

*Посвящается светлой памяти
Абдулхая Азымовича Жамалетдинова*

Многопараметрический подход в глубинной геоэлектрике

И. И. Рокитянский, А. В. Терешин, 2021

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 20 августа 2021 г.

Описаны основные положения геоэлектрики, подчеркнута важность учета неоднозначности ее обратной задачи. Рассмотрены три основных метода глубинной геоэлектрики, использующие естественные поля ионосферно-магнитосферного происхождения: магнитовариационное зондирование (МВЗ), магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) и магнитовариационное профилирование (МВП). Описываются функции отклика каждого метода. Каждая функция отклика несет свою специфическую информацию о некоторых параметрах изучаемого объекта и характеризуется степенью достоверности извлекаемой из нее информации об объекте. Например, наиболее достоверную информацию об аномалиях электропроводности (если они есть на исследуемой площади) имеют функции отклика МВП. Горизонтальный тензор аномального поля содержит информацию об электропроводности под пунктом наблюдения, а типпер (вектор индукции) — из окружающих участков. В целом информация МВП меньше подвержена искажениям, чем информация МТЗ и заслуживает большего доверия. Искусственные источники поля в глубинной геоэлектрике используются редко ввиду дороговизны. С 1970 г. два мощных источника, созданных для других целей, находились на Кольском полуострове и были использованы для глубинных зондирований. В центре этих исследований оказался молодой талантливый геолог-геофизик и организатор крупных проектов Абдулхай Азымович Жамалетдинов. Это — проект «Хибины» с МГД генератором и сверхглубокой скважиной в качестве одного из объектов исследования, низкочастотный излучатель «Зевс», сигналы которого записаны в Китае на расстоянии 7000 км, а также ряд проектов, задуманных и организованных А. А. Жамалетдиновым и выполненных под его руководством: Волгоград—Донбасс (1979, 1986), эксперименты «Феникс» (2007, 2009, 2014, 2019) и др. При этом были разработаны методики интерпретации для зондирований с использованием искусственных электромагнитных источников, получены новые функции отклика, позволяющие по-новому «увидеть» объект исследования. Этот опыт необходимо сохранить, обобщить, усовершенствовать и использовать, например, следующим образом. При проведении синхронной многоточечной съемки методами МТЗ—МВП оборудуется контролируемый источник, состоящий из двух заземленных линий, через которые пропускается сильный ток в виде гармоник на фиксированных частотах и/или импульсов, сигналы которого будут регистрироваться приборами сети МТЗ—МВП во время ночных сеансов.

Ключевые слова: глубинная геоэлектрика, функции отклика, электропроводность Земли.

Основные определения и методология. Геоэлектрика — это раздел геофизики, изучающий распределение электропроводности (и в редких случаях магнитной и диэлектрической проницаемости, которые не будем рассматривать) внутри Земли. Для ее изучения используются электрические и электромагнитные (ЕМ) поля различного происхождения. В глубинной геоэлектрике обычно используются есте-

ственные ЕМ-поля токов в ионосфере и магнитосфере Земли.

Обратная задача геоэлектрики — это извлечение информации об интересующем нас объекте — электропроводности $b(x)$ внутри Земли (вектором x будем обозначать положение точки в трехмерном пространстве) из адекватных (т. е. электромагнитных) экспериментальных данных. Вещественный состав, геологическая при-

рода — все это за рамками геоэлектрики, поскольку эта информация является предметом комплексной интерпретации.

Реальный объект всегда неисчерпаем по своей сложности и может быть описан только бесконечномерным вектором. Данные наблюдений всегда ограничены количественно и по частотному диапазону, и по точности и могут быть представлены только конечномерными векторами. Следовательно, обратная задача всегда многозначна. Это следует из общефилософских представлений, в геофизике наиболее четко сформулировано в работах [Backus, Gilbert, 1967, 1970], применительно к геоэлектрике — в серии работ Паркера, например [Parker, 1972].

Приведенное не противоречит теоремам единственности обратных задач, доказанных в рамках отдельных методов, например одномерного МТЗ [Тихонов, 1943]. Эти теоремы доказаны для идеализированных бесконечномерных входных данных, которых природа нам не дает.

