

## Результаты электромагнитных исследований в западной части Черного моря

*С. М. Кортаев\**, *И. Л. Трофимов\**, *М. С. Жданов\**,  
*Х. И. Дачев\*\**, *И. М. Варенцов\**, *С. М. Шабелянский\**,  
*А. Л. Харитонов\**

### Введение

Настоящая статья является непосредственным продолжением работы [1], посвященной предварительным результатам электромагнитных исследований на болгарском шельфе, выполненных экспедицией ИЗМИРАН-ВЦ СО АН СССР при участии Комитета геологии НРБ на судах „А. Грин“ и „Евпатория“ в 1981 г.

В ходе работ экспедиции 1981 г. были получены материалы по временным вариациям электромагнитного поля вдоль профиля, направленного на юго-восток от миса Калиакра до изобаты 2000 м. Наблюдения были получены в общей сложности по девяти точкам (включая опорную береговую точку в п. Балчик), материалы по пяти из которых позволили провести наиболее полную количественную интерпретацию в рамках методов магнитотеллурического зондирования, магнитогидродинамического профилирования и градиентного зондирования. Кроме того, акватория, примыкающая к профилю, была покрыта высокоточной магнитной съемкой.

Полное описание материалов наблюдений, методики и результатов обработки приведено в [1]. В настоящей статье приводятся результаты интерпретации полученных данных по различным методам и синтезируется комплексная электромагнитная интерпретация.

Целью данной работы является построение глубинного геоэлектрического разреза зоны перехода от материка к глубоководной впадине Черного моря. В связи с этим статья построена таким образом, что результаты методов магнитогидродинамического профилирования (МГДП), градиентного

\*Институт физики Земли АН СССР, Москва.

\*\*Научно-исследовательский институт полезных ископаемых Комитета геологии НРБ, София.



зондирования (ГЗ) и магнитной съемки рассматриваются в основном в аспекте их использования для интерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ), которые могут дать наиболее глубинную информацию

## I. Магнитогидродинамическое профилирование

При движении морской воды в постоянном магнитном поле Земли индуцируется ток, частично замыкающийся через дно, что позволяет, измеряя параметры течения и электромагнитное поле, определять параметры геоэлектрического разреза. На этом принципе основан метод магнитогидродинамического профилирования (МГДП), разработанный в ИЗМИРАН. Метод направлен на определение суммарной продольной проводимости осадочных отложений  $S_1 = h_1/\rho_1$ , где  $h_1$ ,  $\rho_1$  — соответственно мощность и удельное сопротивление слоя осадков. Отличительной особенностью этого метода, по сравнению с другими методами зондирования дна на поле течения, является требование минимальной информации о структуре течения. По сравнению с магнитотеллурическим методом его преимуществом является отсутствие затухания поля в соответствующем диапазоне на дне глубокого моря и, что особенно важно для данного района работ, — значительно меньшая подверженность искажающему влиянию горизонтальных геоэлектрических неоднородностей (за счет локальности источника). Теория и результаты испытаний метода МГДП приведены в [2, 3].

Величина позволяет:

— по известному значению  $\rho_1$  найти  $h_1$  надпорной толщи. По прибрежной части региона исследований  $S_1$  известно из предыдущих работ методами НДОЗ и ЗСМ [4] ( $\rho_1 = 2\Omega\text{м}$ );

— по известным из сейсмических данных  $h_1$  найти  $\rho_1$  и тем самым определить изменение литологического состава надпорной толщи вдоль профиля. При этом наиболее существенным является отождествление электрического и сейсмического опорных горизонтов. По району исследований это, по-видимому, не представляет трудности. Опорным электрическим горизонтом являются плотные известняки и доломиты мелового возраста ( $\rho_2 \sim 40\Omega\text{м}$ );

— устранить искажающее влияние верхней части разреза на интерпретацию глубинного МТЗ. Это обстоятельство оказалось решающим в настоящем исследовании, так как ввиду чрезвычайно резкой неоднородности теллурического поля, связанной с материковым склоном, удалось получить только *H*-поляризованные кривые МТЗ, интерпретация глубинной части которых критическим образом зависит от значения  $S_1$ .

Разработаны два варианта метода МГДП, использующие измерения электрического и магнитного поля или электрического поля и скорости. Данные наблюдений позволили реализовать оба этих взаимно контролирующихся варианта. Обработка выполнена с использованием всех измеренных компонент поля как в спектральной, так и во временной области. Разброс результатов по всем модификациям не превысил 20%.

