



УДК 550.389

**ВЫСОКОТОЧНЫЕ ГИДРОМАГНИТНЫЕ И НАБОРТНЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЯХ НА ШЕЛЬФЕ**С.О. Базилевич¹, М.А. Казанина¹, М.В. Кочетов¹, Ф.Е. Жилин¹, А.А. Шепелев^{1,2}¹АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция», Мурманск, Россия
²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье рассмотрены возможности применения гидромагнитной съёмки в комплексе с набортной гравиметрией при инженерно-геологических изысканиях на арктическом шельфе с целью выявления потенциально опасных зон для строительства сооружений морской нефтегазовой промышленности. В результате комплексной интерпретации гидромагнитных и гравиметрических данных выполнено изучение неоднородностей в верхней части осадочного чехла, а также выявлены площади распространения палеоврезы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИДРОМАГНИТНАЯ СЪЁМКА, НАБОРТНАЯ ГРАВИМЕТРИЯ, ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ, ПАЛЕОВРЕЗЫ.

DOI 10.5425/2304-7380_2023_41_27

<https://elibrary.ru/qcheqz>**1. ВВЕДЕНИЕ**

На сегодняшний день планирование строительства эксплуатационных скважин на континентальном шельфе в пределах лицензионных участков сопровождается этапом выполнения комплексных морских инженерно-геологических изысканий, предназначенных для получения полного объема исходных данных для разработки проектной документации на подготовительном этапе строительства.

Цель инженерных изысканий - определить возможность размещения полупогружных и плавучих буровых установок в проектной точке. Задачи исследований заключаются в комплексном изучении особенностей строения верхней, преимущественно горизонтально-слоистой части разреза, определении геологических и геокриологических условий района работ, а также поиске потенциально опасных объектов и неблагоприятных явлений для строительства морской нефтегазовой инфраструктуры.

В полевые сезоны 2020 и 2022 гг. специалисты АО «МАГЭ» на ИС «Акварин» и НИС «Геолог Дмитрий Наливкин» выполнили комплексные инженерно-геологические исследования в южной части шельфа Карского моря (рис. 1). В комплекс геофизических методов входили: сейсморазведка высокого разрешения (СВР), высокочастотное (ВЧ) и низкочастотное (НЧ) непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), электроразведочные работы методом

Электронная почта авторов для переписки:

Базилевич Сергей Олегович, e-mail: sergey.bazilevich@mage.ru
Казанина Марина Алексеевна, e-mail: marina.kazanina@mage.ru
Кочетов Михаил Владимирович, e-mail: kochetov.mv@mage.ru
Жилин Федор Евгеньевич, e-mail: jilin.fe@mage.ru
Шепелев Алексей Андреевич, e-mail: alexsey.shepelev@mage.ruАдрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru<https://elibrary.ru/qcheqz>

ЗСБ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО), гидромагнитная съемка, опытные набортные гравиметрические измерения, а также гидрографические и геотехнические работы. Набортная гравиметрия не входит в стандартный комплекс инженерных геофизических методов.

Площадь каждого участка инженерно-геологических изысканий – 25 км². Измерения проведены на 51 меридиональном и 26 широтных профилях. Расстояние между меридиональными профилями – 100 м, широтными – 200 м. Длина каждого профиля 5 км. На каждом объекте выполнено по 385 пог. км комплексных наблюдений (рис. 1).

