

# ГИДРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА БОЛГАРСКОМ ШЕЛЬФЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНОЙ СЪЁМКИ

**В.В. Любимов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
Российской академии наук*

## ВВЕДЕНИЕ

Гидромагнитные исследования по изучению прибрежного шельфа Болгарии были организованы Институтом океанологии Болгарской Академии наук (ИО БАН) в рамках плана научных работ. Эти исследования осуществлялись в соответствии с программой международных проектов «Литосфера» и «Неживые ресурсы Мирового океана». Целью проводимых работ являлось комплексное геолого-геофизическое изучение зоны шельфа Болгарии методом магнитометрии.

Ранее, в мае-июне 1975 года в Чёрном море специальное американское судно «Гломар Челленджер» провело глубоководное бурение и исследование скважин в трёх точках (точки №№379, 380 и 381 [1]). Исследования проводились с максимальным проникновением в осадки соответственно на 624,5; 1073,5 и 503,5 м (скважины бурения показаны на *рис.1в*). Одна из этих скважин (№380) была расположена недалеко от предполагаемого места проведения наших исследований.

Запланированные БАН работы проводились осенью 1990 г. и состояли из двух самостоятельных этапов. Первый этап работ включал в себя геофизическое изучение прибрежного шельфа Болгарии (см. *рис.1а* и *рис.1б*) на полигонах и отдельных региональных профилях, проходящих через известные и предполагаемые точки скважин для бурения С1...С4 (показаны на *рис.1б* и *рис.1в*), ходовыми методами исследований, включающими в себя эхолотный промер, магнитометрические измерения и сейсмопрофилирование. Первый этап научных исследований включал в себя одновременно с проведением производственных работ, - собственно гидромагнитной съёмки (ГМС), также и попутное проведение опытно-методических работ по изучению магнитности судна и параметров, которые могут оказывать существенное влияние на точность получаемых материалов и данных в период проведения ГМС [2].

В настоящей работе речь пойдёт о полученных в процессе ГМС результатах магнитометрических исследований на запланированных полигонах и маршрутных галсах на болгарском шельфе, где использовался комплекс различной магнитометрической аппаратуры разных производителей, предназначенной для обеспечения как работ на суше, так и в морских условиях [2 - 4].

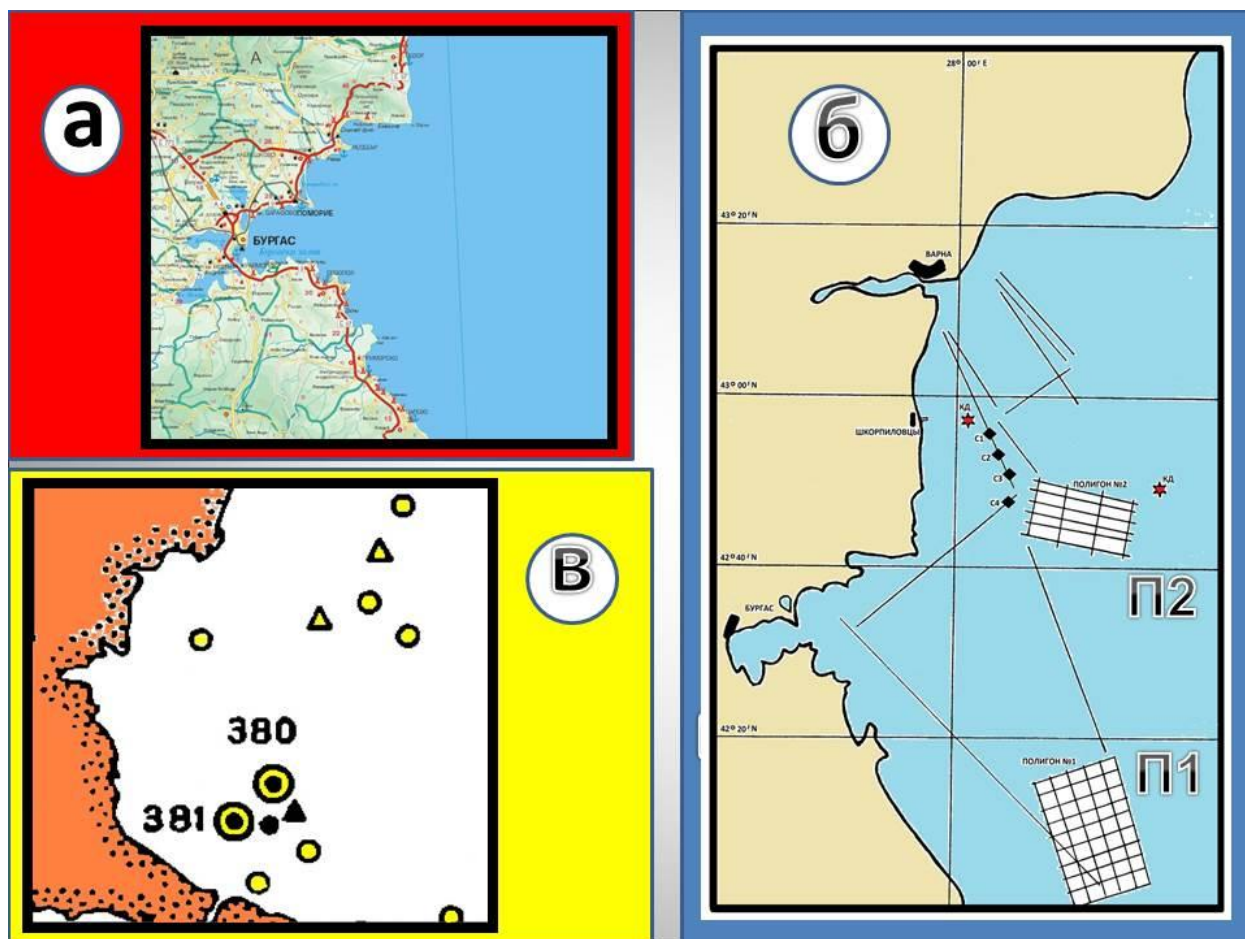


Рис.1. Район проведения гидромагнитных исследований на шельфе Болгарии (а) на полигонах (П1 и П2) и отдельных профилях (б), проходящих через известные ранее исследованные скважины (в) и предполагаемые точки бурения (С1...С4).

### ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПОЛИГОНАХ

Методика наблюдений была стандартной, с соблюдением требований «Наставления» по ГМС [5]. Морская магнитная съёмка осуществлялась одновременно четырьмя независимыми магнитометрами, - двумя протонными и двумя квантовыми, гондолы которых буксировались на различном расстоянии от кормы судна. Краткая характеристика систем и параметров наблюдений в период проведения ГМС показана в *таблице* на *рис.2* и в работе [2]. На этом же рисунке показана таблица с видами и объёмом выполненных работ в период проведения ГМС.