На рис. 1 показаны точки МГДП (1, 2, 3). Нумерация точек соответствует [1]. Величины суммарной продольной проводимости  $S_1$  и соответствующие им  $h_1$  (при задании  $\rho_1$  из данных НДОЗ и ЗСМ) [4] оказались следующие:

Точка № 1	$S_1 = 320$	Сим.	$h_1 = 640$	м
Точка № 3	$S_1 = 600$	Сим.	$h_1 = 1200$	м
Точка № 2	$S_1 = 1900$	Сим.	$h_1 = 3800$	м.



Таким образом обнаруживается монотонное возрастание мощности осадков в сторону глубоководной котловины, причем наиболее резкое — на материковом склоне. Резкое возрастание  $h_1$  в этой зоне подтверждает существование Присклонового разлома [5].

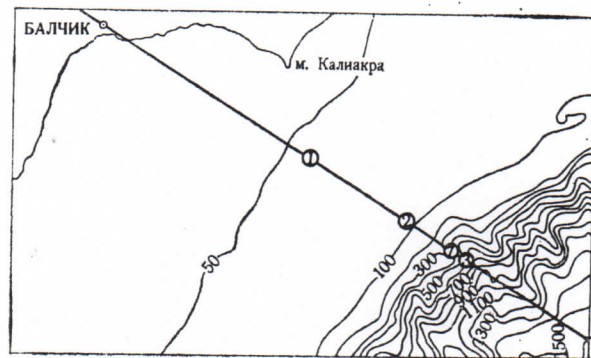


Рис. 1. Расположение точек профиля МТЗ, МГДП, ГЗ

Следует заметить, что оценки  $h_1$  получены в предположении, что состав осадков не меняется вдоль профиля и  $\rho_1$  всюду равно  $2\Omega m$ , как это было измерено методами НДОЗ и ЗСМ во внутренней части шельфа. В случае наличия более точных сейсмических оценок  $h_1$  данные  $S_1$  могут быть переведены в данные  $\rho_1$ , как чувствительный к изменениям состава осадков параметр.

## 2. Градиентное зондирование

Градиентное зондирование выполнено с помощью модульного магнетра-вариометра АМПВГ в точке № 7 (рис. 1). Глубина моря в этой точке равна 395 м, разнос датчиков — 300 м, верхний датчик притоплен на 50 м ниже уровня моря. Сравнительно небольшой разнос датчиков, наличие помех от вертикальной компоненты переменного магнитного поля, а на периодах более 2 h — помехи от магнитных полей течений заставили ограничить интерпретацию наблюдений только оценкой  $S_1$ .

Вместе с тем эта оценка как в варианте градиентного магнитного зондирования, так и в варианте разностного градиентного зондирования [6, 7]. Оба варианта дали практически совпадающую оценку  $S_1 = 500$  Сим. ( $h_1 = 1000$  м).

Вариант разностного градиентного зондирования позволил осуществить контроль точности  $S_1$  путем расчета импеданса с нормировкой на магнитное поле на уровне верхнего и нижнего датчика. Разность оценок суммарных продольных проводимостей, получаемых таким образом, должна соответствовать величине  $S$  по длине базы градиентометра, что при известном удельном сопротивлении воды дает расчетное значение базы. Эта величина оказалась равной 260 м, при фактической длине 300 м, т. е. относительная погрешность равна 13%. Поэтому полученную оценку  $S_1$  следует считать достаточно надежной.

### 3. Магнитная съемка

Высокоточной магнитной съемкой была охвачена акватория, прилегающая к комплексному геофизическому профилю. На рис. 2 показана карта аномального поля с указанием интерпретационных профилей. Характерной особенностью поля является наличие положительной аномалии над подножием материкового склона.

Задачей интерпретации являлось определение параметров залегания магнитоактивного слоя, а также определение намагниченности аномалиеобразующих пород.

Для определения глубины залегания верхних кромок (особых точек) магнитовозмущающих источников аномалий, выделенных по результатам полигональной гидромагнитной съемки, использовалась методика, в основе которой лежит вычисление логарифма модуля пространственного спектра аномального магнитного поля [8].