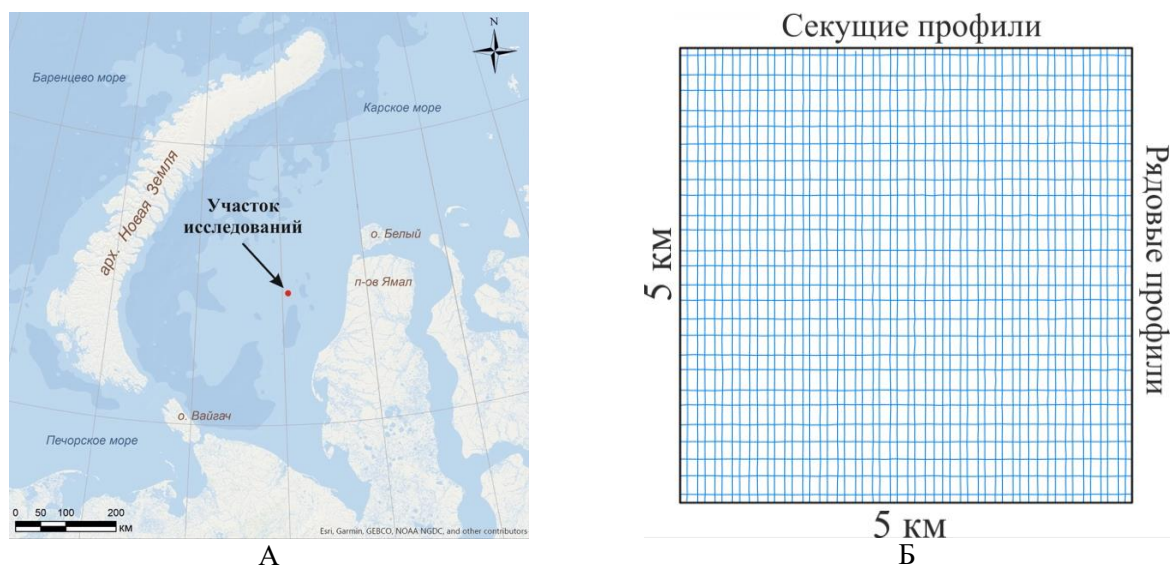


Рис.1. Район проведения работ и съёмочная сеть профилей

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Измерения модуля полного вектора индукции магнитного поля (МП) T проводились магнитометрами SeaSPY2 с огибанием рельефа морского дна. На протяжении всех работ магнитометры удерживались в коридоре глубин 10-20 м от донной поверхности. Точность пространственного позиционирования приборов составила ± 0.5 м. Главная трудность изучения магнитного поля на акваториях, особенно в высоких широтах, связана с учётом геомагнитных вариаций [1,2]. Для учета вариаций МП использовались донные магнитовариационные станции *Sentinel*, установленные непосредственно в районе работ [3,4].

Регистрация данных осуществлялась с частотой дискретизации 1 с. Обработка материалов проводилась в программном комплексе Geosoft Oasis montaj. Фильтрация наблюденных значений МП была минимальной – применялся фильтр Баттеруорта (Butterworth Filter) шириной 15 метров. Аномальное магнитное поле рассчитывалось по формуле:

$$\Delta T_a = T - T_n - \delta T, \tag{1}$$

где T — измеренный модуль полного вектора напряжённости магнитного поля, T_n — нормальное магнитное поле Земли, δT — вариации магнитного поля. По вычисленным значениям аномального магнитного поля в точках пересечения меридиональных и широтных профилей по формуле (2) рассчитывалась средняя квадратичная погрешность (СКП) σ съёмки:

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

где n – количество повторных измерений, δ_i – разность значений поля в точках пересечения профилей. Девиационная составляющая компенсировалась уравниванием съёмки.

СКП гидромагнитной съемки по первой инженерной площадке до уравнивания составила: ± 2.8 нТл, после уравнивания итеративным методом по постоянной составляющей ± 2.0 нТл, после уравнивания полиномами ± 1.2 нТл. СКП гидромагнитной съемки по второй инженерной площадке до уравнивания составила: ± 3.7 нТл, после уравнивания итеративным методом по постоянной составляющей ± 1.5 нТл, после уравнивания полиномами ± 1.1 нТл. По уравненным значениям поля рассчитывались цифровые модели аномального магнитного поля (рис. 2). Ячейка интерполяции цифровых моделей 25 м.

Основные технические сложности измерения ускорения силы тяжести связаны с возмущающими ускорениями подвижного основания. 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 морских набортных съёмок может достигать 0.1 мГал, а точности наземных и донных измерений уже достигают первых десятков мкГал, (10 мкГал = 0.01 мГал) [5,6].

Наблюдения ускорения силы тяжести проводились морским набортным гравиметром «Чекан-АМ» [7]. 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, которая включает в себя расчет поправки за совместное действие горизонтальных ускорений и остаточных наклонов гироплатформы гравиметра, поправки Этвеша, поправки за смещение нуля-пункта, вычисление приращений и аномалий поля силы тяжести. Полученные значения были загружены в базу данных Geosoft Oasis Montaj. Далее по вычисленным значениям аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе в точках пересечения рядовых и секущих профилей рассчитывалась СКП съёмки. Чтобы не потерять низкоамплитудные аномалии по профилям, применялся низкочастотный фильтр Баттерворта с шириной окна 150 метров.

