

ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1984

ТОМ 276 № 2

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

Академик Е.П. ВЕЛИХОВ, М.С. ЖДАНОВ, М.А. ФРЕНКЕЛЬ

ОПЫТ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МГД-ЗОНДИРОВАНИЯ
КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МИГРАЦИИ

1. В последнее время в СССР интенсивно развивается новое перспективное направление глубинной геоэлектрики, в основу которого положена возможность проведения электромагнитных зондирований земной коры и верхней мантии с мощными импульсными источниками тока — МГД-генераторами [1–4]. Эффективность применения МГД-источника для геофизических целей обуславливается его высокой мощностью. Один пуск МГД-генератора позволяет провести съемку на обширной территории порядка 10^5 км² и достичь глубин зондирований порядка 100 км в разрезах высокого сопротивления [3]. Масштабы работ с МГД-генератором предъявляют совершенно новые для геофизической практики требования как к технической стороне эксперимента, так и к вопросам обработки и интерпретации получаемого материала. Одним из таких новых методов является метод электромагнитной миграции, математические основы которого изложены в [5]. Охарактеризуем кратко физическую суть метода.

2. Метод электромагнитной миграции во многом аналогичен способу интерпретации сейсмических данных, известному под названием сейсмоголографии или сейсмической миграции [6], который, в свою очередь, переносит на случай сейсмических полей идеи оптической голографии. Оптическая голография, как известно, позволяет по голограмме, на которой зафиксирована не только амплитудная, но и фазовая структура электромагнитного поля, восстановить объемное изображение объекта. Для этого достаточно лишь осветить голограмму когерентным пучком света. При зондировании с МГД-генератором на поверхности Земли — огромной пространственной "голограмме" — вместо световых волн зафиксирована амплитуда и фаза электромагнитного поля, создаваемого МГД-источником. Процедура освещения голограммы когерентным пучком света заменяется тем, что в точках земной поверхности, где расположены датчики электромагнитного поля, размещаются фиктивные сторонние токи и заряды, меняющиеся в обратном времени $\tau = T - t$ (где t — обычное время, а T — интервал регистрации МГД-сигнала) по закону, определяемому графиком изменения наблюдаемого поля во времени.

Электромагнитное поле, создаваемое указанными фиктивными источниками (миграционное поле E^m, H^m), так же как в обычной голографии, формирует "геоэлектрическое изображение" глубинного строения Земли. Важной особенностью миграционного поля E^m, H^m является то, что оно всюду внутри Земли удовлетворяет уравнениям квазистационарного электромагнитного поля (в обратном времени τ):

$$(1) \quad \operatorname{rot} H^m = \sigma^m E^m, \quad \operatorname{rot} E^m = -\mu_0 \frac{\partial H^m}{\partial \tau},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, а σ^m — параметр миграции, который, например, может быть связан с удельной электрической проводимостью σ_n нормаль-

ного геоэлектрического разреза, характерного для района МГД-зондирований, простым соотношением $\sigma^m = 0,5 \sigma_n$ [5].

При этом сама процедура миграции сводится к устойчивой интегральной трансформации наблюдаемого поля [5]. Например, в двумерном случае при E -поляризации миграция выполняется по формуле

$$(2) \quad \begin{pmatrix} H_x^m(\mathbf{r}', T-t') \\ H_z^m(\mathbf{r}', T-t') \end{pmatrix} = -\frac{1}{4\pi} \int_{t'}^T \int_{-\infty}^{\infty} \left[\begin{pmatrix} H_z^H \\ H_x^H \end{pmatrix} \frac{\partial \bar{G}^m}{\partial x} + \begin{pmatrix} -H_x^H \\ H_z^H \end{pmatrix} \frac{\partial \bar{G}^m}{\partial z} + \begin{pmatrix} E_y^H & \sigma^m \\ 0 \end{pmatrix} \bar{G}^m \right] dx dt,$$

где $\bar{G}^m = \bar{G}^m(\mathbf{r}', t' | \mathbf{r}, t)$ — функция, сопряженная к фундаментальной функции Грина для уравнения диффузии.

