



УДК 550.389

## ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ МОБИЛЬНОЙ МАГНИТОВАРИАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

А.А. Шепелев<sup>1</sup>, М.В. Коснырева<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье рассмотрены результаты измерений вариаций магнитного поля, полученные мобильной магнитовариационной станцией (МВС), установленной в акватории Карского моря. Приведены результаты площадных гидромагнитных исследований, выполненных с целью изучения неоднородностей в верхней части осадочного чехла. Показаны преимущества методики выполнения гидромагнитной съемки с применением донной магнитовариационной станции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** МАГНИТОВАРИАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ, ГИДРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА; ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

DOI 10.5425/2304-7380\_2022\_38\_53

<https://elibrary.ru/esuber>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Гидромагнитной съемкой (ГМС) называют измерения магнитного поля Земли на поверхности или в глубине акваторий. Данные измерения выполняются с движущихся судов или стационарных носителей. Гидромагнитная съемка решает самые разнообразные геологические задачи, относящиеся к изучению строения дна акваторий, поискам месторождений полезных ископаемых, а также служит для общего изучения магнитного поля Земли (МПЗ) — при исследованиях главного МПЗ и магнитных вариаций, в том числе вековых [1,2].

Выделение гидромагнитных съемок в особый вид объясняется спецификой практической реализации измерений (учет магнитных вариаций, определение координат, полей относимости, методика геологической интерпретации). На сегодняшний день, гидромагнитная съемка зарекомендовала себя при картировании подводных вулканов в морях, поисках залежей углеводородов в условиях арктического шельфа, а также обнаружении металлических объектов: трубопроводов, кабелей и затонувших судов на акваториях.

Морская магнитометрическая съемка на сегодняшний день является неотъемлемой частью детальных инженерно-геофизических изысканий (ИГИ) при изучении верхней части разреза осадочной толщи [3]. Задачей магниторазведки в комплексе ИГИ традиционно является поиск отдельных магнитных аномалий, связанных с железосодержащими объектами техногенной природы, представляющими потенциальную опасность при постановке буровых платформ. Однако, при условии

Электронная почта авторов для переписки:

Шепелев Алексей Андреевич, e-mail: shepelev-and@mail.ru  
Коснырева Мария Павловна, e-mail: m.kosnyreva@yandex.ruАдрес редакции журнала  
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»  
129128; Россия, Москва  
ул. Ростокинская, 9.  
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

выполнения гидромагнитной съемки с высокой точностью, ее возможности существенно расширяются, позволяя картировать слабоамплитудные (первые нТл) аномалии магнитного поля, связанные с неоднородностью геологического строения верхней части осадочного чехла (палеоруслы и палеоврезы).

В данной работе рассматриваются результаты площадных морских геофизических работ на территории Арктического шельфа в Карском море, выполненных специалистами АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО "МАГЭ") на собственном научно-исследовательском судне «Геолог Дмитрий Наливкин» (рис. 1, 2).

Особое внимание уделяется вопросу повышения точности гидромагнитной съемки и, следовательно, увеличению достоверности получаемых результатов.



Рис. 1. Научно-исследовательское судно «Геолог Дмитрий Наливкин»

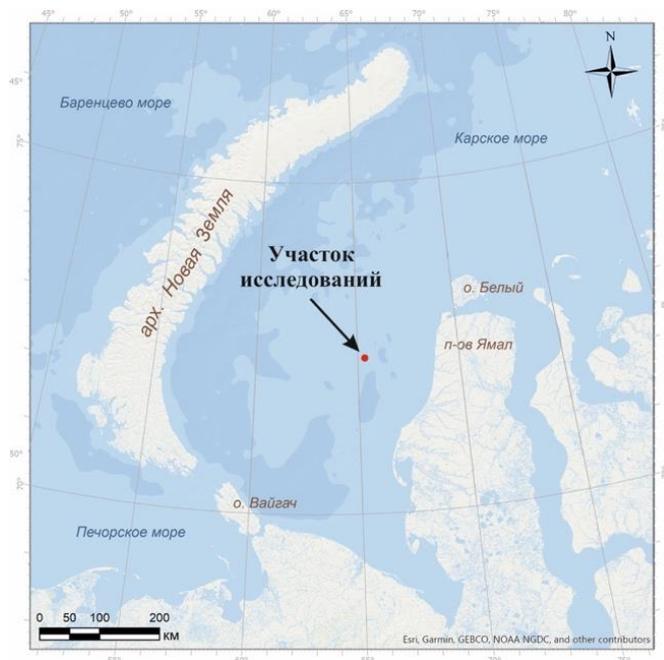


Рис. 2. Местоположение района работ

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Гидромагнитная съемка в рамках инженерных изысканий для строительства объектов на континентальном шельфе и последующего мониторинга их технического состояния выполняется в комплексе с широким набором геофизических и гидрографических методов, с учётом методических положений, соответствующих норм и стандартов [3] (рис. 3).