Средняя квадратичная погрешность гравиметрических наблюдений по первой инженерной площадке до уравнивания составила ± 0.2 мГал, после уравнивания по постоянной составляющей ± 0.1 мГал, после уравнивания полиномами ± 0.1 мГал. Средняя квадратичная погрешность гравиметрических наблюдений по второй инженерной площадке до уравнивания составила ± 0.5 мГал, после уравнивания по постоянной составляющей ± 0.2 мГал, после уравнивания полиномами ± 0.1 мГал. По уравненным значениям поля рассчитывались цифровые модели аномалий поля силы тяжести в редукции свободный воздух в условном уровне. Ячейка интерполяции цифровых моделей 25 метров. Для исключения из цифровых моделей остаточных помех не геологической природы применялся пересчёт поля в верхнее полупространство на высоту 50 метров (рис. 3).

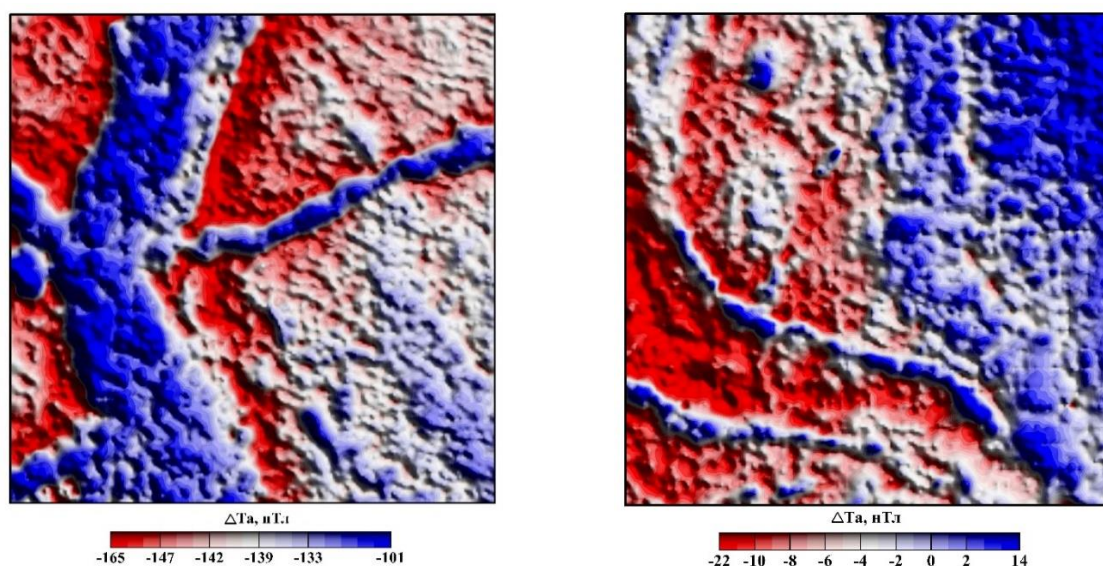


Рис. 2. Цифровые модели аномального магнитного поля

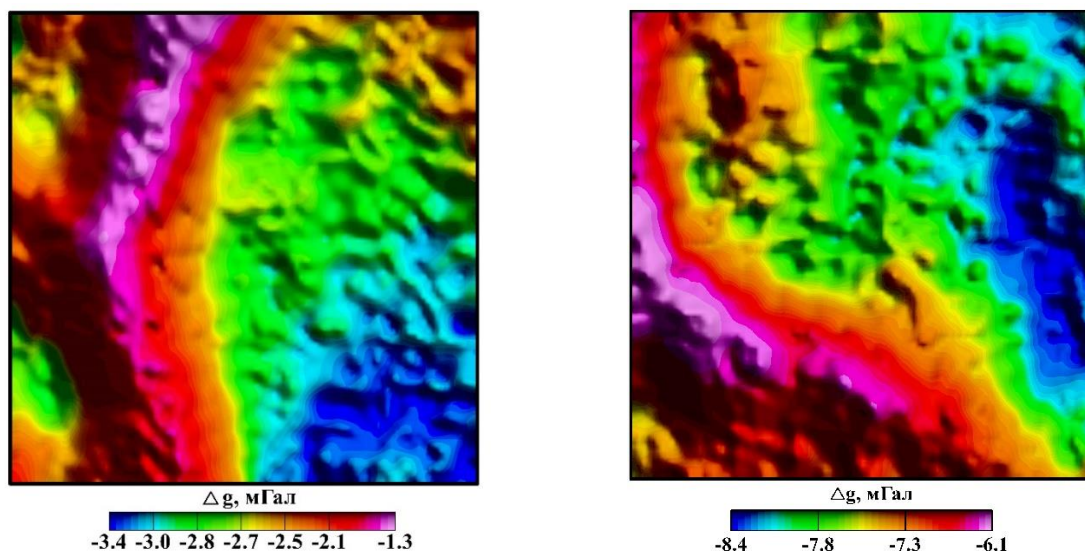


Рис. 3. Цифровые модели аномалий поля силы тяжести в редукции свободный воздух (уровень условный)