Дважды за период ходовой части экспедиции, - в начале и в конце ГМС, примерно на одном и том же месте (см. *рис.1* и *рис.2*), в непосредственной близости от установленной на берегу магнитовариационной станции (МВС), проводилось определение девиационных характеристик датчиков буксируемых магнитометров. Для этого отрабатывались девиационные микро полигоны. Градиент нормального поля в местах проведения работ по изучению курсовой девиации (КД) судна был минимальным и лежал в пределах от 1 до 7 нТл/км. Координирование съёмочных галсов при проведении

ГМС обеспечивалась судовой спутниковой навигационной системой GPS. При помощи береговых МВС обеспечивалось слежение за вариациями модуля и составляющих вектора магнитной индукции (ВМИ) поля Земли, - «вариационная поддержка» морских измерений на пунктах наблюдений (ПН).

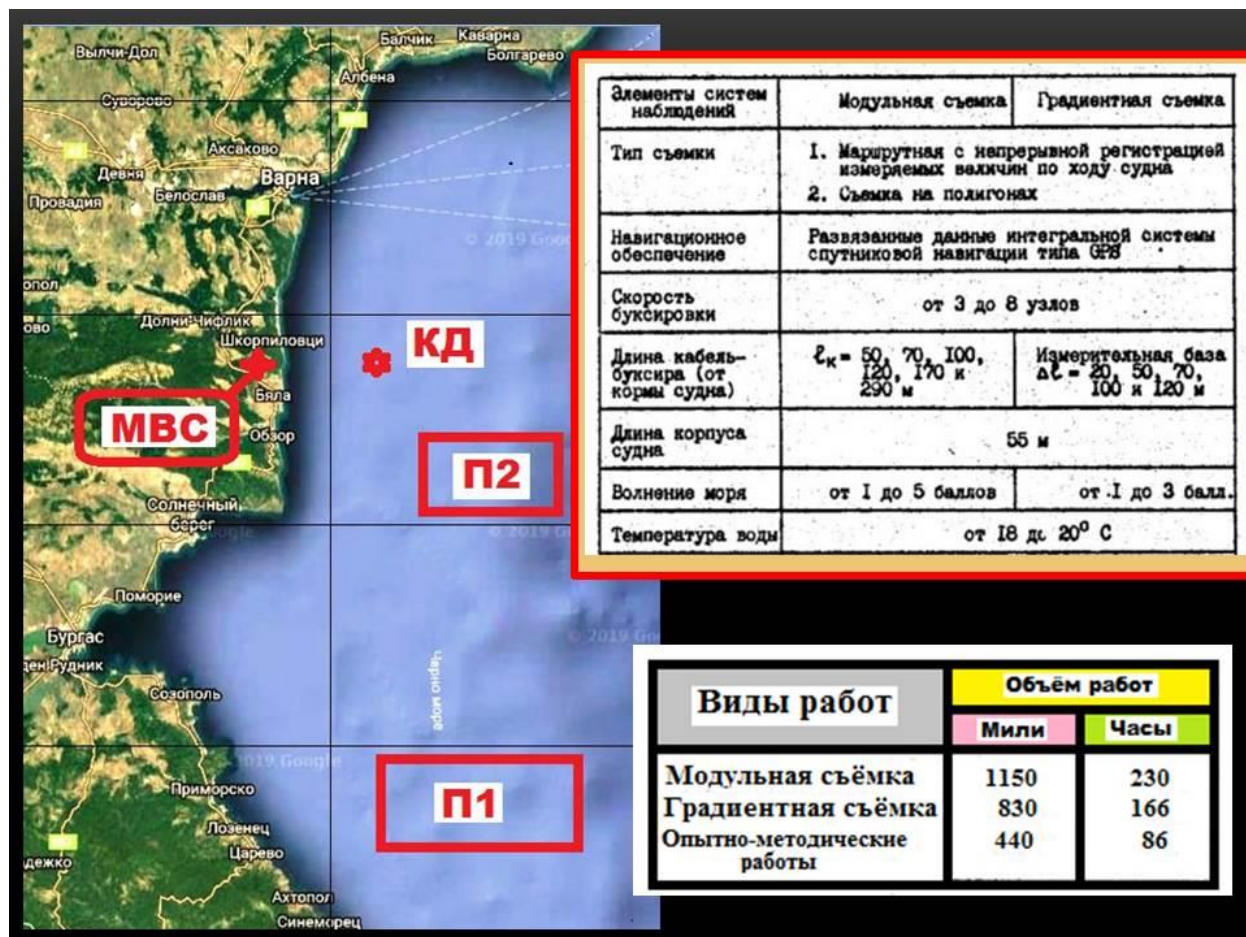


Рис.2. Район проведения методических работ и ГМС (полигоны П1 и П2), расположение ПН с МВС и таблицы с характеристиками систем наблюдений и объёмом выполненных работ.

### ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ НА ПОЛИГОНЕ №1: МОДУЛЬНАЯ ГМС

Схема расположения рабочих галсов ГМС на полигоне №1 (П1) показана на *рис.3*. При проектировании галсов предполагалось, что индексами «F» (курсовые галсы судна  $\Phi_k = 75^\circ$  и  $255^\circ$ ) и «R» ( $\Phi_k = 150^\circ$  и  $330^\circ$ ) должны быть обозначены соответственно субширотные и субмеридиональные галсы, то есть направленные соответственно вкрест и вдоль простиранья исследуемой структуры. Всем остальным, отличным от этих направлений, галсам были присвоены индексы «B» (см. *рис.3*).