Расчеты по определению глубины залегания верхних кромок магнитовозмущающих источников проводились на ЭВМ по восьми профилям, секущим аномальную зону квазипараллельно береговой линии, и по двум профилям вкрест простирания основных аномалий. Расчеты показали, что верхние кромки залегают на глубинах около 6 км в центральной части аномальной зоны и испытывают некоторое воздымание в направлении болгарского побережья.

Оценки глубины залегания нижних кромок (особых точек) были сделаны по аналогичной методике с использованием логарифма модуля спектра аномального магнитного поля. Расчеты показали, что средняя глубина зале-

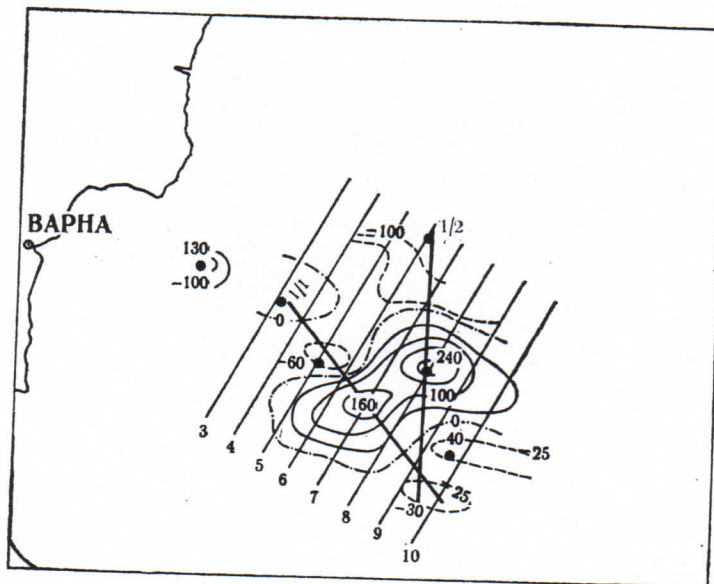


Рис. 2. Аномальное магнитное поле и интерпретационные профили. Изодинамы оцифрованы в  $\gamma$

гания нижней кромки магнитовозмущающих источников в центральной части аномальной зоны составляет примерно 18 км, а на бортах — 10 км (рис. 3). Кроме этого, была сделана оценка намагниченности пород, которую в среднем можно считать равной 0,8 А/м.



Анализ результатов теоретических расчетов глубины залегания на примерах аномалий от модельных источников показывает, что предельная величина погрешности определения глубины залегания верхних кромок с помощью данного метода может достигать  $\pm 20\%$ , а нижних кромок  $\pm 45\%$ , хотя

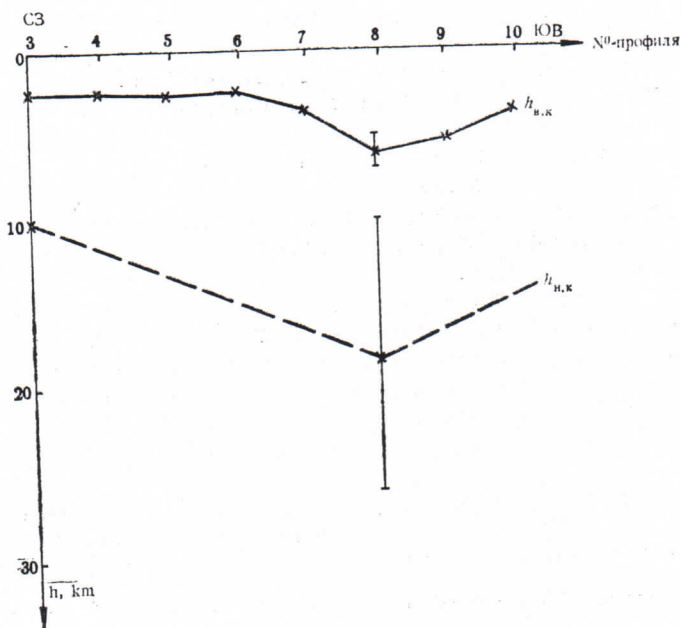


Рис. 3. Результаты расчетов глубины залегания верхних и нижних кромок магнитовозмущающих источников по интерпретационным профилям

во многих случаях эти погрешности значительно меньше. Таким образом более правильным будет представить оценку верхних кромок с учетом предельной погрешности в следующем виде:

$$h_{в.к} = 6 \pm 1 \text{ km,}$$

а нижних кромок

$$h_{н.к} = 18 \pm 8 \text{ km.}$$

Согласно имеющимся геологическим сведениям об этом регионе [5], верхние кромки магнитовозмущающих источников аномального магнитного поля можно, по-видимому, связывать с наличием магнитоактивных пород в низах консолидированных осадков. Некоторое увеличение глубины залегания верхних кромок в центральной части аномальной зоны может быть связано с опусканием в зоне подножия материкового склона. Нижние кромки магнитовозмущающих источников данной аномальной зоны вероятно связаны с поверхностью Кюри основных магнитоформирующих минералов данного региона.