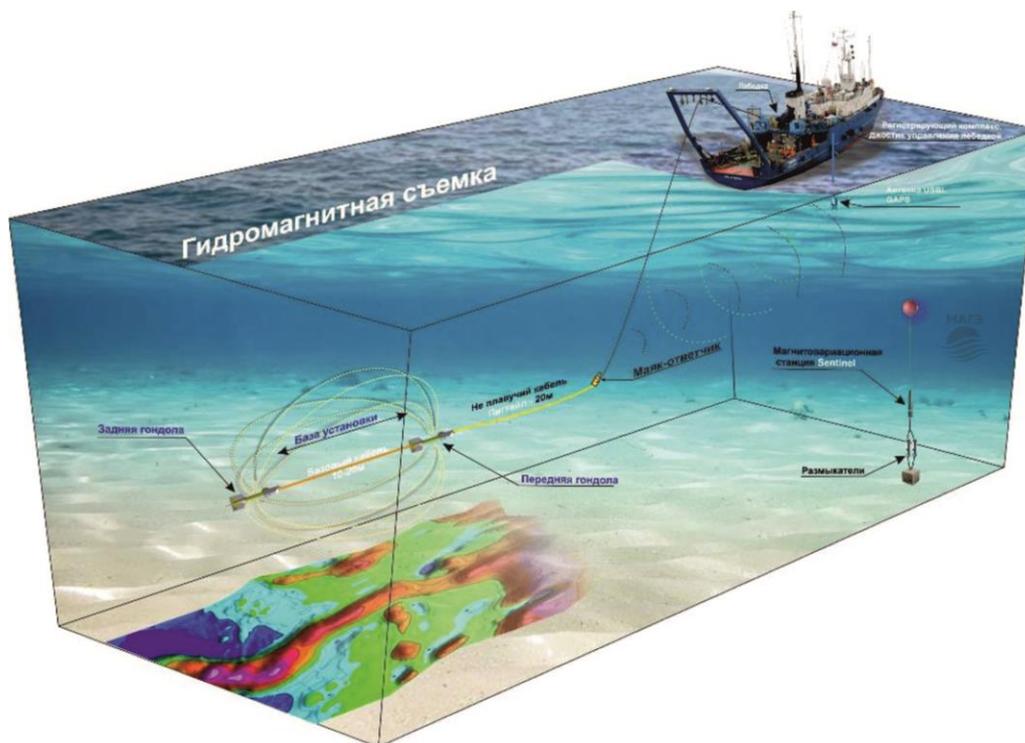


Рис. 3. Схема буксировки продольного градиентометра

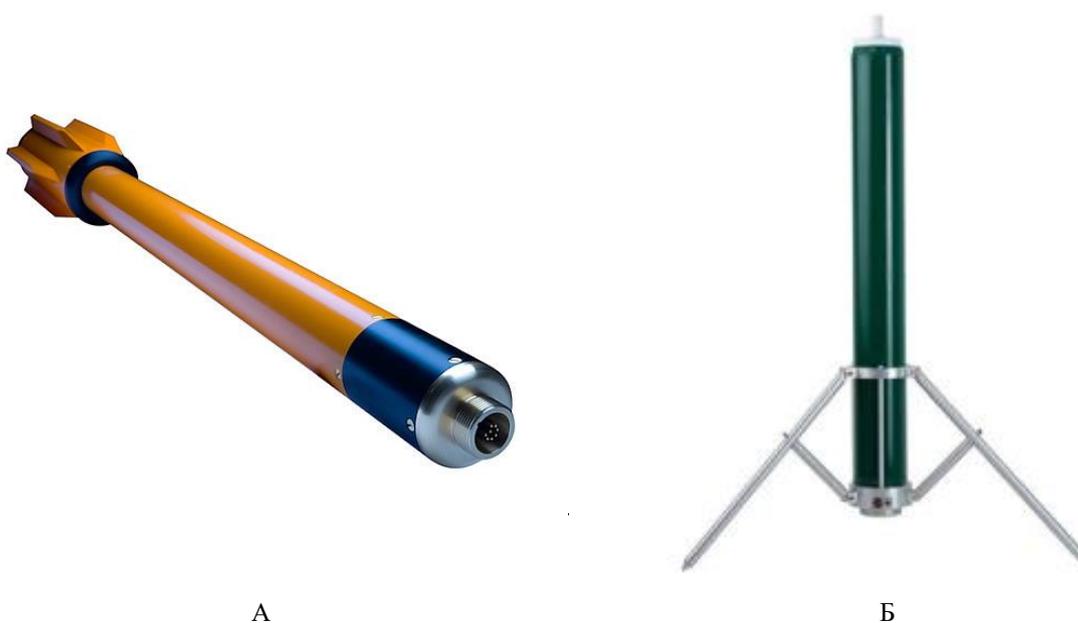


Рис. 4. Морской магнитометр SeaSPY2 (А), MBC Sentinel (Б)

Традиционно морская магнитная съемка для выполнения задач морских инженерных изысканий осуществляется по дифференциальной методике. Съемка по данной методике производится продольным градиентометром, состоящим из двух магнитометров, буксируемых друг за другом на фиксированном расстоянии (база градиентометра). При выполнении рассматриваемых работ данный параметр равняется 11,5 м. Главной особенностью указанного вида съемки является необходимость восстановления магнитного поля по градиенту с учетом вычисленной девиации.

Для выполнения площадной гидромагнитной съемки использовались магнитометры SeaSPY2 (рис. 4А). Для получения данных, свободных от влияния солнечно-суточных вариаций, использовалась магнитовариационная станция Sentinel (рис. 4Б), установленная на морском дне.

Морской магнитометр SeaSPY2 состоит из наборного регистрирующего устройства и заборной части. Измерение магнитного поля происходит внутри заборной буксируемой гондолы, где уровень полезного сигнала максимален из-за отсутствия внешних помех. Принцип работы магнитометра SeaSPY2 основан на использовании эффекта Оверхаузера (высокочувствительный всенаправленный датчик), который измеряет внешнее магнитное поле при помощи особого алгоритма технологии ядерного магнитного резонанса. Датчики SeaSPY2 обеспечивают точность  $\pm 0,1$  нТл. Для определения высоты (альтитуды) датчика над дном в магнитометре установлен альтиметр – высокоточный эхолот 200 кГц. Дополнительно магнитометр снабжен датчиком давления, который позволяет определять расстояние от водной поверхности до магнитометра.

При выполнении гидромагнитной съемки следует учитывать тот факт, что судно, с которого производится съемка само по себе обладает большой магнитной массой, и может создавать аномалии в несколько раз превосходящие аномалии от целевого объекта. Для устранения влияния судна на данные магнитного поля, магнитометры буксируются на удалении от кормы равном не менее трех длин судна (~200 