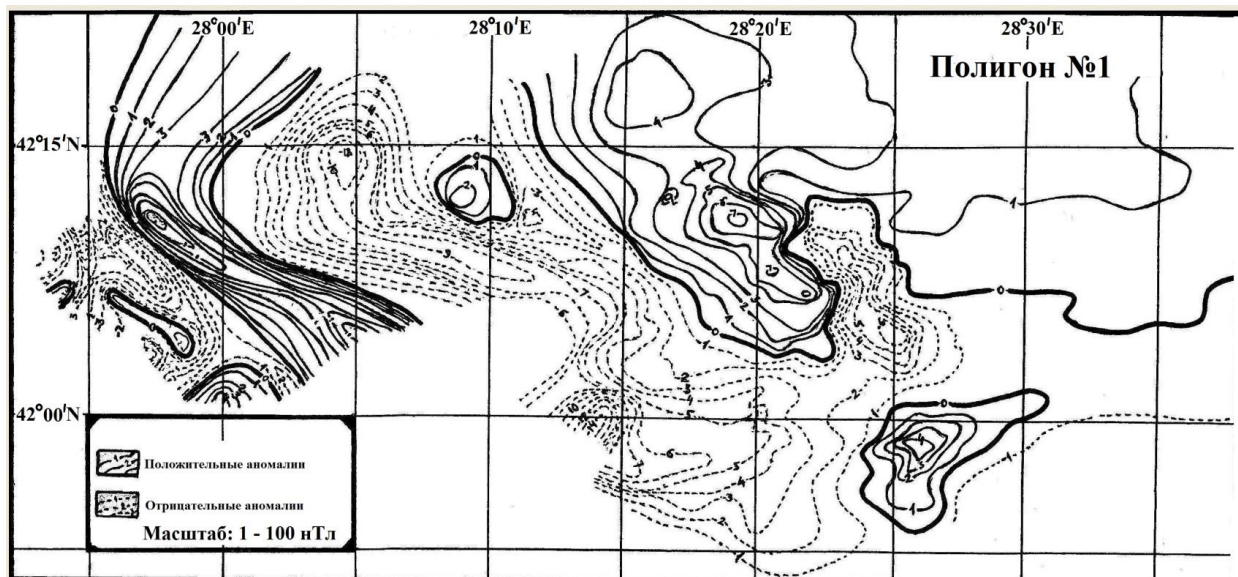
Площадь полигона П1, покрытая наиболее «густой» сетью пересекающихся галсов (центр полигона), отстоящих друг от друга на расстоянии от 100 до 500 м, - составила 14x14 кв. миль. При этом общая площадь П1, который был покрыт более редкой сеткой

пересекающихся съёмочных галсов (от 0,3 до 1 км), - составила 20х27 кв. миль и была вытянута в направлении с юго-запада на северо-восток. В общей сложности на полигоне П1 было выполнено 84 галса ГМС.



**Рис.3. Схема расположения маршрутных съёмочных галсов судна на полигоне П1.**

На *рис.4* представлена карта изодинам аномального магнитного поля  $\Delta B_t$  на полигоне П1 с сечением изодинам, равным 100 нТл.



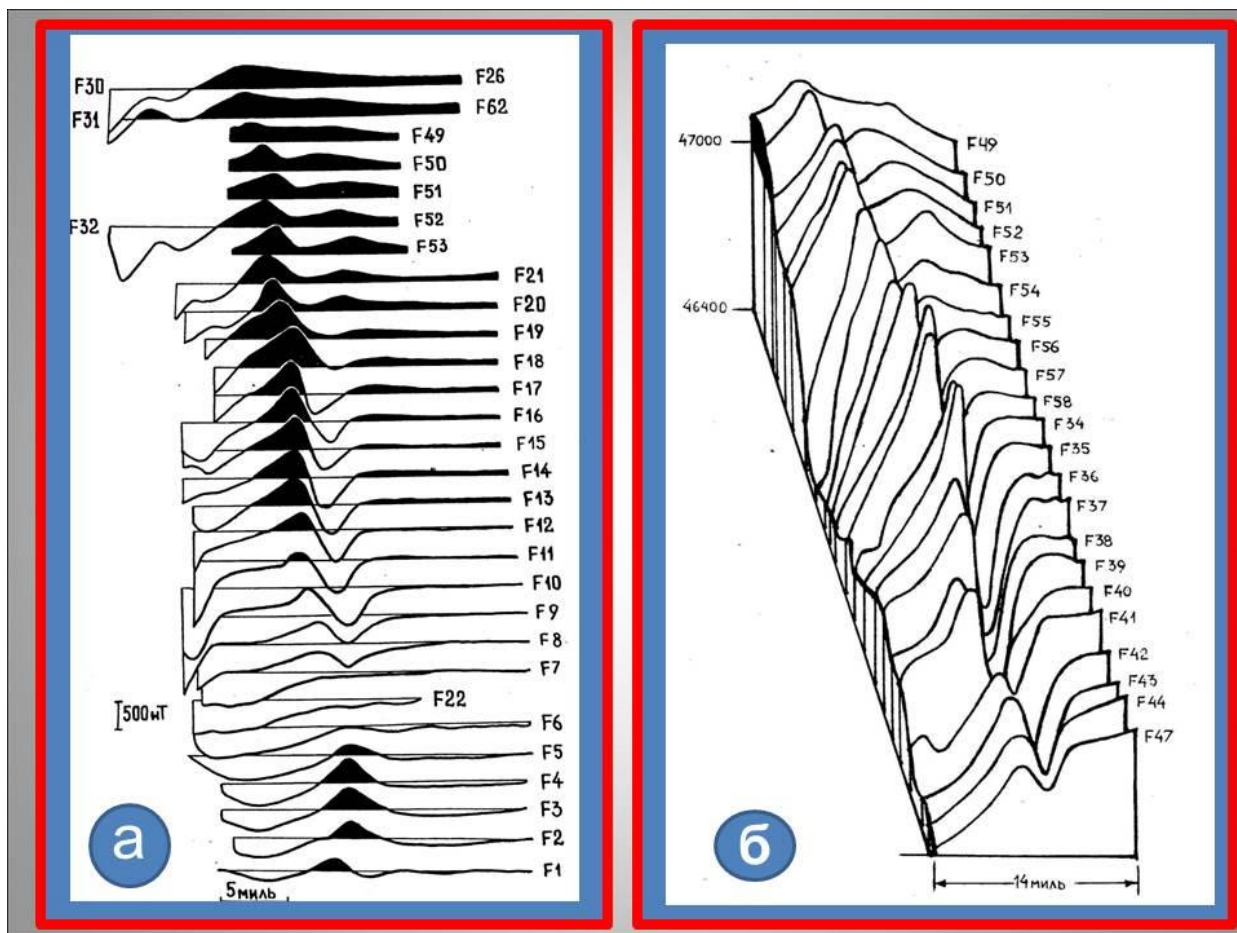
**Рис.4. Карта изодинам аномального магнитного поля  $\Delta B_t$  на полигоне П1 полученная по результатам ГМС ( $B_{t0} = 47$  мкТл, сечение изодинам - 100 нТл).**



Анализ этой карты показывает, что поле сильно аномально в центральной и западной её частях. Амплитуды отдельных аномалий достигают значений порядка 1000 нТл и более с максимальными горизонтальными градиентами от 200 до 1000 нТл/км.