О пользе регуляризации. По цели исследования науку можно подразделить на фундаментальную (геоэлектрика) и прикладную (электроразведка). Цель фундаментальной — накопление новых достоверно установленных знаний. В условиях неоднозначности обратной задачи получение одного решения может оказаться недостаточным, необходимо описание всей совокупности моделей, удовлетворяющих имеющимся наблюдениям, и только такой результат будет новым знанием. Приписывать в условиях неоднозначности свойства одной субъективно выбранной модели природному распределению электропроводности неправильно и может оказаться фальсификацией. Цель прикладной науки, электроразведки, — поиск полезных ископаемых и свои результаты она может выдавать кратко: есть месторождение или нет. Такое исследование называют целевым. Его особенностью является требование определенности, единственности решения, которое является основанием к практическому действию. Рассмотрим пример. Производству к определенному

сроку требуется полезное ископаемое. Выделяется определенная сумма денег. Достоверный метод — только вскрытие с помощью скважин. Для повышения вероятности успешного выбора мест бурения часть денег выделяется геофизикам. Они должны провести работы и к заданному сроку показать, где следует ставить скважины. Средств и времени обычно не хватает для обстоятельного исследования, но и при недостатке информации единственное решение должно быть представлено в срок. Подобная ситуация встречается во многих системах управления — по недостаточной текущей информации выдать единственное решение: курс корабля или летающего аппарата, цель ракеты и многое другое. Для математического обоснования решения в подобных ситуациях развита теория решения некорректных задач, в частности теория регуляризации, развитая А. Н. Тихоновым (1943) и его учениками. Регуляризация дает оптимальное единственное решение для практических приложений. В фундаментальных исследованиях регуляризацию лучше не применять, а при применении тщательно следить, не вносит ли она субъективный фактор в результаты.

Комплекс трех методов глубинной геоэлектрики естественного поля. Магнитовариационное зондирование (МВЗ) появилось в результате работ Лэмба (1883), Шустера (1889), Чепмена (с 1919), Прайса (с 1930), Беньковой (с 1941).

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) было независимо предложено Тихоновым (1950) и Каньяром (1953). Магнитовариационное профилирование (МВП) появилось в результате наблюдений аномального поведения геомагнитных вариаций: в Германии — Визе (1954, 1965), Шмукер (1959), Порстендорфер (1965), Фанзелау (1968) и др.; в Японии — Рикитаки (1951, 1968); на морских побережьях и в Австралии — Паркинсон (1959, 1964).

Взаимопроникающий комплекс трех методов был предложен в работе «Исследование глубинной электропроводности» [Рокитянский, 1970] и впоследствии раз-

вивался и конкретизировался в статьях [Рокитянский, 2012] и монографиях [Рокитянский, 1975, 1981].

Функции отклика. Исследование неоднородно распределенной электропроводности земных недр является сложной задачей, поэтому ее решают в два этапа: обработка с определением функций отклика и решение обратной задачи — интерпретация. Измеряемыми величинами являются компоненты естественных электрического и магнитного полей, представляемые в виде дискретных временных рядов, содержащих набор вариаций с различными периодами. Чтобы исключить из дальнейшего рассмотрения изменяющиеся параметры источников ЕМ-поля, проводится обработка временных рядов с целью получения функций отклика (ФО, на английском языке RF — response function).

В методе МТЗ, основанном на модели вертикально падающей плоской волны, модели Тихонова—Каньяра (Т—К), функцией отклика является импеданс и информационно равноценные ему адмитанс, кажущееся сопротивление и другие. ФО выбирают в таком виде, чтобы было удобно выполнять последующий этап — нахождение $b(x)$. Это — кажущееся сопротивление, фазовый тензор импеданса, помогающий уменьшить помехи от статических искажений, профильные псевдоразрезы, наглядно показывающие можно ли профиль аппроксимировать двумерной структурой.

В методе МВЗ ранее функциями отклика были магнитное отношение и вычисляемое по нему отношение вторичного внутреннего поля к первичному внешнему, от которых, как было предложено в работе [Бердичевский и др., 1969], перешли к спектральному импедансу, т. е. к импедансу, определяемому для одной пространственной гармоники. Если выполняется условие частотного зондирования, согласно которому глубина скин-слоя δ существенно меньше пространственного размера сферической гармоники порядка n [Рокитянский, 1981, с. 44—46],

$$\delta = (\mu\sigma\omega/2)^{-1/2} \ll (r^2/n(n+1))^{1/2}, \quad (1)$$

где r — радиус Земли, σ и μ — проводимость и магнитная проницаемость слоев Земли, куда проникает поле частоты ω , то данные МВЗ можно совмещать на общей частотной кривой с данными более локальных глубинных МТЗ. Это необходимо для определения нормального разреза региона, который является важной глубинной геофизической характеристикой недр Земли, в частности используется при интерпретации данных МВП.