По данным многолучевого эхолотирования были получены цифровые модели рельефа морского дна (рис. 4). На первой инженерной площадке глубина моря находится в диапазоне от -71 до -86 метров, на второй от -102, до -142 м. При визуальном сравнении цифровых моделей аномалий поля силы тяжести и рельефа морского дна, зависимость гравитационных аномалий от неровностей рельефа не установлена, что свидетельствует о низко плотных донных отложениях морского дна.

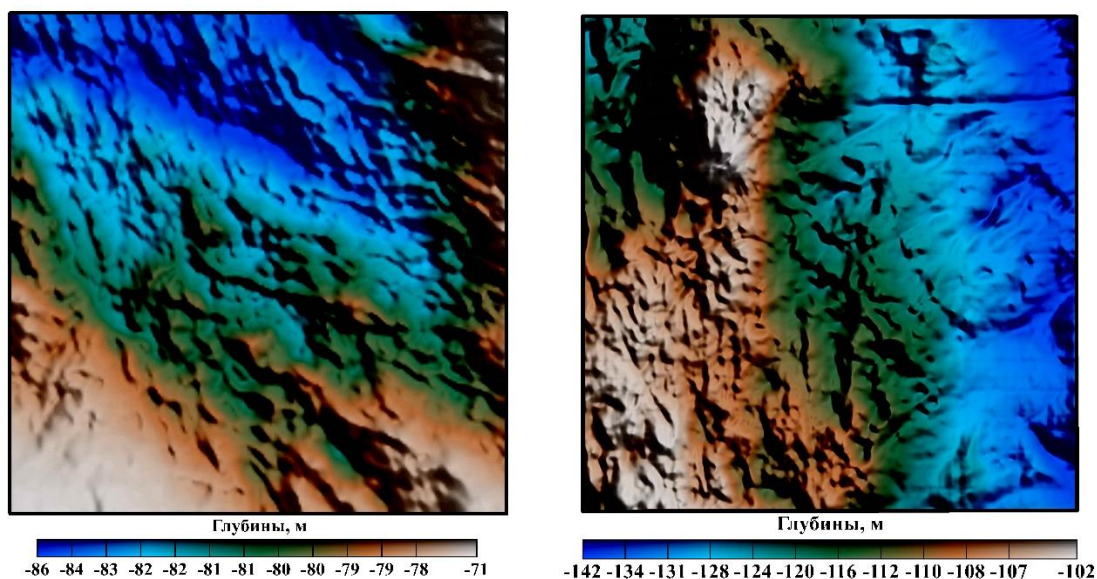


Рис. 4. Цифровые модели рельефа морского дна по данным многолучевого эхолотирования

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Сопоставление цифровых моделей потенциальных полей, построенных по сводным актуализированным данным геофизической основы третьего поколения по листам S-41,42, с потенциальными полями инженерных съёмок, отображает разную степень детальности наблюдений (рис. 5, 6) [8]. Разница в детальности сопоставляемых карт очевидна, в границах инженерных площадей прорезаются особенности тонкой структуры аномального магнитного и гравитационного поля. Выделяются неоднородности строения верхней части разреза осадочного чехла.

