

Способ измерения горизонтального градиента магнитного поля в водной среде и устройство для его реализации: буксируемый компонентный магнитометр

Любимов В.В.
ИЗМИРАН

ВВЕДЕНИЕ

Градиентометрический метод изучения магнитного поля Земли (МПЗ) является одним из основных методов, которые используются при проведении гидромагнитной съёмки (ГМС). Он реализуется методом синхронного измерения значений модуля или составляющих вектора магнитной индукции (ВМИ) датчиками, разнесёнными на некоторое расстояние («измерительную базу» - ИБ), и последующего вычисления градиента поля в направлении этой ИБ. Отношение приращения модуля и составляющих ВМИ к расстоянию между измерительными точками (датчиками) позволяет оценивать производную поля по направлениям векторов, которые соединяют эти измерительные точки. Градиентометрический метод съёмки реализует высокую разрешающую способность и чувствительность к локальным аномалиям МПЗ. При этом главным его преимуществом является возможность получения наблюдений и данных, которые свободны от влияния геомагнитных временных вариаций.

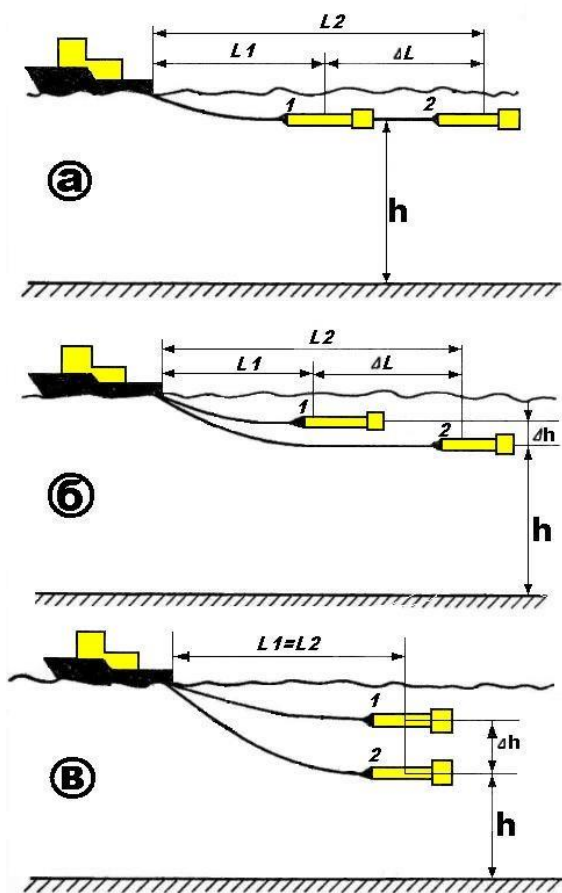


Рис.1. Схемы буксировки гондол при измерении градиента магнитного поля.

Традиционными классическими схемами измерений, которые используются при проведении градиентометрических исследований в водной среде, являются примеры, которые показаны на *рис.1* и описаны в работах [1-10]. Схема буксировки, показанная на *рис.1а*, используется также и при проведении исследований с «жёсткой» ИБ. Все эти схемы буксировки погружных гондол (ПГ) имеют различные недостатки, которые сказываются в той или иной степени на качестве, достоверности и погрешности проводимых измерений в водной среде. Одним из таких недостатков, которым обладают все показанные на *рис.1* методы измерений градиента при ГМС, является наличие такого параметра как «шум ИБ» (ΔL и Δh), который иногда существенным образом влияет на точность измерений особенно при исследовании на полигонах и акваториях с небольшими значениями аномальных полей или на больших глубинах.

Амплитуда «шума ИБ» формируется от нескольких переменных (и непредсказуемых) параметров, которые, как правило, определяются только экспериментальным путём и в процессе ГМС. К таким переменным влияющим факторам относится в первую очередь магнитный момент судна-буксировщика и его влияние при различных курсах на обе ПГ, удалённые на разное расстояние от кормы. Также влияющими факторами на погрешность измерений являются параметры буксировки ПГ: волнение моря, глубина погружения, скорость буксировки, стабильность хода и амплитуда «рыскания» гондол [2-5, 7, 10].