Расчеты, проведенные на теоретических моделях, показали [5], что наибольшую информацию о геоэлектрическом разрезе дает миграция аномальных электромагнитных полей. В частности, хорошо проводящие локальные включения, погруженные в однородную вмещающую среду более высокого сопротивления, оконтуриваются изолиниями миграционного поля. Следует подчеркнуть, что процедура миграции оказывается наиболее эффективной при изучении главной части аномального поля E^A, H^A [7]. В нестационарном случае, так же как это сделано в [7] для монохроматических полей, операторы для нахождения главной части аномального поля могут быть построены с помощью интегралов типа Стрэттона-Чу [5]. Приведем окончательное выражение для указанного преобразования:

$$(3) \quad \begin{pmatrix} H^A \\ E^A \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} H^H \\ E^H \end{pmatrix} - \frac{1}{4\pi} \int_0^{t'} \iint_{\Gamma} \left\{ \mathbf{n} \cdot \begin{pmatrix} H^H \\ E^H \end{pmatrix} \nabla G + \left[\mathbf{n} \times \begin{pmatrix} H^H \\ E^H \end{pmatrix} \right] \times \right. \\ \left. \times \nabla G + \mathbf{n} \times \begin{pmatrix} E^H \sigma_n G \\ H^H \mu_0 \frac{\partial G}{\partial t} \end{pmatrix} \right\} d\Gamma dt,$$

где G — фундаментальная функция Грина для уравнения диффузии, \mathbf{n} — единичный вектор внешней нормали к Γ .

3. Охарактеризуем связь миграционного поля с пространственным распределением избыточных токов. Рассмотрим модель бесконечно тонкого идеально проводящего экрана S , расположенного в однородном пространстве с электропроводностью σ_n . Поле в модели возбуждается произвольным источником, расположенным вне S . Везде вне экрана аномальное (вторичное) электромагнитное поле определяется с помощью интегралов типа Стрэттона-Чу, записанных по поверхности экрана S :

$$(4) \quad \begin{pmatrix} H^A \\ E^A \end{pmatrix} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^{t'} \begin{pmatrix} -1 \\ \frac{1}{\sigma_n} \text{rot} \end{pmatrix} \text{rot} \iint_S \mathbf{J}^E G dS dt,$$

где $\mathbf{J}^E = [\mathbf{n} \times \mathbf{H}]$ — поверхностный ток, индуцированный на экране источником поля.

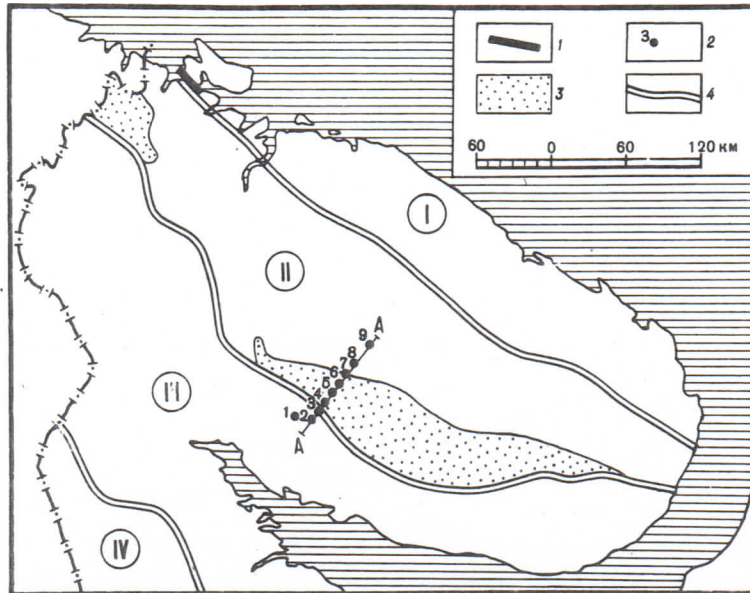


Рис. 1. Схема расположения пунктов измерения сигналов МГД-генератора на Кольском полуострове (профиль А-А) [4]. 1 – положение МГД-установки; 2 – пункты измерения сигналов и их порядковый номер; 3 – печенго-варзугский эффузивно-осадочный комплекс; 4 – границы мегаблоков (I – Мурманский; II – Центрально-Кольский; III – Беломорский; IV – Северно-Карельский)