Точности сравниваемых гидромагнитных съёмок отличаются в 2 раза. СКП общей базы магнитометрических данных геофизической основы составляет ± 2.3 нТл. Аномалии поля силы тяжести имеют СКП ± 1.6 мГал. Улучшение сводной цифровой модели возможно лишь за счёт более детальных или достоверных площадных наблюдений.

Площади инженерных исследований расположены в пределах высокоградиентных зон аномального магнитного и гравитационного поля с основным меридиональным и субмеридиональным направлением изоаномал (рис. 2, 3). Практически всю западную часть районов работ занимают положительные линейные аномалии, чётко проявленные как в гравитационном, так и в магнитном поле. Амплитуды аномалий на порядок превышают погрешности наблюдений. На расчётных цифровых моделях АМП зелёным контуром трассированы положительные аномалии (рисунки 5, 6). Сравнивая рисунки 5 и 6, очевидна прямая корреляция потенциальных полей. Выделенные неоднородности отражают геологические особенности и процессы в осадочном чехле.

К распространённым опасным геологическим объектам на Арктическом шельфе Карского моря можно отнести: области развития предположительно мерзлых грунтов, палеоврезы и палеодепрессии, а также интервалы разреза с повышенной газонасыщенностью. Гравиметрия и магнитометрия являются косвенными методами геофизики. Только по их результатам, нельзя однозначно судить о природе геологических образований. В данном случае, привлечение сейсмоакустических данных позволило установить, что положительные аномалии потенциальных полей приурочены к палеоврезам [9-11].

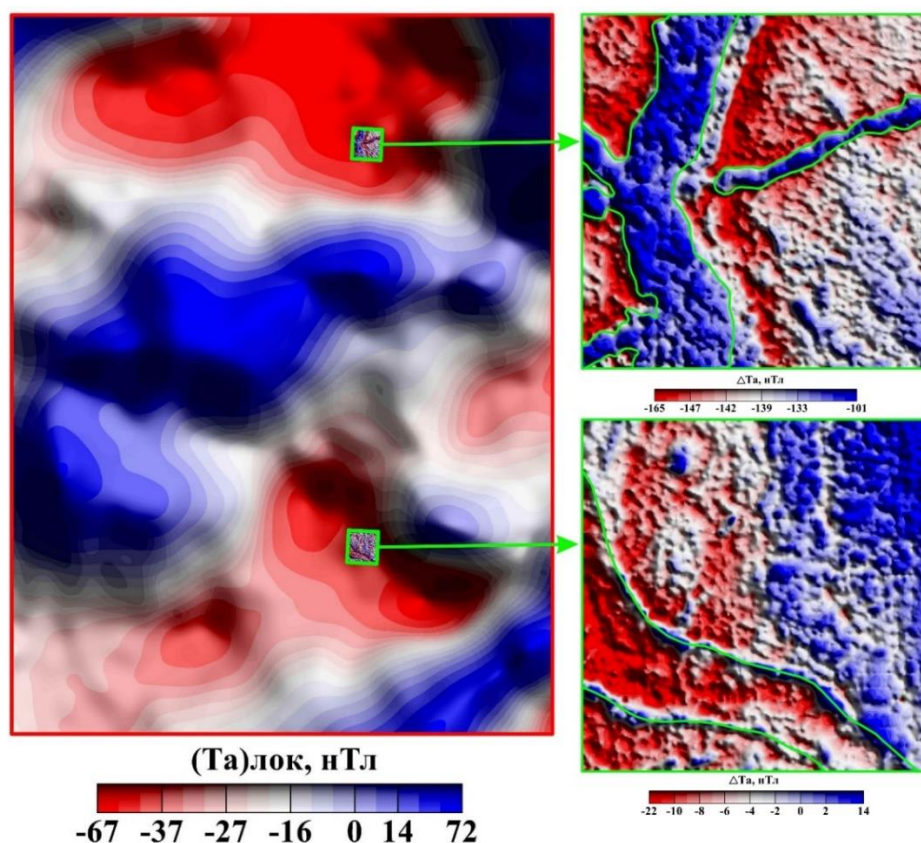


Рис. 5. Сопоставление актуализированных данных геофизической основы и участков инженерных изысканий в южной части шельфа Карского моря. Зелёным контуром выделены границы палеоврезов

Отрицательные аномалии поля силы тяжести, проявленные в восточной части участков инженерных изысканий, также представляют интерес. Низкоплотные неоднородности могут быть связаны с газонасыщенностью пород разреза. Данные области могут представлять опасность для постановки буровой платформы.