## 4. Магнитотеллурическое зондирование

### Одномерная интерпретация

Магнитотеллурическое зондирование выполнено в п. Балчик и морских точках № 1 и 3 (рис. 1).

При построении кривых МТЗ обнаружилось, что теллурическое поле поляризовано квазилинейно в субширотном направлении, т. е. вкрест простиранья структур. Далее оказалось, что практически отсутствует корреляция между широтной компонентой магнитного поля и обеими ортогональными компонентами электрического поля, которые коррелируют только с меридиональной составляющей магнитного поля. Очевидно это связано с крайне резкой геоэлектрической неоднородностью материкового склона. Поэтому построенные кривые МТЗ ориентированы субширотно и соответствуют  $H$ -поляризации.

Полученные кривые подвергнуты формальной интерпретации в рамках одномерной модели.  $S_1$  первого, наиболее проводящего слоя рыхлых осадков в Балчике, взяты по кривой МТЗ. На морских точках были взяты значения  $S_1$  этого слоя, полученные по методу МГДП, а его удельное сопротивление  $\rho_1$  по данным НДОЗ и ЗСМ. Интерпретация далее проводилась методом подбора таким образом, чтобы, с одной стороны, количество слоев в модели было минимальным и, с другой стороны, рассчитанная по этой модели кривая оптимальным образом вписывалась в имеющийся разброс точек. Подбор проводился на ЭВМ с использованием асимптотических формул для двухслойных и трехслойных моделей.

В результате оказалось, что всем кривым соответствует пятислойная модель. Удельное сопротивление первых трех слоев всюду одинаково.

Результаты интерпретации по этим слоям представлены в табл. 1. Значения удельного сопротивления  $\rho_i$  указаны в  $\Omega\text{m}$ , мощности  $h_i$  — в км.

Характеристика слоев:

Первый слой — рыхлые осадки. Его подошвой являются меловые известняки.

Второй слой — консолидированные осадки. Отождествление выполнено по трем признакам:

а) удельное сопротивление консолидированных осадков, по данным НДОЗ и ЗСМ, равно  $40 \Omega\text{m}$ , по данным МТЗ —  $47 \Omega\text{m}$ , различие невелико;

б) положение подошвы этого слоя хорошо соответствует глубине кристаллического фундамента по предыдущим сейсмическим исследованиям;

Таблица 1

№ слоя	Параметры	Балчик	Точка № 1	Точка № 3
1	$\rho_1$	*	2.0	2.0
	$h_1$	*	0.64	1.20
2	$\rho_2$	47	47	47
	$h_2$	9.2	8.0	5.0
3	$\rho_3$	985	985	985
	$h_3$	29	29	25

\* В п. Балчик  $S_1 = 60 \text{ Сим.}$ , однако, поскольку неоген-палеогеновый этаж осадочного чехла построен здесь более сложно, чем в море (рыхлые осадки перекрыты тонким слоем известняков), возможна лишь условная оценка  $h_1$ .



в) положение подошвы слоя согласуется с глубиной верхних кромок (5—7 км) магнитоактивного слоя. Известно (п. 2), что верхние кромки приурочены к магнитоактивным породам, залегающим в низах слоя консолидированных осадков. Средняя глубина верхних кромок по профилю составляет 6 км, глубина подошвы второго слоя, по данным МТЗ, около 8 км.

Третий слой отождествлен с фундаментом по следующим признакам:

а) величина удельного сопротивления этого слоя согласуется с имеющимися сведениями о сопротивлении кристаллических пород;

б) положение подошвы этого слоя примерно совпадает с известным из предыдущих сейсмических исследований положением границы Мохо.

Параметры четвертого и пятого слоя определены по длиннопериодной части кривых. Это те слои, которые традиционно называются непроводящим слоем верхней мантии и проводящим основанием. Однако глубина границы раздела между ними не может быть достоверно оценена вследствие  $S$ -эффекта, свойственного  $H$ -поляризации. Положение этой границы определяется в рамках двумерной модели.