В методе МВП используются две основные ФО: вектор индукции и горизонтальный магнитный тензор, профильные графики которых связаны преобразованием Гильберта. По этим графикам однозначно определяется местоположение оси или эпицентра аномалии и оценивается ее максимально возможная глубина и ширина. По частотной характеристике можно оценить суммарную продольную проводимость аномального тела. Эти результаты отличаются высокой достоверностью, поэтому им следует придавать большее доверие по сравнению с данными МТЗ, подверженным различным искажениям.

Глубинные зондирования с контролируемыми источниками. Конфигурации источника. Магнитный вертикальный диполь — горизонтальная петля площадью S , питаемая током I . В этом случае электромагнитное поле имеет три компоненты в цилиндрических координатах E_φ, H_r, H_z , не зависящие от направления на точку наблюдения (осевая симметрия). В волновой зоне, когда $kr \gg 1$, (где $k = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho}$ — волновое число, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость вакуума, $\rho = 1/\sigma$ — удельное электрическое сопротивление среды, r — удаление от источника), эти компоненты выражаются так:

$$\begin{aligned} E_\varphi &= -\frac{3IS\rho}{2\pi r^4}; \\ H_r &= \frac{3IS}{2\pi kr^4}; \quad H_z = -\frac{9IS}{2\pi k^2 r^5}. \end{aligned} \quad (2)$$

Из приведенных соотношений видно, что горизонтальные компоненты электромагнитного поля убывают обратно пропорционально четвертой степени расстояния r

до пункта наблюдения, вертикальная компонента магнитного поля — обратнопропорционально пятой степени расстояния r . Отношение взаимно ортогональных горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей соответствует импедансу плоского электромагнитного поля:

$$Z_{\varphi} = -\frac{E_{\varphi}}{H_r} = \rho k = \sqrt{-i\omega\mu_0\rho}.$$

Такое пространственно-временное поведение электромагнитного поля в волновой зоне источника позволяет применять при интерпретации способы, используемые в методе магнитотеллурического зондирования. Однако весьма быстрое пространственное затухание поля далеко не всегда дает возможность регистрации волновой стадии поля на больших удалениях от источника, что ограничивает возможность выполнения глубинных зондирований. В ближней же зоне ($kr \ll 1$) поле магнитного диполя теряет связь с электропроводностью. По этим причинам попытка выполнить глубинные зондирования на Урале с петлей площадью 10^6 м^2 , питаемой током 40000 А от МГД-источника, не была успешной.

Заземленная линия AB длиной l , питаемая током I с электрическим моментом $M_E = Il, A \times m$, направленным горизонтально вдоль AB . Поле заземленной линии может быть представлено в виде суммы двух основных источников: 1) точечных заземлений A и B , вводящих ток в Землю — электрическая мода, 2) ток в надземной линии от генератора ЭДС до заземлений и далее «возвратный» ток между электродами через Землю. Ток по этому вертикальному (при прямолинейности линии и однородности полупространства по удельному сопротивлению) контуру создает магнитное поле, квазиперпендикулярное направлению AB — это будет магнитная мода. Таким образом, поле заземленной линии двумодально. Для постоянного тока и низкочастотной асимптотики ($\omega \rightarrow 0$) это магнитное поле не взаимодействует с электропроводностью Земли и магнитная мода не учитывается

Дальняя волновая ($kr \gg 1$) зона заземленной линии в дипольном ($r \gg AB$) приближении. На поверхности однородного полупространства компоненты поля имеют вид [Ваньян, 1997; Жамалетдинов, 2011б]

