрена после рецензирования 02.11.2022,
принята к публикации 22.07.2023