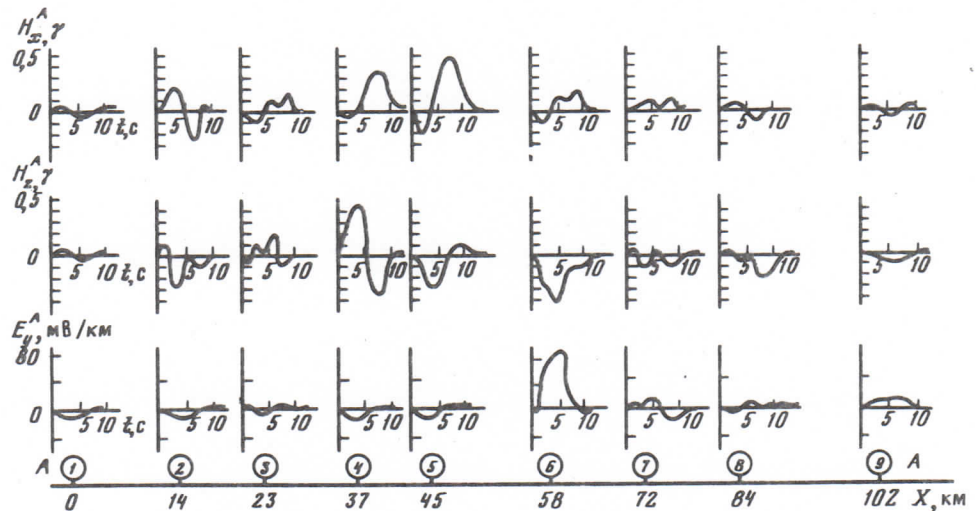


Рис. 2. Графики выделенной главной части аномального поля в точках профиля А-А (цифры в кружках обозначают номера точек в соответствии с рис. 1)

Отметим, что в случае модели однородной среды аномальная часть поля совпадает с главной аномальной частью, поэтому мы используем для ее обозначения индекс А.

Предположим в целях упрощения изложения, что в каждой точке экрана \mathbf{r} ток \mathbf{J}^E изменяется во времени по закону дельта-импульса: $\mathbf{J}^E(\mathbf{r}, t) = j\delta(t)$. Тогда, например, в двумерном случае, когда образующая цилиндрической поверхности

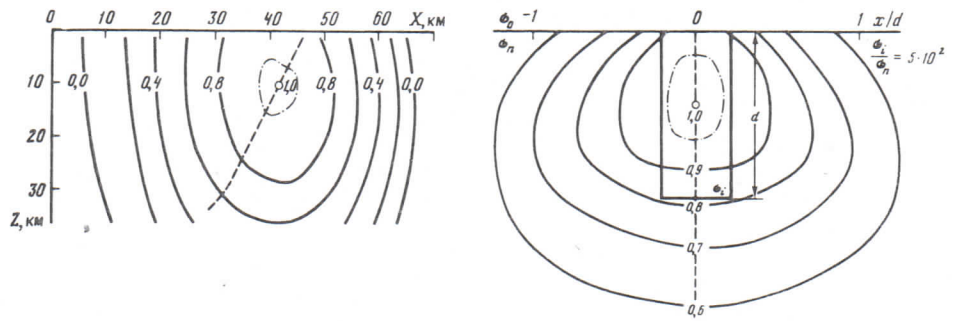


Рис. 3. Карта изолиний H_x^m , построенная в момент $t' = 1,2$ с. Значения H_x^m пронормированы на величину в точке локального экстремума (подобная нормировка выполнена также для модели рис. 4)

Рис. 4. Карта изолиний H_x^m , построенная для модели среды со вставкой

экрана параллельна оси Y , выражения для миграционного преобразования главной части аномального поля E^A, H^A могут быть получены непосредственно из (2) и (4). В частности, формула для горизонтальной магнитной компоненты миграционного поля H_x^m имеет следующий вид* (при $t' = 0$ и $T \rightarrow \infty$):

$$(5) \quad H_x^m(\mathbf{r}', T \rightarrow \infty) = \frac{3j\sigma_n \sigma^m}{4\pi\mu_0(\sigma_n + \sigma^m)^{1/2}} \int_S \beta^{-5/2} \left[x^2 + z^2 - zz' - xx' - \frac{2\beta}{3\sigma_n} + \frac{(x' - x)(x\sigma_n + x'\sigma^m)}{\sigma_n + \sigma^m} \right] dS,$$

где

$$\mathbf{r} \in S, \quad \beta = \left[\sigma_n(x^2 + z^2) + \sigma^m(x'^2 + z'^2) - \frac{(x\sigma_n + x'\sigma^m)^2}{\sigma_n + \sigma^m} \right].$$

Известно [5], что положение элементарного источника аномального поля (токовой нити, электрического диполя) определяется по положению локального экстремума миграционного поля в момент включения тока в источнике. Более того, непосредственный анализ выражения (5) показывает, что при квазигоризонтальной форме экрана на любой вертикальной линии, пересекающей S , миграционное поле H_x^m имеет локальный экстремум, расположенный непосредственно на экране (при $\sigma^m = 0,5\sigma_n$). В случае экранов более сложной формы структура миграционного поля усложняется, но качественно картина остается прежней: изолинии миграционного поля оконтуривают экран.