Данное сопоставление наглядно демонстрирует необходимость проведения высокоточных гравиметрических и гидромагнитных исследований с соблюдением и учётом всех методических особенностей измерений, описанных нами в работах. Аномальное магнитное поле инженерных съёмок

по регулярной сети наблюдений с повторением рельефа дна позволяет по-новому взглянуть на уже исследованные районы и изучить их геологические особенности. Аномалии поля силы тяжести дают представление о плотностном распределении пород. Комплексирование потенциальных методов с сейсморазведкой позволяет проводить плотностное и геомагнитное моделирование, для установления природы неоднородностей. Потенциальные методы геофизики хорошо дополняют и подтверждают друг друга.

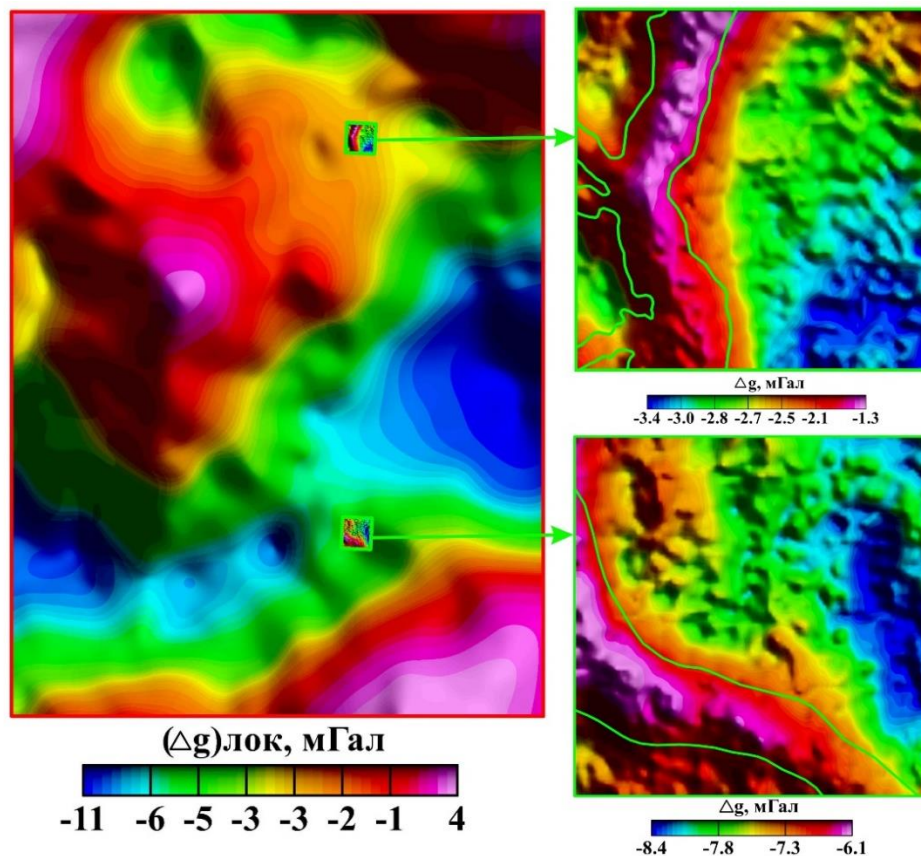


Рис. 6. Сопоставление актуализированных данных геофизической основы и участков инженерных изысканий в южной части шельфа Карского моря. Зелёные контуры - границы палеоврезов, выделенные по магнитометрическим данным

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективное решение геолого-геофизических задач при выполнении инженерно-геологических изысканий на арктическом шельфе базируется на комплексном подходе к интерпретации потенциальных методов геофизики и данных сейсморазведки. Высокоточные гидромагнитные и гравиметрические съёмки позволяют обнаруживать малоамплитудные аномалии, источники которых залегают в верхней части разреза, и детально трассировать их границы в плане. Картирование локальных неоднородностей позволяет получить более целостную картину о геологической обстановке арктических акваторий.