Кроме того, влияющими на величину «шума ИБ» факторами (которые вносят погрешность в измерение градиента в водной среде) являются ориентационные характеристики применяемых в градиентометрах (в их ПГ) магниточувствительных датчиков (МЧД) [1-4]. На *рис.2* представлены различные примеры влияния судна-буксировщика на результаты измерений градиента поля и «шумов ИБ» при ГМС (рисунки взяты из публикаций [1, 2, 9, 10]). В зависимости от параметров буксировки и применяемых схем буксировки (длины буксировочных кабелей ПГ), амплитуды «шума ИБ» $G_{\text{шум}}$ могут достигать значений от 1...2 нТл (см. *рис.2б*, *рис.2д*, *рис.2е*) до 7...10 нТл (*рис.2г*) и более. Эту погрешность измерений некоторым образом можно снизить путём применения цифровой фильтрации данных $G_{\text{фильтр}}$ (как это показано на *рис.2е*, кривая 2) при помощи последующей их обработки с помощью персонального компьютера (ПК). Однако это действие в большей степени относится только к модульным магнитометрам, чем при измерении компонент ВМИ и их градиента при ГМС.

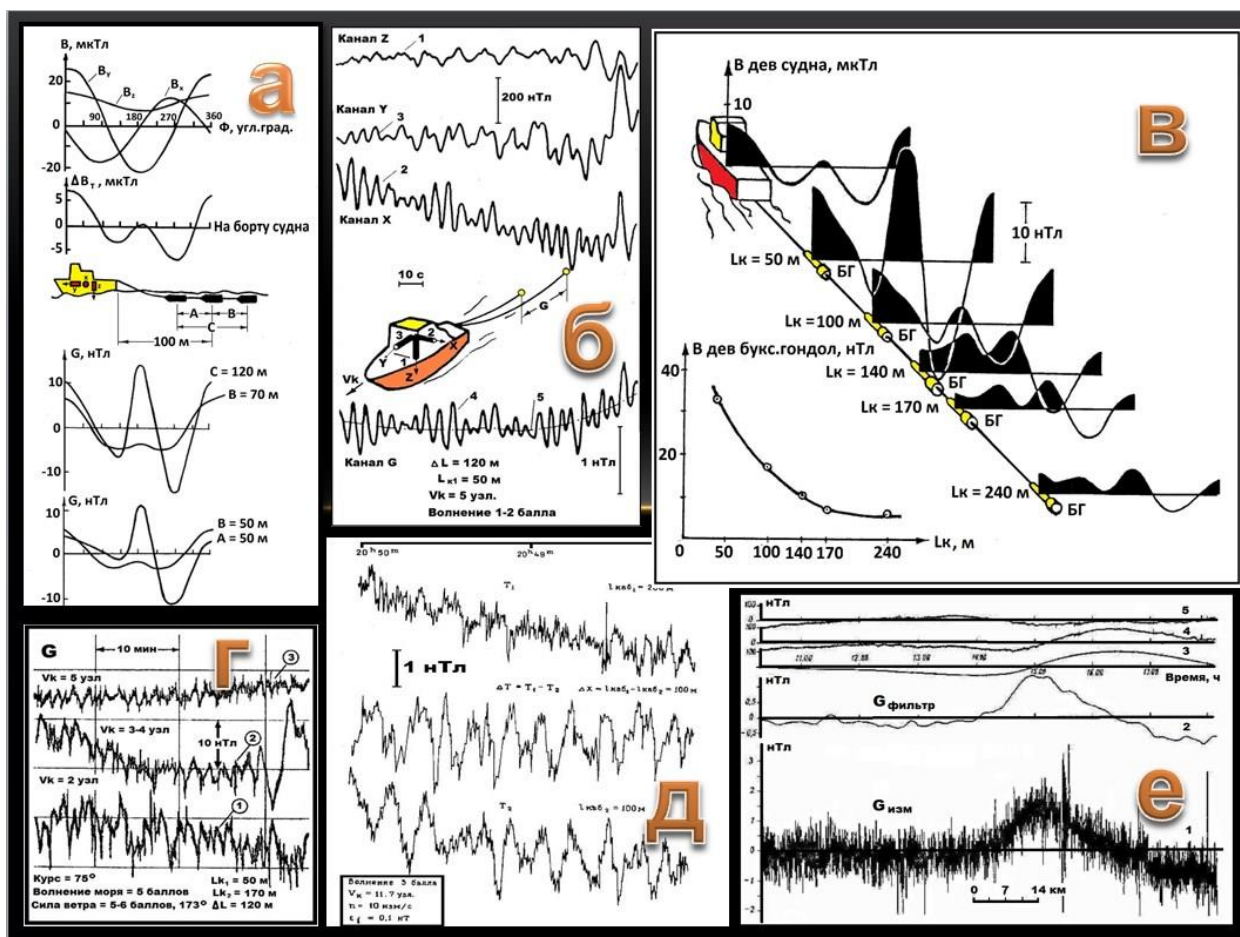


Рис.2. Результаты методических работ при измерении градиента магнитного поля на море с применением буксируемых гондол при ГМС.

На *рис.2а* и *рис.2в* показаны примеры влияния магнитной массы корабля-буксировщика на результаты измерений градиента G в процессе ГМС. Девиационные характеристики (изменение магнитного момента судна на различных курсах его движения относительно ИБ) представлены измерениями на борту судна (модульные и компонентные) и в градиенте на различных длинах ИБ и различном удалении от кормы. На *рис.2б* показан фрагмент записи составляющих ВМИ при помощи компонентного феррозондового магнитометра установленного на борту судна идущего со скоростью 5 узлов (при волнении моря 1...2 балла) в быстром режиме регистрации 50 изм/с (кривые 1...3, соответственно измеряемые составляющие Z, X, Y). На *рис.2б* влияние магнитной массы судна-буксировщика (его постоянное «рыскание» на курсе) хорошо выражено в результатах измерения градиента поля на ИБ равной 120 м $G_{изм}$ (кривая 4). При этом удаление ближней ИБ от кормы судна было на расстоянии 50 м. На *рис.2б* показаны вычисленные значения градиента поля $G_{фильтр}$ (кривая 5), которые получены в процессе работ в результате цифровой фильтрации полученных измеренных данных.