метров) [1,2,4,5]. Магнитометры буксировались на высоте 5-7 м над морским дном. Такая высота с одной стороны позволяет безопасно буксировать датчики магнитометра, с другой стороны выявлять даже самые незначительные аномалии, связанные с неоднородностью осадочного чехла. Запись магнитометрических данных ведется с частотой 1 Гц, что при средней скорости судна в 3 узла соответствует шагу съемки по профилю 1,5 м. Точность измерений (полученных данных) проверялась в точках пересечения рядовых профилей с секущими.

Учет солнечно-суточных вариаций магнитного поля Земли является главной трудностью при проведении гидромагнитных измерений, поскольку стационарные магнитовариационные обсерватории в большинстве случаев располагаются на большом удалении от проектного местоположения работ [6]. Поэтому для решения поставленной задачи была разработана и применена методика съемки, подразумевающая использование МВС на территории района работ для исключения операции восстановления поля. Для осуществления измерений вариаций магнитного поля в районе работ на дне была установлена магнитовариационная станция марки Sentinel (рис. 4Б), которая представляет собой полностью автономную станцию долгосрочного наблюдения магнитного поля, использующая всенаправленный датчик Оверхаузера с низким энергопотреблением, который размещен в герметичном корпусе. Вариационная станция располагалась на расстоянии 3 км от границы исследуемой площади для исключения влияния судна на ее показания (рис. 5). МВС была установлена непосредственно перед началом проведения основного этапа исследований, время измерений на магнитометре и станции было синхронизировано с точностью до 1 с в результате интерполяции данных МВС. Автономные непрерывные измерения вариационного магнитного поля выполнялись с периодом 1 мин. Магнитовариационная станция осуществляла запись вариационного магнитного поля на протяжении всего периода выполнения гидромагнитных исследований, в связи с указанным фактом период измерений МВС был выбран с целью обеспечения бесперебойной работы станции на протяжении всего рейса. Данный вид работ длился на протяжении порядка двух недель с учетом погодных условий.