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{Il_{AB}\rho(3\cos^2\theta - 2)}{2\pi r^3}, & H_y &= \frac{Il_{AB}(3\cos^2\theta - 2)}{2\pi r^3 k}, \\ E_y &= \frac{3Il_{AB}\rho \sin\theta \cos\theta}{2\pi r^3}, & H_x &= \frac{3Il_{AB} \sin\theta \cos\theta}{2\pi r^3 k}, \\ H_z &= \frac{3Il_{AB} \sin\theta}{2\pi r^4 k^2}, \\ Z_{xy} &= -Z_{yx} = k\rho = \sqrt{-i\omega\mu_0\rho}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $k = \sqrt{-i\omega\mu_0/\rho}$, l_{AB} — длина диполя AB , м; ρ — удельное сопротивление, Ом·м; θ — угол между осью диполя AB и направлением от центра диполя на точку приема в градусах (полярный угол установки).

Из формул (3) видно, что геометрические зависимости от азимута и расстояния для взаимно ортогональных горизонтальных компонент электрического и магнитного полей E и H полностью идентичны и кажущееся сопротивление может быть выражено через импеданс аналогично МТЗ с естественным МТ-полем, но амплитуда искусственного поля будет пропорциональна произведению тока I на длину линии AB и обратно пропорциональна кубу расстояния r до центра линии. Несмотря на то, что убывание поля тут на порядок медленнее, чем поля магнитного диполя, измерить этот сигнал при больших r на фоне МТ-поля и других помех — также не простая задача. Необходима избирательная настройка принимающей аппаратуры на ожидаемый сигнал и/или многократное накопление повторяющихся сигналов. Интерпретация может быть двоякой: или по импедансу, тогда параметры установки сокращаются и интерпретация такая же, как в МТЗ, или по отдельным компонентам (предпочтительно электрическим) с расчетом поля источника и возможностью выхода из волновой зоны в низкочастотную вплоть до постоянного тока. В промежуточной зоне $kr \approx 1$ поле заземленной линии бимодально.

Зондирование с МГД-источником «Хибины» мощностью до 80 МВт. Использованный для зондирований МГД-генератор способен создавать импульс тока длительностью 5—10 с и интенсивностью в десятки тысяч ампер, если сопротивление нагрузки уменьшить до долей ома. Как «загнать» такой ток в земные глубины? Магнитная петля (Урал) и линия с заземлениями на суше (Гарм в Таджикистане)

не обеспечили поставленных задач. На Кольском полуострове электроды «заземлили» в морскую воду на узком перешейке полуостровов Средний и Рыбачий (рис. 1). Линия от генератора до электродов длиной 7 км была сделана из алюминиевого кабеля весом 160 т. Сопротивление всей цепи (кабель, электроды и морская вода вокруг двух полуостровов) составило всего 0,095 Ом, что позволило запускать ток