Таким образом одномерная интерпретация позволяет достаточно надежно определить трех главных слоев коры. Следует отметить, что обнаружение границы Мохо методом МТЗ является крайне редким в практике этого метода случаем (вследствие малого контраста удельных сопротивлений, в данном случае  $\rho_3 = 985 \text{ } \Omega\text{m}$ ,  $\rho_4 = 1350 \text{ } \Omega\text{m}$ ).

#### *Двумерная интерпретация*

Двумерная интерпретация является качественно новым шагом по сравнению с одномерной. Она позволяет не просто уточнить параметры геоэлектрического разреза, но в ряде случаев получить характеристики, неподдающиеся одномерной интерпретации. Так, в нашем случае  $H$ -поляризации поля искажающее влияние слоя осадков ( $S$  — эффект) делает невозможным определение глубины до проводящего основания в рамках одномерной модели, несмотря на наличие априорной информации о величине  $S_1$  (по данным МГДП и ГЗ).

Кроме того, двумерная интерпретация позволяет оценивать параметры горизонтально-неоднородного разреза за пределами профиля наблюдений.

Интерпретация проводилась путем подбора численного решения прямой задачи геоэлектрики. Алгоритм решения разработан в ИЗИРАН и описан в [9]. Особенности алгоритма являются задание произвольных (различных) нормальных разрезов справа и слева от области неоднородности и произвольного распределения электропроводности внутри неоднородности. Граничные условия получаются из решения одномерной задачи для нормальных разрезов.

В результате решения получается пространственное распределение модельных компонент поля и их функций, в частности кривых МТЗ.

На основе одномерной интерпретации данных МТЗ и МГДП с привлечением других данных была построена двумерная геоэлектрическая модель и произведено численное моделирование.

Конфигурация геоэлектрических границ подбиралась в несколько этапов, последовательно улучшающих совпадение экспериментальных и расчетных кривых МТЗ. Окончательная редакция модели приведена на рис. 4. Значения удельных сопротивлений  $\rho_i$  приведены внутри соответствующих слоев.

Результатами двумерной интерпретации кривых МТЗ, качественно новыми по сравнению с одномерной, являются:



1. Наличие сброса в непосредственной близости с северо-запада к точке № 1 (Калиакренский разлом).
2. Наличие сброса большой амплитуды между точками № 7 и 2 (при-склоновый разлом).

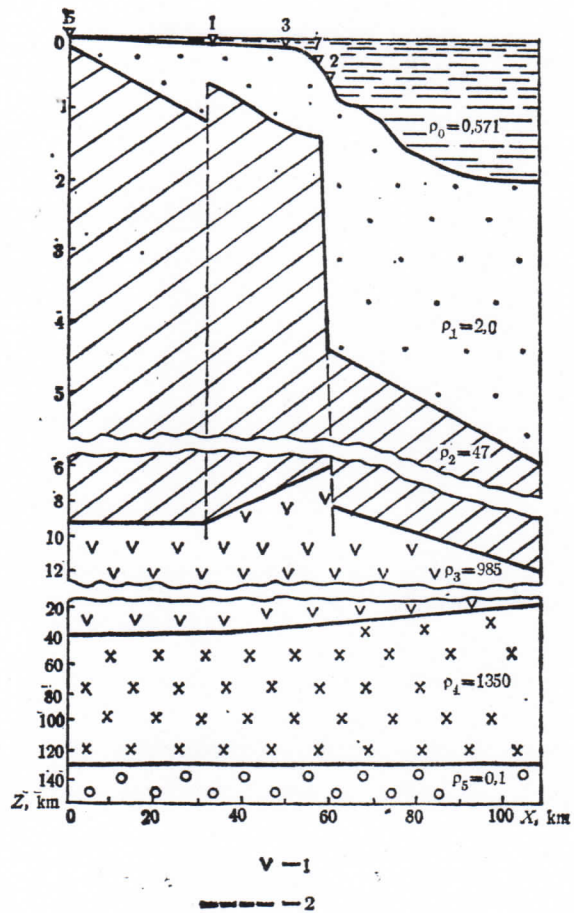


Рис. 4. Геоэлектрическая модель по профилю, секущему зону перехода на юго-восток от п. Балчик (Б-Балчик, 1, 2, 3, 7 — точки наблюдений в море; значения  $\rho_i$  указаны в  $\Omega m$ )

Оба разлома ограничивают асимметричный горст, который можно, очевидно, отождествить с Первомайским макровалом.