На рисунке 5 приведена схема расположения рядовых и секущих профилей с обозначением местоположения МВС. Расстояние между рядовыми профилями 100 м, между секущими 200 м, запись магнитных данных осуществлялась с частотой дискретизации равной 1 с. Общий объем выполненных гидромагнитных исследований составил 380 пог. км. Общее количество измерений в точках пересечений составило 1326.

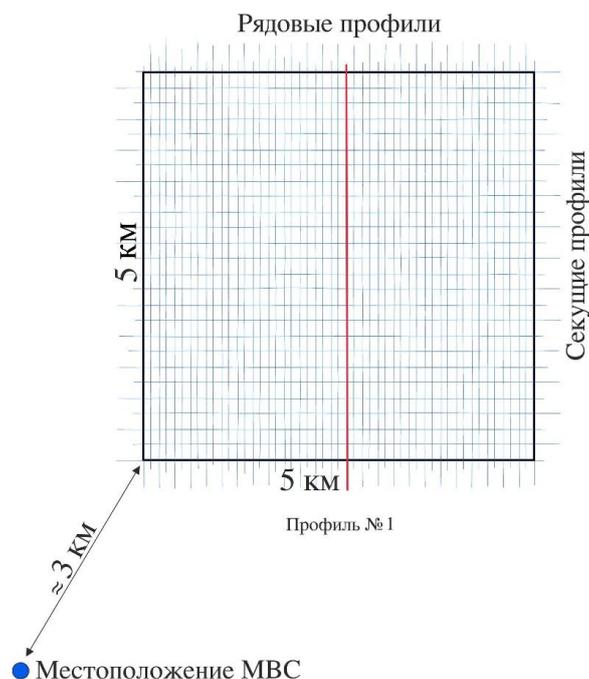


Рис. 5. Схема расположения МВС на карте фактического материала дифференциальной магнитной съемки на участке исследований с выделенным профилем № 1

### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ГИДРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

Камеральная обработка гидромагнитных данных выполнялась в программном обеспечении Oasis Montaj 7.2 (Geosoft) по следующему алгоритму:

1. фильтрация полевых данных нелинейным фильтром для подавления случайных помех, а также фильтром низких частот для исключения высокочастотной помехи;
2. учет измеренных вариаций магнитного поля;
3. расчет аномального магнитного поля;
4. вычисление невязок в точках пересечения профилей и уравнивание сети гидромагнитных наблюдений итеративным способом с помощью специализированного модуля.

Солнечно-суточные вариации принято строить в координатных осях значений магнитного поля и времени измерений. На рисунке 6 приведен пример графика солнечно-суточных вариаций в течение одних суток, где по оси  $y$  отложены значения вариаций магнитного поля  $\delta T$  в нТл, а по оси  $x$  – время съемки. Далее для каждого профиля, пройденного на участке работ в этот день, соотносились соответствующие значения солнечно-суточных вариаций по началу и концу времени съемки (рис. 7). Анализ графика вариаций показывает, что в период от 0:00 часов до 15:00 часов магнитное поле очень слабо менялось во времени и амплитуда возмущений составляла не более  $\pm 20$  нТл. Начиная с 16:00 часов наблюдаются более резкие изменения поля магнитных вариаций до  $\pm 100$  нТл. Такая форма магнитных возмущений называется «магнитная бухта» и очень характерна для приполярных широт, в которых выполнялись исследования. Данный вид вариаций, при их недоучете, вносит значительные искажения в наблюдаемое магнитное поле, что в свою очередь приводит к существенному снижению точности работ.