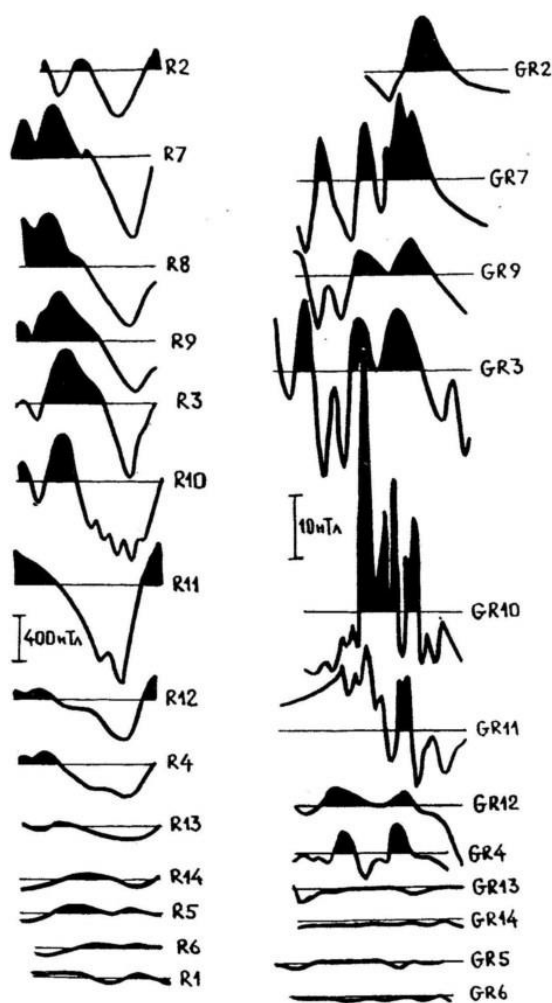
В восточной части полигона поле слабоаномально, - его амплитуды не превышают 100 нТл, а горизонтальные градиенты меньше 10...20 нТл/км. В западной и центральной части чётко прослеживается ряд вытянутых с северо-запада на юго-восток аномальных структур поля, максимальные положительные амплитуды которых достигают значений 1000 нТл, а отрицательные, - 2400 нТл (на западе) и 1400 нТл (на юге) центральной части полигона.

В центральной части П1 выделяются две положительные центральные аномальные области амплитудой 700 и 400 нТл, простирающиеся в субмеридиональном направлении и расчленённые между собой областью слабоаномального поля с горизонтальным градиентом 20...50 нТл/км. В области, которая примыкает с востока к центральной положительной аномалии, - чётко выявляется структура отрицательной аномалии амплитудой 600 нТл. Эта структура параллельна центральной аномалии переходящей к востоку в область слабоаномального поля связанного, по-видимому, с увеличением глубины дна моря. Рельеф дна в пределах полигона П1 слабо расчленён, а глубина постепенно увеличивается с юго-запада на северо-восток с 80 до 150 м.



**Рис.5. Фрагменты отдельных маршрутных галсов ГМС на полигоне П1 с графиками (а) и трёхмерной моделью (б) аномального магнитного поля  $\Delta B_t$  в субширотном направлении.**

На *рис.5а* и *рис.5б* показаны субширотные сети отдельных маршрутных галсов ГМС с графиками наблюждённого аномального магнитного поля  $\Delta B_t$ . Здесь чётко выявились структуры двух центральных положительных аномалий и структуры областей, которые примыкают к ним с запада и востока. Хотя генеральное направление структуры центральных положительных аномалий близко к меридианальному (см. *рис.5а*), - они всё же расчленены на ряд мелких структур, в которых прослеживается субширотное направление. Максимальная протяжённость этих аномалий в широтном направлении составляет примерно 10...11 км.



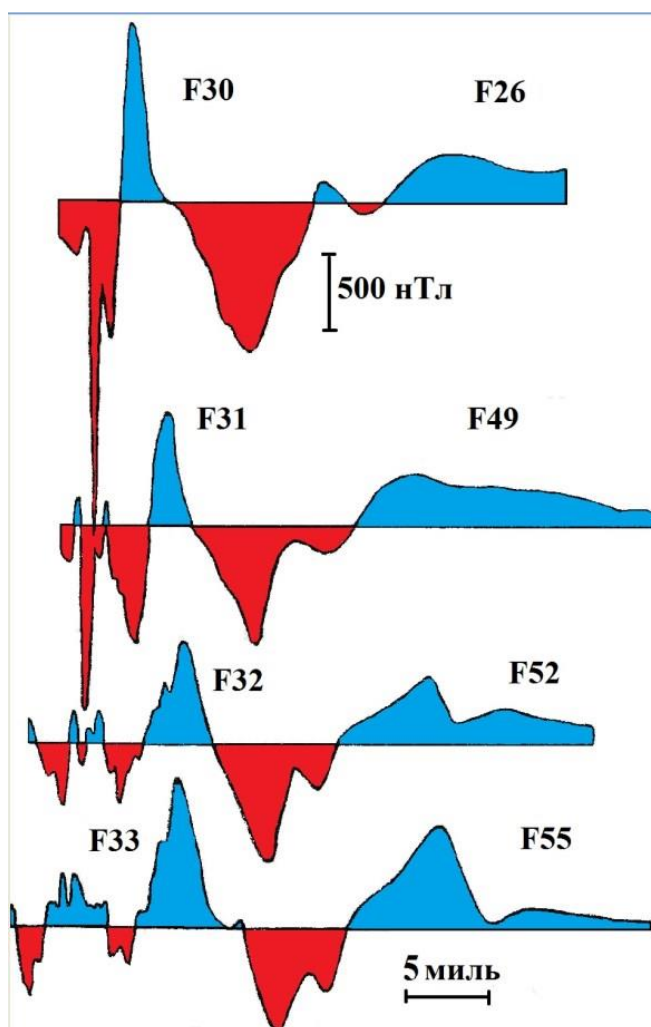
**Рис.6. Фрагменты субмеридиональных галсов ГМС на полигоне П1 с графиками наблюждённого аномального магнитного поля  $\Delta B_t$  (графики R) совместно с графиками горизонтального курсового градиента поля G (графики GR).**

Степень расчленённости центральной положительной аномалии хорошо видна из графиков на *рис.6*, на котором представлены субмеридианальные профили отдельных маршрутных галсов ГМС (с графиками наблюдённого аномального магнитного поля  $\Delta B_t$ )

совместно с графиками горизонтального курсового градиента поля  $G$  (на измерительной базе – ИБ, равной **70 м**). При этом значение градиента поля величиной в 10 нТл, полученное на такой ИБ, соответствует величине курсового градиента поля в 143 нТл/км, а максимально зафиксированный градиент поля  $G$  на профиле GR10 составил 715 нТл/км.