На *рис.2г* представлены фрагменты записи «шума ИБ» (величина 120 м) морского градиентометра при волнении моря 5 баллов и при различной скорости буксировки этой ИБ от 2 до 5 узлов.

На *рис.2д* представлен фрагмент записи поля в режиме 50 изм/с тремя измерительными каналами морского градиентометра выполненного на базе

квантовых модульных МЧД (по схеме варианта буксировки ПГ показанной на *рис.1б*). На этом рисунке хорошо просматривается как влияние ориентационной характеристики каждого из МЧД, которые буксируются на различных расстояниях (100 и 200 м) от кормы судна, так и общий их «вклад» совместно с магнитным моментом судна в результирующее значение «шума ИБ».

ИДЕЯ И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ

На протяжении многих лет в области морского геофизического приборостроения велись работы по созданию новых методов и приборов для ГМС и усовершенствования старой техники, которая применялась для исследовательских, экспериментальных и производственных работ в водной среде [1, 5, 10]. При этом сами схемы проведения работ с приборами при измерении градиента МПЗ, например, на море (см. *рис.1*) и в настоящее время не претерпели существенных изменений.

Предлагаемый способ градиентометрических исследований на море был предложен автором по итогам участия и в процессе проведения многочисленных (в разные годы) экспедиционных работ и ГМС и был запатентован в 1978 году [11]. В те времена его реализацию планировалось осуществить на базе модульных магнитометров, например, - квантовых магнитометров. Однако техническая реализация отдельных моментов предложенного способа (в плане построения бортовой и встроенной в ПГ аппаратуры) была достаточно громоздкой, что приводило к увеличению размеров гондолы и, в результа-

те этого, изменению её буксировочных характеристик. Сегодня, в результате развития техники и технологий, появилась возможность вернуться к идее построения буксируемых градиентометров как на базе модульных магнитометров, так и впервые реализовать предложенный способ измерения градиента для компонентных магнитометров.