На рисунке 7 представлен график исходных вариационных данных магнитного поля  $\delta T$  вдоль профиля №1. По оси  $y$  отложены значения вариаций магнитного поля  $\delta T$  в нТл, по оси  $x$  – время съемки. Данные МВС, кроме значений солнечно-суточных магнитных вариаций, имеют сведения о времени каждого измерения, на каждом профиле магнитометры записывали значения магнитного поля в каждой точке профиля с частотой 1 с. Во время обработки данные синхронизировались между собой по времени записи. Красной линией на графике (рис. 7) показаны исходные магнитовариационные данные после процедуры сглаживания.

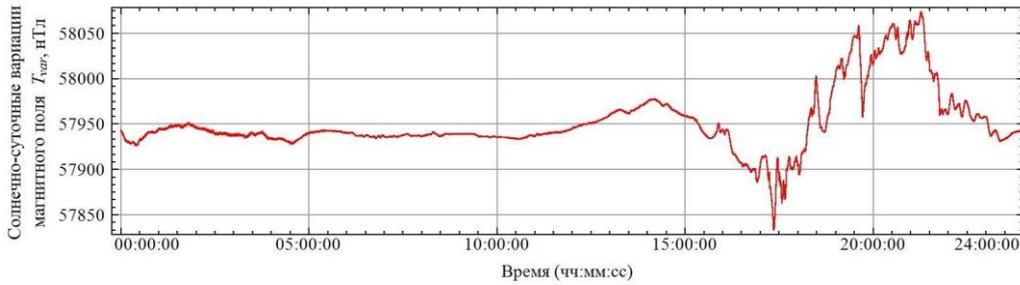


Рис. 6. Графики солнечно-суточных вариаций магнитного поля в течение одних суток

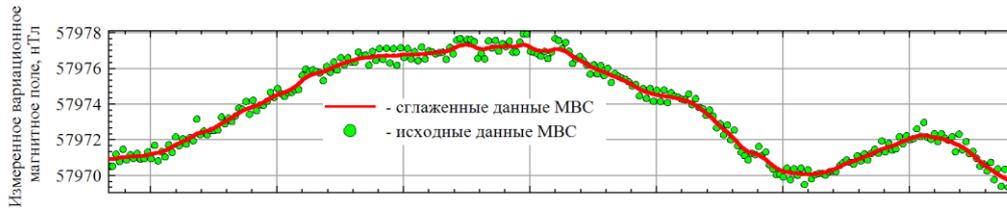
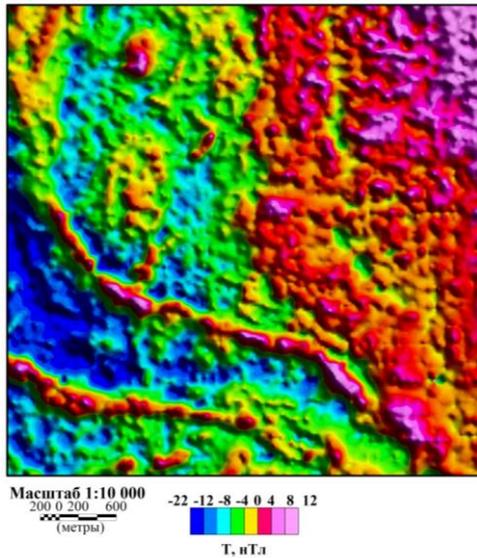
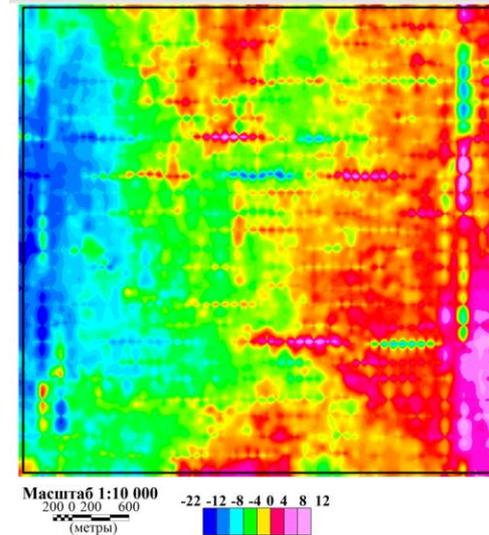


Рис. 7. Измеренное поля вариаций для профиля №1

Рис. 8. Карта аномального магнитного поля (по результатам обработки с привлечением данных МВС – СКП  $\pm 1,12$  нТл)Рис. 9. Карта аномального магнитного поля (по результатам обработки градиента магнитного поля – СКП  $\pm 8,08$  нТл)

В результате выполнения этапа камеральной обработки была построена цифровая карта аномального магнитного поля с учтенными вариациями магнитного поля. Среднеквадратичная погрешность при использовании МВС составила  $\pm 1,12$  нТл, что позволяет считать достоверными магнитные аномалии с амплитудой более 3 нТл.