На *рис.6* графики сети галсов ГМС R и GR изображены сверху вниз, что соответствует (см. *рис.4*) направлению на полигоне П1 слева-направо, то есть с юго-запада на северо-восток.

Характер поля в западной части полигона П1 хорошо просматривается на *рис.7*, где показаны четыре профиля ГМС с общей протяжённостью в субширотном направлении порядка 40 миль. Здесь уверенно трассируются как положительные, так и отрицательные аномалии, отмеченные на *рис.4*, структура поля чётко выражена и почти параллельна структуре центральных аномалий.



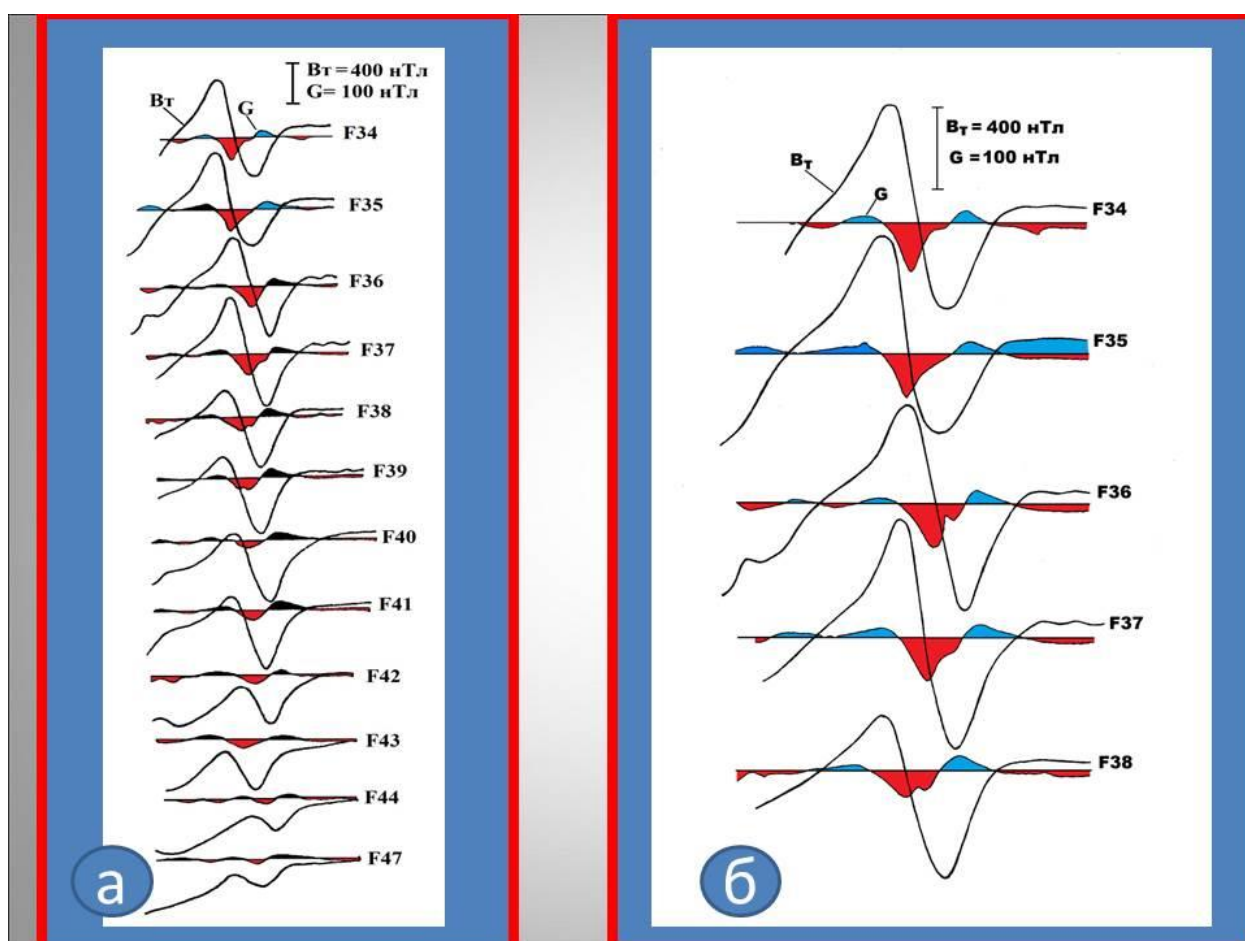
**Рис.7. Фрагмент четырёх рабочих профилей ГМС (измеренного аномального магнитного поля  $\Delta B_T$ ) на полигоне П1.**

Ширина положительной аномальной структуры с максимальной амплитудой 1000 нТл увеличивается с северо-запада на юго-восток почти вдвое (с 4 до 8 км), тогда как

ширина отрицательной аномалии, достигающей рекордной амплитуды в 2400 нТл (см. профиль **F30**), равна всего 2 км и заметно уменьшение её ширины в том же направлении. Максимально зарегистрированный на этом же галсе ГМС горизонтальный градиент поля  $G$  составил 4150 нТл/км, при глубинах морского дна примерно 45 м.

### ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ НА ПОЛИГОНЕ №1: ГРАДИЕНТНАЯ ГМС

Исследования горизонтального курсового градиента поля  $G$  на полигоне П1 велись одновременно с проведением модульной ГМС. При этом, в зависимости от погодных условий, глубины моря и условий буксировки, - длина кабелей магнитометров и длина ИБ градиентометра варьировались в широких пределах [2-4]. Максимальная длина ИБ градиентометров при работах на отдельных галсах ГМС была 120 м, а минимальная её длина составляла 20 м. Однако, основная часть исследований проводилась при длине ИБ градиентометра равной 70 м.



**Рис.8. Фрагменты отдельных субширотных галсов ГМС с графиками наблюждённых аномального магнитного поля  $\Delta B_T$  и горизонтального курсового градиента поля  $G$ .**

Следует отметить, что (из-за малых глубин моря в месте проведения работ) часто приходилось буксировать гондолы магнитометров и не использовать полную длину их



штатных кабелей-буксиров (из-за риска потери приборов или их повреждений). В результате этого получены достаточно большие амплитуды КД датчиков градиентометров, которые были связаны с очень большим магнитным моментом судна-буксировщика

На *рис.8а* и *рис.8б* показаны фрагменты отдельных субширотных галсов ГМС с графиками наблюденных аномального магнитного поля  $\Delta B_T$  и горизонтального курсового градиента поля  $G$  (с применением ИБ, равной  $\Delta L=70$  м), приуроченных к центральной аномалии (см. также *рис.5а* и *рис.5б*). Максимальная величина курсового горизонтального градиента поля в центральной части полигона П1 оказалась равной 857 нТл/км и была зафиксирована на профиле ГМС «F34».