Способ измерения градиента магнитного поля в водной среде (например, на море) используется при ГМС и позволяет повысить точность измерения путём исключения погрешностей, связанных с переменными условиями буксировки ПГ такими как: нестабильность ИБ, «рысканием» и различным заглублением ПГ [11]. Применение только одной буксируемой ПГ значительно упрощает методику работ, особенно спуско-подъёмных, а также работ, связанных с выводом двух или нескольких ПГ при буксировке, например, при измерении горизонтального градиента МПЗ, на один горизонт. При этом в качестве главного элемента синхронизации (и метрологического инструмента для реализации точности) всех измерительных процессов магнитометрической аппаратуры используется акустический канал, включающий в себя управляемый импульсный пневмо-

излучатель (ПИ), установленный на судне-буксировщике, и пьезоприёмник давления (ППД), установленный в буксируемой гондоле. Этот канал формирует импульс ультразвуковой энергии (эхо-сигнал акустической волны), который распространяется в водной среде с некоторой скоростью V_{zv} .

Следует отметить, что скорость распространения звука V_{zv} не является стабильной и постоянной в различных местах водной среды и, главным образом, зависит от солёности, глубины или от температуры воды. Например, для морской воды Экваториальной Атлантики скорость звука V_{zv} лежит в пределах 1480...1550 м/с при температуре от 10 до 30°C и глубинах от 1000 до 5000 м. В пресной воде эти значения V_{zv} будут тоже конкретные, но...другие и значительно отличающиеся от морской среды. Всегда при проведении ГМС в зависимости от места проведения работ определяются и вводятся в результаты измерений конкретно определённые поправки для значения скорости звука в водной среде. В нашем случае введение поправок в результаты измерений расстояния при определении градиента МПЗ возложено на управляющее программное обеспечение (ПО).

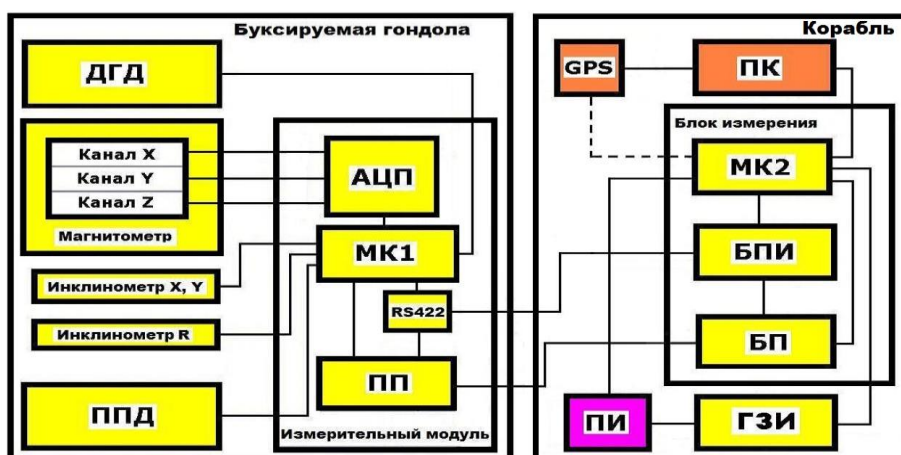


Рис.3. Структурная схема устройства для реализации измерения горизонтального градиента МПЗ в водной среде.

На *рис.3* представлена структурная схема предлагаемого устройства, которое реализует основную идею способа измерения градиента МПЗ на море. Это устройство содержит немагнитную буксируемую погружную гондолу (ПГ), внутри которой расположены измерительный модуль (ИМ) и различные датчики. ИМ содержит микроконтроллер (МК1), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразователь питания (ПП) и интерфейс для передачи данных и управления работой (RS422). К этому ИМ (через АЦП) подключен датчик (три измерительных канала X, Y, Z) феррозондового магнитометра, два инклинометра (измерительные каналы X, Y и R), датчик гидростатического давления (ДГД) и ППД.

ПГ буксируется при помощи кабеля произвольной длины за кораблём. Как правило, длина кабеля-буксира выбирается после практического определения магнитного момента судна-буксировщика и не должна быть менее 2...3-х длин его корпуса. Также при выборе длины кабеля-буксира имеет значение размер акватории, где производится ГМС, и её глубина.

На корабле (см. *рис.3*) расположены блок измерения (БИ), с подключёнными к нему персональным компьютером (ПК), приёмником GPS, генератором зондирующих импульсов (ГЗИ) и пневмоизлучателем (ПИ). В состав БИ, являющимся основным элементом синхронизации работы всей системы, входит микроконтроллер (МК2), блок преобразования интерфейса (БПИ) и блок питания (БП).