3. Глубина проводящего основания  $h_m \approx 130$  km.

### Заключение

Основным итогом исследований является создание геоэлектрической модели зоны перехода от континентальной коры к океанической в Черноморской котловине.



На всем протяжении этой зоны геоэлектрический разрез является пяти-слойным. Мощность рыхлых осадочных отложений значительно возрастает в сторону глубоководной котловины Черного моря, причем наиболее резкое возрастание мощности происходит в зоне материкового склона, а точнее, в зоне между изобатами 400 и 1000 м. Мощность консолидированных отложений убывает в сторону глубоководной котловины, причем под материковым склоном — обратно пропорционально возрастанию мощности рыхлых отложений. Мощность кристаллического фундамента медленно уменьшается в сторону моря.

Верхние крошки магнитоактивных тел залегают на глубине 5–7 км, что соответствует низам чехла. Нижележащая толща основных пород также вносит вклад в формирование аномального магнитного поля. Глубина нижних кромок ~18 км определяется положением изотермы Кюри.

Таким образом, электромагнитные исследования, с одной стороны, подтверждают известные геологические представления о строении зоны перехода в данном районе, а с другой — позволяют сделать некоторые новые выводы, а именно:

а) глубина залегания высокопроводящего и, следовательно, разогретого основания оценивается ~120–140 км;

б) генеральное простирание структур с ЮЮЗ и ССВ сохраняется до глубины  $\geq 40$  км;

в) подтвержден намечавшийся ранее по сейсмическим данным присклонный разлом.

## Литература

1. Abramova, L. M., S. P. Gaidash, A. L. Haritonov, S. M. Korotaev, S. V. Shabelinsky, I. L. Trofimov. Marine electromagnetic investigations of the Bulgarian continental shelf of the Black Sea. *Acta geodetica geophysica et Montanistica*, vol. 19, 1984, No 1.
2. Трофимов, И. Л., В. С. Шнейер, С. М. Коротаев. Определение суммарной продольной проводимости морских осадков и донных потоков по электромагнитному полю течений. — *Геомагнетизм и аэрономия*, 18, 1978, № 2, 319–323.
3. Korotaev, S. M., I. L. Trofimov, V. S. Shneyer. Integral conductivity of sea sediments in some World Ocean areas by the sea currents electric field. — *Ann. Geophys.*, vol. 37, 1981, 321–325.
4. Кондрашева, Н. В. Продольная проводимость осадочного чехла и водной оболочки Черного и Азовского морей. — *Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами*. М., ИЗМИРАН, 1981, 133–146.
5. Геология и гидрогеология западной части Черного моря. С., БАН, 1979, с. 292.
6. Трофимов, И. Л., Г. А. Фонарев. О применимости градиентных методов зондирования в океане. — *Геомагнетизм и аэрономия*, 12, 1972, 301–305.
7. Трофимов, И. Л. Влияние пространственной неоднородности магнитотеллурического поля на его распределение по вертикали в море. — *Геомагнетизм и аэрономия*, 14, 1974, № 3, 560–563.
8. Серкерев, С. А. Применение энергетических спектров при интерпретации потенциальных геофизических полей. — *Труды МИНХ и ГП. М.*, 1980, 5–8.
9. Жданов, М. С., И. М. Варенцов, Н. Г. Голубев, В. В. Спичак. Проблемы совершенствования конечно-разностных методов моделирования электромагнитных аномалий. — *Математические методы в геоэлектрике*. М., ИЗМИРАН, 1982.

Поступила 3 апреля 1985 г.



Results of Electromagnetic Studies  
in the Western Part of the Black Sea

*S. Korotaev, I. Trofimov, M. Zhdanov, H. Dachev,  
I. Varentzov, S. Shabeljanski, A. Haritanov*

(Summary)

Results are given concerning the processing of electromagnetic measurements in the Western part of the Black Sea carried out during the IZMIRAN — Computer Centre of the Siberian Department of the Academy of Sciences of the USSR — expedition in 1981. Data interpretation of different electromagnetic methods are presented. The main method is the magneto-telluric method, on whose basis the geoelectric model of the transition zone from the continent to the deep-water hollow of the Black Sea is built.