По результатам градиентометрических исследований была построена карта курсового градиента  $G$  для центральной части полигона П1, фрагмент которой показан на *рис.9*. На этой карте сечение изодинам градиента поля равно 100 нТл/км, а пунктирными линиями показана батиметрия района с сечением изобат равным 10 м.

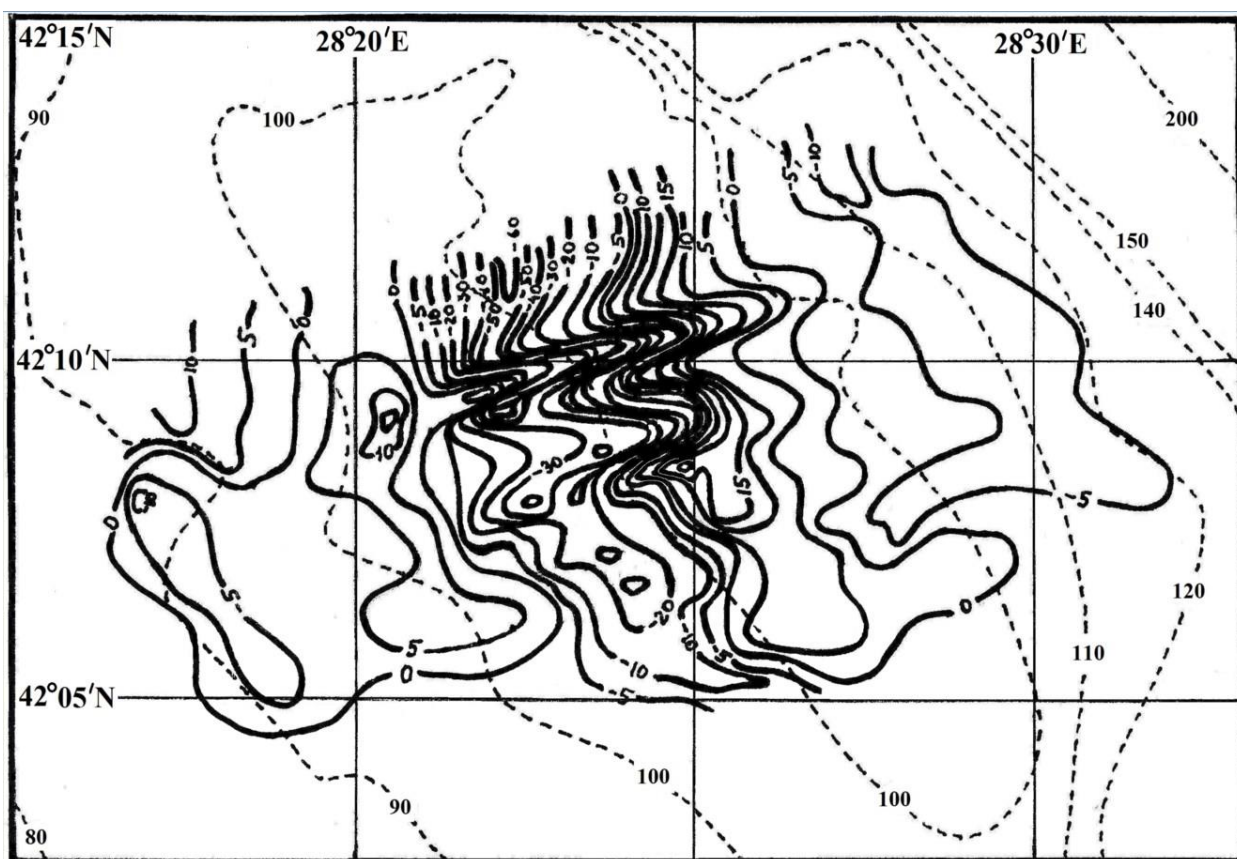
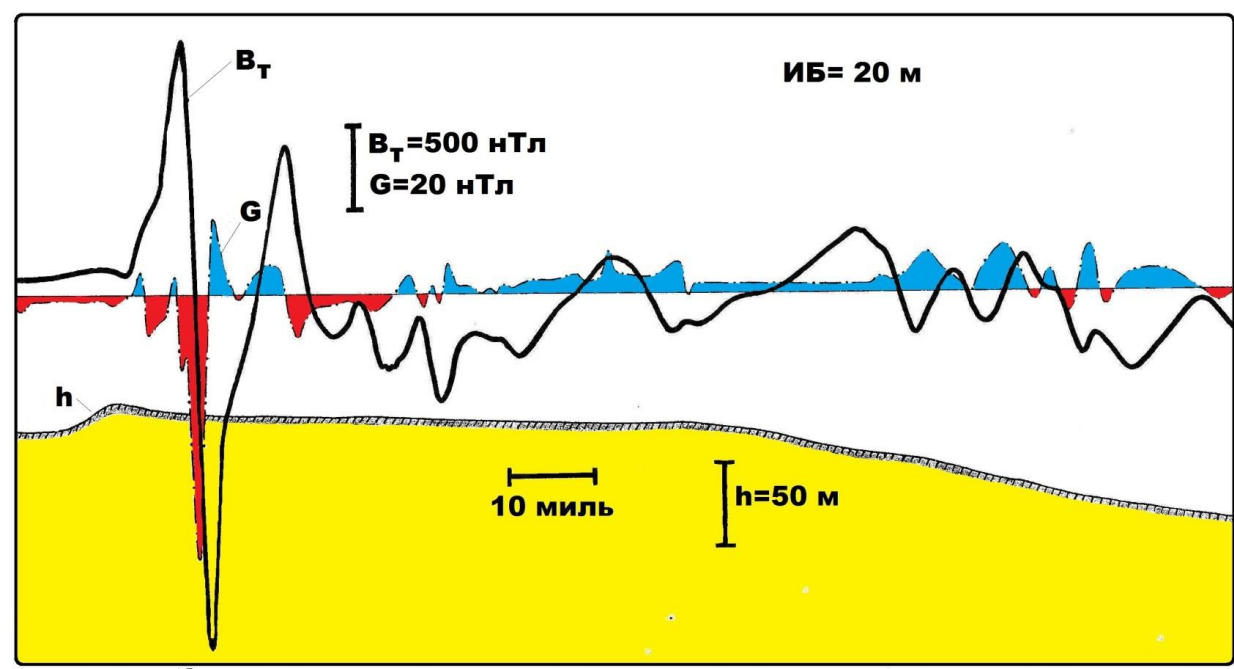


Рис.9. Карта изодинам градиента магнитного поля в центральной части полигона П1 (сечение изодинам 100 нТл/км).