МК1, расположенный в ПГ, осуществляет синхронизацию и управление получением данных от датчиков в цифровой форме и передачу их через интерфейс RS422 на борт корабля. МК2 осуществляет полную синхронизацию всех данных с мировым временем и их позиционирование с помощью системы GPS, а также осуществляет управление акустическим каналом синхронизации измеренных данных при помощи ГЗИ и ПИ. При этом может быть реализовано два варианта использования ПИ, который может быть жестко закреплён на корпусе корабля или буксироваться за его кормой.

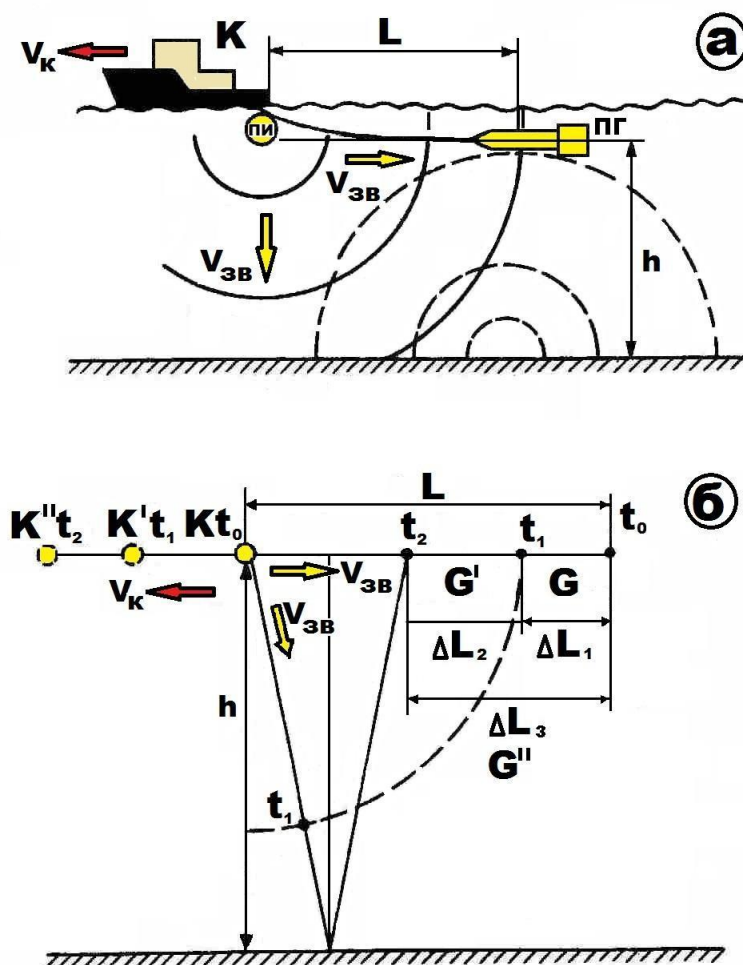


Рис.4. Схема процесса измерения горизонтального градиента (а) и временная диаграмма при измерении горизонтального градиента с использованием одной буксируемой гондолы (б).

На **рис.4** показаны схема процесса измерения горизонтального градиента G (а) и временная диаграмма (б) при измерении горизонтального градиента G с использованием одной буксируемой ПГ. На этом рисунке приняты следующие обозначения:

V_K - скорость буксировки (скорость корабля);

$V_{ЗВ}$ - скорость распространения фронта звуковой волны формируемой ПИ;

L - расстояние от кормы корабля до ПГ (до ППД);

ΔL - расстояние, длина ИБ при измерении градиента G ;

h - расстояние от горизонта буксировки ПГ до дна моря;

Kt - положение корабля (при его движении) в «реперные» моменты времени (t), фиксируемые ППД.

Устройство работает следующим образом. По команде от ПК, с помощью специального ПО, микроконтроллер МК2 управляет ГЗИ, то есть вырабатывается импульс ультразвуковой энергии (момент времени t_0 на **рис.4б**), который при помощи управляемого импульсного ПИ излучается в море (в водную среду). Возникает прямая акустическая волна (см. **рис.4а**), фронт которой распространяется во все

стороны от ПИ с некоторой скоростью $V_{ЗВ}$. Одновременно и синхронно производится измерение значений МПЗ измерительными каналами магнитометра (X , Y и Z), фиксация данных инклинометров X , Y и R , а также фиксация показаний ДГД в ПГ и передача цифровых данных через RS422 в БИ. В МК2 стартует процесс измерения горизонтальной ИБ, процесс измерения скорости буксировки V_K , а также процессы измерения глубины h и процесс вычисления модуля B_t и составляющих ВМИ (B_x , B_y и B_z).