С помощью рассмотренной нами модели идеально проводящего экрана можно приближенно описывать реальные хорошо проводящие геоэлектрические неоднородности любой формы, совмеща экран с поверхностью неоднородности.

4. Устойчивость миграционного преобразования позволяет вести обработку практического материала, осложненного помехами, без предварительной фильтрации помех (сама трансформация выступает в качестве фильтра высокочастотных составляющих поля E^H, H^H). В условиях Кольского эксперимента непосредственные погрешности измерений составили 10–20% [3], кроме того, сильная разреженность

* Выражение, стоящее в правой части (5), получено при условии, что поверхность наблюдения совпадает с плоскостью $z = 0$.

с
н
з
ч
н
т
у
а
н
г
с
ст
к
н
до
ин
ин
рас
ак
нер
бун
свя:
ные
198:
6. В
7. Б
ля Э
Геод
Astr.

сети наблюдений вносила дополнительные вычислительные погрешности уже на этапе обработки, поэтому возможность подавления помех в процессе получения "геоэлектрического изображения" среды представляется чрезвычайно важной.

Исходным материалом при построении миграционного разреза являются данные, полученные на одном из профилей МГД-зондирований, пересекающем Имандра-Варзугскую структурную зону в западной ее части [3, 4], с 9 точками регистрации поля E^H , H^H (профиль А-А на рис. 1). Экспериментальные данные вдоль указанного профиля получены сотрудниками Геологического института Кольского филиала АН СССР.

На первом шаге интерпретации после предварительной сплайн-интерполяции на основании (3) осуществлялось выделение главной части аномального поля (рис. 2).

На рис. 3 показана карта изолиний горизонтальной магнитной компоненты миграционного поля H_x^m , построенная для момента времени примерно соответствующего максимальной интенсивности индукционных токов $t' = 1,2$ с (при $\sigma^m = 0,5 \sigma_n = 0,001$ См/м). Сопоставляя этот результат с результатом миграции для модели проводящей вставки (рис. 4), можно заключить, что полученное миграционное поле свидетельствует о наличии в разрезе земной коры проводящей зоны, выходящей непосредственно на земную поверхность, с центром примерно на глубине 10 км. На рис. 3 и 4 жирными штриховыми линиями нанесены также нулевые изолинии вертикальной компоненты миграционного поля H_z^m , указывающие на оси симметрии областей занятых аномальными токами.

Вывод о наличии проводящей зоны хорошо согласуется с реальной геологической ситуацией в данном регионе и соответствует имеющимся представлениям о наличии проводящего тела, отождествляемого с зоной развития сульфидно-графитистых сланцев и гнейсов, обладающих высокой электронной проводимостью [3, 8]. Уточнение границы проводящей зоны может быть выполнено путем применения автоматизированных методов подбора (например, коррекции формы неоднородности методом стягивающихся контуров [7, 9]). Найденная с помощью миграционного преобразования модель геоэлектрического разреза является достаточно точной стартовой моделью для этого метода, обеспечивая его быструю сходимость.

Таким образом, миграцию электромагнитного поля можно рассматривать как эффективную трансформацию пространственно-временной картины распределения поля на поверхности Земли при МГД-зондированиях, позволяющую получить достаточно хорошее начальное представление о геоэлектрическом разрезе.

Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, Москва
Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн
Академии наук СССР, Троицк Московской обл.

Поступило
3 II 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Велихов Е.П., Волков Ю.М., Дьяконов Б.П. и др. Использование импульсных МГД-генераторов для геофизических исследований и прогноза землетрясений. М., 1975, с. 16.
2. Горбунов Г.И., Бельков И.В., Павловский В.И. и др. — ДАН, 1979, т. 247, № 3, с. 578–582.
3. Горбунов Г.И., Бельков И.В., Павловский В.И. и др. — Геомагнитные исследования. М.: Радио и связь, 1982, № 28, с. 85–93.
4. Велихов Е.П., Горбунов Г.И., Бельков И.В. и др. В сб.: Глубинные электромагнитные зондирования с применением импульсных МГД-генераторов. Апатиты, 1982, с. 26–35.
5. Жданов М.С., Френкель М.А. — ДАН, 1983, т. 271, № 3, с. 589–594.
6. Berkhout A.J. Seismic migration. Amsterdam; Oxford; N.Y.: Elsev. Sci. Publ. Comp., 1980.
7. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра, 1981, с. 328.
8. Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н., Павловский В.И. и др. — Геофиз. журн., 1980, т. 2, № 1, с. 91–96.
9. Zhdanov M.S., Varentsov Iy.M. — Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1983, vol. 75, p. 623–638.