На рисунке 8 приведена карта аномального магнитного поля участка исследования. Высокоинтенсивных аномалий, связанных с техногенными объектами, в исследуемом районе выявлено не было. При качественном анализе карты аномального магнитного поля отчетливо прослеживаются плавное увлечение значений магнитного поля от  $-22$  нТл до  $12$  нТл в северо-восточном направлении. На фоне этого увеличения прослеживаются узкие (шириной до 200 метров) линейные магнитные аномалии преимущественно северо-западного простирания и протяженностью 3000 - 4000 метров. Амплитуда локальных положительных аномалий составляет в среднем 6-10 нТл, максимум 14 нТл. Форма и интенсивность выявленных аномалий позволяет предположить, что они связаны с древними палеоврезами (погребенными речными долинами). Данные геологические

структуры широко распространены в пределах шельфа Карского моря и являются одним из ключевых объектов поиска при выполнении комплекса инженерно-геологических изысканий.

Для примера на рисунке 9 приведена карта аномального магнитного поля исследуемого участка, построенная по результатам стандартной обработки данных градиента магнитного поля без учета данных МВС. Как видно из рисунка, при такой обработке, локальных аномалий геологической природы, аналогичных с вышеописанными выявить не удастся.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Анализ графиков вариаций, полученных мобильной магнитовариационной станцией Sentinel показал наличие интенсивных (до  $\pm 100$  нТл) возмущений магнитного поля, которые в обязательном порядке необходимо учитывать при проведении гидромагнитной съемки.

2. Использование данных магнитовариационной станции позволяет более чем в 7 раз уменьшить среднеквадратичную ошибку гидромагнитной съемки, что существенно повышает достоверность проведенных магниторазведочных работ.

3. Выявлены слабоинтенсивные (до 14 нТл) локальные магнитные аномалии геологической природы, связанные с древними палеоврезами (погребенными речными долинами) представляющие потенциальную опасность при возведении инженерных сооружений в акваториях.

На основании представленных материалов при выполнении инженерно-геофизических изысканий на шельфе, можно рекомендовать проведение дифференциальной магнитной съемки с использованием МВС для существенного повышения точности работ и расширения возможности магнитной съемки в комплексе ИГИ.

Использование мобильных МВС при выполнении площадных гидромагнитных исследований в рамках инженерно-геофизических изысканий позволит изучить и уточнит геомагнитного обстановку арктического шельфа. Применение МВС в северных широтах поможет ученым решать различные гелиогеофизические и геолого-геофизические задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Магниторазведка: Справочник геофизика/Под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. — 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Недра, 1990.- 470 с.: ил. ISBN 5-247-00487-6.
2. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Булычев А.А., Кузнецов К.М., Минлигареев В.Т. Инструментальное определение положения Южного магнитного полюса Земли в кругосветной антарктической экспедиции на ОИС ВМФ Адмирал Владимирский. Физика Земли, 2(2):27–40, 2022. DOI: 10.31857/S0002333722020065.
3. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений.
4. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съёмка, аэромагнитная съёмка, гидромагнитная съёмка)/М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1981. – 263 с.
5. Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия, Санкт-Петербург, 2002.
6. Shepelev A.A., Zhilin F.E., 2021. 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 and Engineers, Issue 1, pp. 1-7, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152018>.

#### MEASUREMENTS OF EARTH'S MAGNETIC FIELD VARIATIONS IN THE KARA SEA WATER AREA USING A MOBILE MAGNETIC VARIATION STATION

Shepelev A.A., Kosnyreva M.V.

The article considers the results of measurements of magnetic field variations obtained by a mobile magnetic variation station (MVS) installed in the waters of the Kara Sea. The results of areal hydromagnetic surveys carried out to study heterogeneities in the upper part of the sedimentary cover are presented. The advantages of the hydromagnetic survey method with the use of a bottom magnetic variation station are shown.

**KEYWORDS:** MAGNETIC VARIATION STATION (MVS), HYDROMAGNETIC SURVEY; MAGNETIC FIELD VARIATIONS