В момент прохождения фронтом прямой акустической волны ППД (момент времени t_1), расположенного в ПГ, в нём наводится сигнал, который поступает на один из входов МК1. При этом происходит фиксация момента времени и вычисление расстояния ΔL_1 , фиксация показаний ДГД, измерение магнитометрическими каналами (X , Y и Z) и фиксация данных инклинометров. Производится передача цифровых данных через RS422 в БИ, где производится при помощи МК2 и ПК вычисления модуля B_t , составляющих ВМИ (B_x , B_y и B_z) и градиентов G по модулю и составляющим.

При прохождении фронтом отражённой акустической волны ППД (момент времени t_2) происходит

фиксация момента времени и вычисление расстояния ΔL_2 , фиксация показаний ДГД, измерение магнитометрическими каналами (X, Y и Z), фиксация данных инклинометров и вычисление глубины моря h . Цифровые данные из ПГ передаются в БИ и далее в ПК, где вычисляются величина расстояния ИБ ΔL_3 и значение градиентов МПЗ (G , G' и G''). При каждом моменте измерения МПЗ определяют координаты судна при помощи приёмника GPS.

МК2 и ПК вычисляют значения измерительных баз (ΔL_1 , ΔL_2 и ΔL_3) в каждый «реперный» момент времени (t_1 и t_2) по формулам:

$$\Delta L_1 = L - V_{зв} (t_1 - t_0), \Delta L_2 = V_{зв} (t_2 - t_1) \text{ и } \Delta L_3 = L - V_{зв} (t_2 - t_0).$$

Вычисление скорости корабля и глубины моря производится соответственно по формулам:

$$V_k = (\Delta L_1 + \Delta L_2) / (t_2 - t_0) \text{ и } h = V_{зв} (t_2 - t_0) / 2.$$

Вычисление модуля ВМИ поля Земли B_t происходит при каждом измерении составляющих (B_x , B_y , B_z) и с учётом коррекции из значений при помощи данных инклинометров формуле:

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2},$$

а вычисление градиентов поля на различных ИБ в процессе и по окончании цикла измерений производится как для модуля B_t , так и для составляющих ВМИ, по формулам:

$$G = B_1 - B_0 / \Delta L_1, G' = B_2 - B_1 / \Delta L_2 \text{ и } G'' = B_2 - B_0 / (\Delta L_1 + \Delta L_2).$$

Точность измерения ИБ в предлагаемом устройстве при измерении горизонтального градиента МПЗ определяется параметрами излучаемого ПИ импульса ультразвуковой энергии и позволяет иметь разрешение в условиях ГМС порядка 1...10 см. В качестве ДГД применяется датчик с цифровым выходом (микросхема MS5541B), который позволяет контролировать глубину буксировки ПГ с точностью до 20 см.

Точность измерения составляющих МПЗ определяется параметрами самих применяемых в магнитометре феррозондовых МЧД (в данной конструкции использован феррозондовый датчик типа FLC-70, имеющий неортогональность осей $\pm 1\epsilon$), а также точностными параметрами инклинометров. Оба инклинометра выполнены на основе цифровой микросхемы ADIS16209, которая в настоящее время является

наиболее точным интегральным измерительным инструментом. Это позволяет обеспечить точность измерения углов при буксировке ПГ порядка 0,1 ϵ (угл. градуса) при разрешающей способности 0,025 ϵ .

Опыт применения цифровых инклинометров (и, в частности, данной модели) при создании морских магнитометров с буксируемыми ПГ, - обеспечил измерение составляющих ВМИ в процессе ГМС не хуже 1...5 нТл [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый способ и созданное на его основе устройство, - компонентный магнитометр, позволяют повысить точность измерения градиента МПЗ при ГМС и позволяет проводить измерения с переменной ИБ, которая зависит от глубины моря и скорости буксировки.