Обращает на себя внимание сложный характер градиентного поля в центральной части полигона, состоящий из змеевидно вытянутых линейных параллельных структур с одинаковым значением горизонтального градиента поля. Эти структуры связаны с

субширотными расчленениями центральной аномалии, что хорошо иллюстрируется данными субмеридиональной градиентной съёмки, которые показаны на **рис.\*\***. Карта являет собой дополнительные возможности для интерпретации результатов модульной ГМС так как позволяет более уверенно разделять сложные магнитные аномалии, и выделять тонкую структуру аномального поля, свободную от временных вариаций.

На **рис.10** показан один из профилей ГМС (направленный к берегу в районе г. Бургас), на котором вместе с графиком измеренного модуля поля  $B_T$  представлены графики измеренного курсового градиента  $G$  и глубины морского дна  $h$ . Минимально зафиксированная на этом профиле ГМС глубина моря составила 25 м, а максимально зафиксированное значение градиента  $G$  (на ИБ в 20 м) было равным -62 нТл, что соответствует величине курсового горизонтального градиента поля равной 3100 нТл/км.



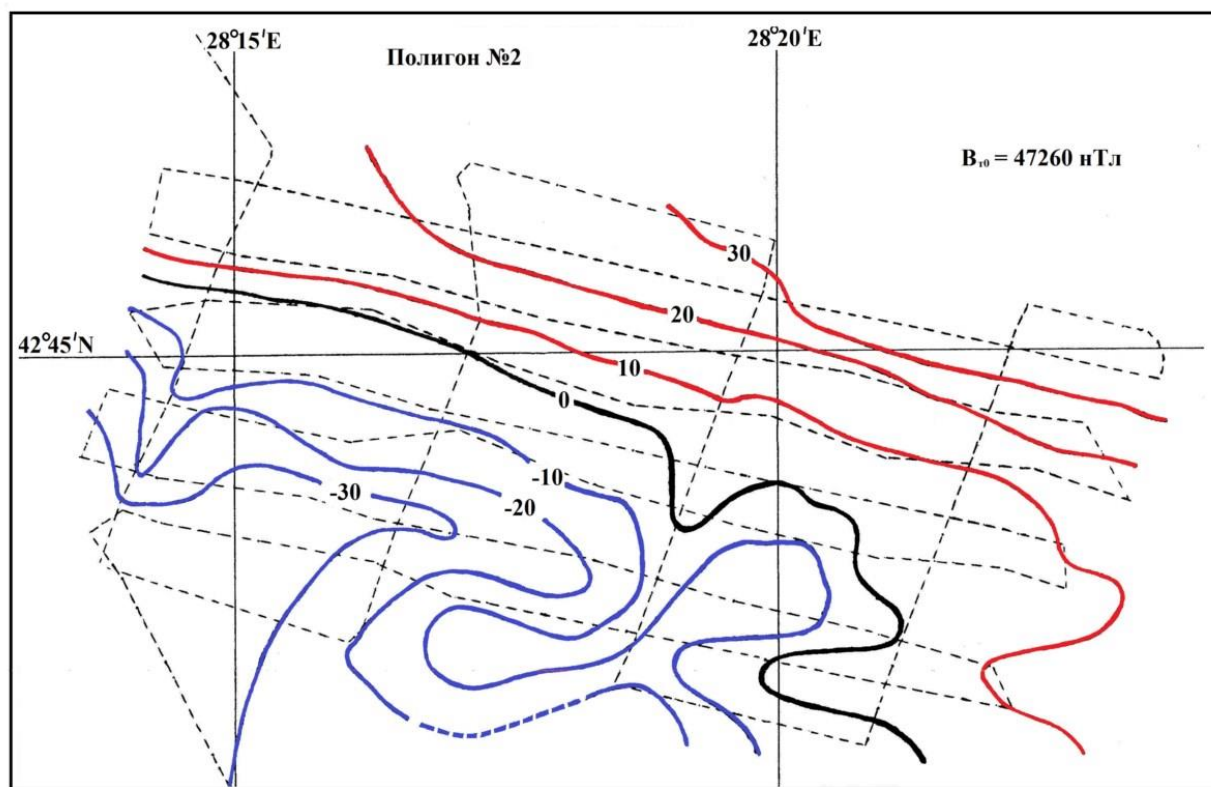
**Рис.10. Фрагмент одного из профилей ГМС на трассе г. Бургас.**

## **ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ НА ПОЛИГОНЕ №2: МОДУЛЬНАЯ ГМС**

На **рис.11** показана схема расположения рабочих галсов ГМС (обозначена пунктирными линиями) на полигоне №2 (П2, см. **рис.2**). На этом же рисунке сплошными линиями показана карта изодинам аномального магнитного поля  $\Delta B_T$  с сечением изодинам равным 10 нТл. Максимальный перепад глубин дна моря (при её средней величине порядка 100 м) в пределах полигона П2 был равен 32 м.

Полигон П2 был спроектирован по системе субширотных (курсовые галсы судна  $\Phi_K=106^\circ$  и  $286^\circ$ ) галсов, отстоящих друг от друга на расстоянии 1...1,3 км, и субмеридиональных ( $\Phi_K=16^\circ$  и  $176^\circ$ ) галсов, отстоящих друг от друга на расстоянии от 4

до 4,5 км. Общая площадь полигона П2, которая была покрыта системой из 15 пересекающихся галсов ГМС, составила 4,5х9 кв. миль.



**Рис.11. Карта изодинам аномального магнитного поля  $\Delta B_t$  на полигоне П2 полученная по результатам ГМС ( $B_{10} = 47260$  нТл, сечение изодинам - 10 нТл).**