Выполненные высокоточных гравиметрических исследований в рамках морских инженерных изысканий позволяет выявлять аномалии, не локализованные на сейсмических профилях, т.е. вероятнее всего потерянных в результате обработки либо же в процессе интерпретации сейсмических данных. При минимальных экономических затратах можно получить значительный прирост объема геофизических данных для дальнейшей комплексной интерпретации геофизических материалов, что в свою очередь позволяет повысить достоверность итоговых результатов работ. Также включение гравиразведки в стандартный комплекс методов при морских инженерных позволит повысить необходимость привлечения новых рабочих мест для отраслевых специалистов.

Приведенные в статье результаты измерений потенциальных полей показали высокую эффективность методов при локализации палеоврезов и трассировании их границ. Высокоточная аппаратура позволяет изучать тонкую структуру геофизических полей, повышает требовательность к обработке и интерпретации наблюдений, тем самым ставит новые задачи перед геофизиками. Информация о тонкой структуре потенциальных полей детализирует региональные модели геомагнитного и гравитационного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магнитометрия / М.: Недра, 1986. 232 с.
2. Кочетов М.В., Журавлёв В.А. Оптимизация методики дифференциальной гидромагнитной съемки // Вестник Воронеж гос. ун-та. Сер: Геология. 2018. № 2. С. 127–131.
3. 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. – Том XV. – № 3-4, – С. 32-41.
4. Шепелев А.А., Коснырева М.В. Измерения вариаций магнитного поля Земли в акватории Карского моря с помощью мобильной магнитовариационной станции // Гелиогеофизические исследования, 2023, № 38, с. 54-60.
5. Кривошея К.В., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Широкова Т.П. Решение задач нефтегазовой геологии возможности современной гравиразведки и магниторазведки // Neftegaz.ru. – 2019. – № 1. – С. 66 – 72.
6. Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общей ред. В.Г. Пешехонова; науч. редактор О.А. Степанов. СПб.: ГНЦ РФ. АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". – 2017. – 390 с.
7. Журавлёв В.А., Чельшев С.В., Кочетов М.В. Опыт использования гравиметра Чекан и перспективы развития морской гравиметрии в ОАО МАГЭ. В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова. Воронеж, 2020. – С. 124-127.
8. Шкарубо С.И., Зархидзе Д.В., Красножен А.С., Руденко А.А. Геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Южно-Карская. Лист S-41,42 (зал. Русанова, о-в Белый), 2022.
9. Казанин А.Г., Шепелев А.А., Коснырева М.В., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., Кочетов М.В. Комплексирование данных сейсморазведки и магниторазведки при анализе палеоврезов и палеопонижений шельфа Карского моря // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – № 3. – С. 131-139.
10. Кочетов М.В., Шепелев А.А., Чельшев С.В. Возможности набортных гравиметрических и гидромагнитных исследований при решении инженерно-геологических задач на шельфе // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2023. – № 3. – С. 88-97.
11. Кочетов М.В. Гидромагнитные исследования при решении инженерно-геологических задач на арктическом шельфе // Двадцать четвёртая уральская молодёжная научная школа по геофизике: Сборник науч. Материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. – С. 99-103.

HIGH-PRECISION HYDROMAGNETIC AND ONBOARD GRAVIMETRIAL SURVEY DURING SITE SURVEYS ON THE SHELF

Bazilevich S.O., Kazanina M.A., Kochetov M.V., Zhilin F.E., Shepelev A.A.

The article discusses the possibilities of using hydromagnetic surveys in combination with on-board gravimetry during engineering-geological surveys on the Arctic shelf in order to identify potentially dangerous zones for the construction of offshore oil and gas industry structures. As a result of a comprehensive interpretation of hydromagnetic and gravimetric data, heterogeneities in the upper part of the sedimentary cover were studied, and the areas of distribution of paleo-incisions were identified.

KEYWORDS: HYDROMAGNETIC SURVEY, ONBOARD GRAVIMETRY, SITE SURVEYS, PALEO-INCISIONS