Применение только одной буксируемой ПГ значительно упрощает методику работ при проведении ГМС, связанных со спуско-подъёмными процедурами, с переменными условиями буксировки и влиянием магнитного момента судна на результаты измерений МПЗ. При этом появляется возможность значительного удаления ПГ (и ИБ градиентометра) и тем самым устранение этого влияющего фактора на результаты измерений градиента МПЗ.

Использование компонентных измерений (одновременное и синхронное измерение горизонтальных градиентов составляющих ВМИ) позволяет повысить точность и информативность морских исследований. Это особенно важно при поиске и определении локальных аномалий, что значительно труднее сделать при использовании модульных магнитометров.

При использовании предложенного способа с применением двух буксирюемых ПГ в вариантах буксировки на *рис.1б* и *рис.1в* (и как показано в работе [14]), возникает возможность в получении большего количества измеренных параметров и данных. Тем самым повышается точность измерений при ГМС, а также появляется возможность измерения как горизонтального, так и вертикального градиента всех составляющих ВМИ. При этом в варианте буксировки, показанном на *рис.1в*, одну из ПГ необходимо буксировать с использованием специального заглубляющего устройства.

Литература:

1. Гордин В.М., Любимов В.В., Попов А.Г. Опыт работы с квантовым дифференциальным магнитометром КМ8 в условиях морской магнитной съемки // *Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований*. М.: ИЗМИРАН, 1979. С.40 - 48. DOI: 10.5281/zenodo.2573246
2. Гордин В.М., Любимов В.В., Попов А.Г. Системы гидромагнитных наблюдений с квантовыми магнитометрами. Обзор // Серия "Морская геология и геофизика". М.: ВИЭМС, 1980. - 72 с. DOI: 10.5281/zenodo.2572913
3. Гордин В.М., Любимов В.В., Попов А.Г. Методика и результаты испытаний морских квантовых магнитометров // Серия "Морская геология и геофизика: Экспресс-информация ВИЭМС" / М.: ВИЭМС, 1980. №5. С.1 - 20. DOI: 10.5281/zenodo.2573057
4. Гордин В.М., Любимов В.В., Попов А.Г. Оптимизация режима измерений при работе с квантовым компонентным магнитометром в условиях морской магнитной съемки // Серия "Морская геология и геофизика: Экспресс-информация ВИЭМС" / М.: ВИЭМС, 1980. №3. С.14 - 26. DOI: 10.5281/zenodo.2572986
5. Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магнитометрия. М.: Недра, 1986. - 232 с.
6. Любимов В.В. Магнитометрические исследования по программе экспедиции "ЕМИНЕ-90" в западной части Черного моря. *Препринт* №40 (1987) М.: ИЗМИРАН, 1991. - 36 с. DOI: 10.5281/zenodo.2596065

7. Любимов В.В. К вопросу о выборе длины измерительной базы градиентометра и влияния судна-буксировщика на результаты измерения горизонтального градиента магнитного поля на море // Результаты обработки электромагнитных зондирований. М.: ИЗМИРАН, 1991. С.57-68.
8. Любимов В.В. К вопросу повышения точности измерений курсового горизонтального градиента магнитного поля на море. *Препринт* №51 (998) М.: ИЗМИРАН, 1992. - 20 с.
9. Lyubimov V.V. Magnetometric surveys in the West part of the Black Sea. *Preprint* of IZMIRAN No.102 (1049). Moscow, 1993. - 26 p.
10. Городницкий А.М., Филин А.М., Малютин Ю.Д. Морская магнитная градиентная съемка. М.: ВНИИРО, 2004. - 140 с.
11. Любимов В.В. Устройство для измерения градиента магнитного поля на море. Авторское свидетельство СССР №1374953 G01V 3/00. 1987.
12. Zverev A.S., Lyubimov V.V. Marine component gradientometer // *Евразийский союз учёных* (ЕСУ). М., 2019. №10 (67). 5 часть. С.4-7. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.5.67.371
13. Любимов В.В. К вопросу измерения градиента магнитного поля на море: Новая идеология создания приборов для ГМС // Проблемы научной мысли / Физика: Геофизика, г. Днепр: ООО Каллистон, 2019. Volume 5, №11. С.3-12. DOI: 10.5281/zenodo.3522422
14. Любимов В.В. Устройство для измерения градиента магнитного поля на море. Авторское свидетельство СССР №1092454 G01V 3/175. 1984.