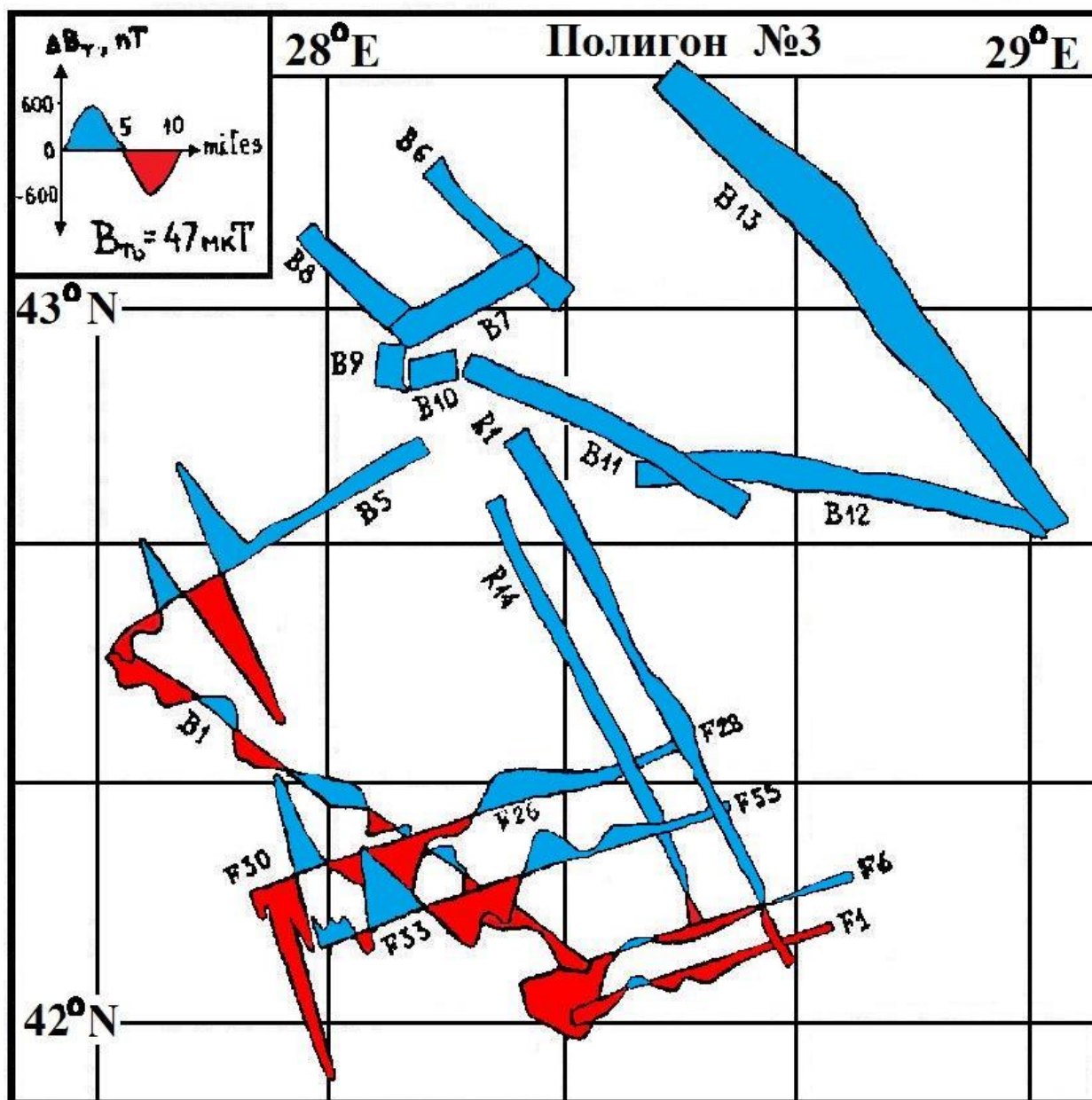
Анализ полученных данных и карты изодинам аномального магнитного поля полигона П2 показывает, что магнитное поле слабоаномально, имеет линейную структуру в пределах полигона с максимальной амплитудой  $\pm 30$  нТл и горизонтальным градиентом поля максимальное значение которого в пределах полигона П2 равно 22 нТл/км. При этом максимальный вектор горизонтального градиента поля совпадает с субмеридиональным направлением рабочих галсов ГМС.

Проведённая на полигоне П2 градиентная магнитная съёмка не выявила каких-либо определённых или заметных структур аномалий.

### **ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ НА ПОЛИГОНЕ №3: МАРШРУТНАЯ ГМС**

В процессе проведения ГМС некоторое время из общего времени экспедиционных работ было потрачено на проведения методических работ, связанных с определением КД судна, и на переходы судна к месту основных работ на полигонах П1 и П2. Во время этих переходов проводились непрерывные наблюдения как модуля ВМИ поля Земли, так и курсового градиента поля  $G$ . Результаты этих наблюдений представлены в виде карты

маршрутов судна с измеренным аномальным магнитным полем  $\Delta B_T$  (полигон №3 – ПЗ), которая показана на *рис.12*. Среднее значение модуля  $B_{T0}$  ВМИ поля Земли на всём полигоне ПЗ было равно 47 мкТл.



**Рис.12. Карта аномального магнитного поля зафиксированного в результате маршрутных ГМС на переходах судна (полигон ПЗ,  $B_{T0} = 47$  мкТл).**

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведения ГМС и опытно-методических работ следует отметить, что используемая магнитометрическая аппаратура показала довольно высокую надёжность в работе. Суммарная продолжительность буксировки аппаратуры в процессе производственных работ составила 230 часов, в результате чего было пройдено 1150 погонных миль ГМС (см. таблицу на *рис.2*).



Намеченная программа работ в части проведения магнитометрических исследований выполнена полностью. В результате проведения основных и опытно-методических работ [2], а также предварительной обработки данных, был получен большой объём новой информации об аномальном магнитном поле и его градиента на прибрежном шельфе Болгарии.

Впервые на акватории Болгарии проведена градиентометрическая съёмка с одновременным использованием четырёх буксируемых магнитометров различных типов и конструкций. Была получена уникальная информация о горизонтальном градиенте аномального магнитного поля на исследованных полигонах, а на одном из профилей ГМС (см. *рис.9*) зафиксировано рекордное значение курсового градиента поля 4150 нТл/км.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Непрочнов Ю.П. Геологическая структура Чёрного моря по результатам глубоководного бурения. М.: Наука, 1980. – 212 с.
2. Любимов В.В. Гидромагнитные исследования на болгарском шельфе: методические работы с применением комплекса различной магнитометрической аппаратуры // *Евразийское научное объединение*. М., 2020. №1 (59). С.451-460. **DOI: 10.5281/zenodo.3670038**
3. Lyubimov V.V. Magnetometric surveys in the West part of the Black Sea. *Preprint* of IZMIRAN No.102 (1049). Moscow, 1993. - 26 p. **DOI: 10.5281/zenodo.3601636**
4. Любимов В.В. Магнитометрические исследования по программе экспедиции "ЕМИНЕ-90" в западной части Черного моря. *Препринт* №40 (987) М.: ИЗМИРАН, 1991. - 36 с. **DOI: 10.5281/zenodo.2596065**
5. Фастовский У.В. Методика морской магнитной съёмки. М.: ИЗМИРАН, 1989. -118 с.