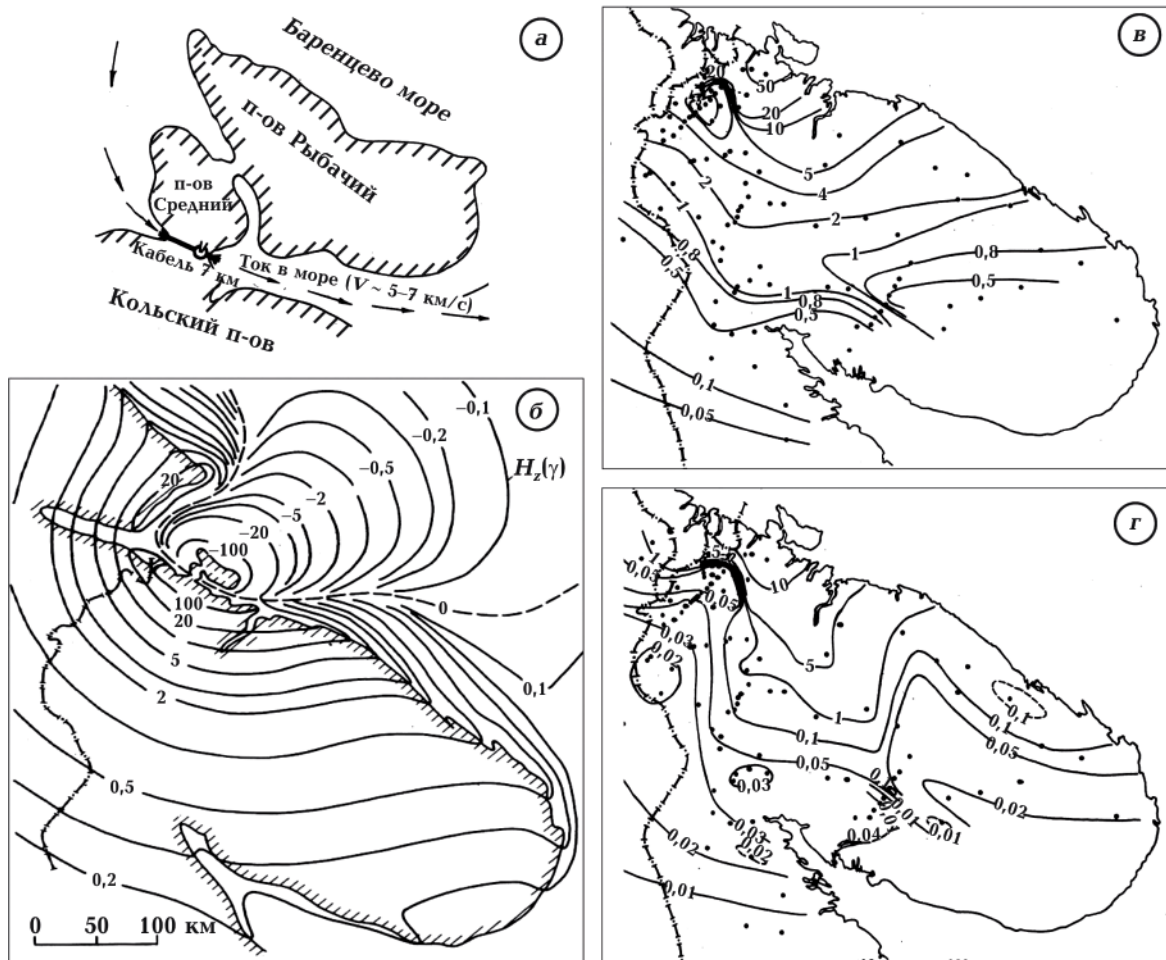


Рис. 1. Эксперимент «Хибины»: а — схема растекания тока МГД-генератора в морскую воду; б — изолинии вертикальной компоненты магнитного поля (нТл) от токов в море источника «Хибины» над однородной высокоомной литосферой по результатам физического моделирования; в—г — измеренные поля источника «Хибины» (в — вертикальной компоненты магнитного поля, нТл и г — полного электрического поля, мВ/км на Кольском полуострове). На изолиниях измеренных полей четко видны аномалии от электроннопроводящих структур Печенга (вверху слева) и Имандра-Варзуга. Точки — пункты измерений [Жамалетдинов, 1990].

Fig. 1. Experiment «Khibiny»: а — Scheme of MHD generator currents spreading into seawater; б — Isolines of the magnetic field vertical component (nT) from the sea currents generated by «Khibiny» source above the homogeneous high-resistivity lithosphere according to the results of physical modeling; в—г — Measured fields of the «Khibiny» source: (в) the magnetic field vertical component, nT and г — the total electric field, mV/km on the Kola Peninsula. The measured field contours clearly show anomalies from the electron-conducting structures of Pechenga (upper left) and Imandra-Varzuga. Dots — measurement points [Zhamaletdinov, 1990].

порядка 20 кА и регистрировать сигнал на расстоянии до 750 км. Однако полученный источник оказался очень сложным: короткая заземленная линия (в основном электрическая мода) и почти горизонтальный изменяющийся во времени (при становлении импульса) и пространстве контур токов в море вокруг полуостровов с затеканием (порядка 20 %) в литосферу (в основном индукционная мода). Теория интерпретации для каждой моды различная, для надежного разделения мод не хватает данных, поэтому оно делается предположительно и приблизительно. К работам по зондированию с МГД были привлечены ведущие геоэлектрики страны (Л. Л. Ваньян, М. Н. Бердичевский, М. С. Жданов, Б. С. Светов, Э. Б. Файнберг и др.), разрабатывавшие вопросы теории и методики обработки. В коллективной монографии [Велихов, 1989] описывается множество интересных подходов, но надежного способа глубинного зондирования не описано из-за сложности проблемы. Абдулхай Азымович участвовал в выборе пунктов наблюдения, установке аппаратуры и проведении наблюдений как импульсов МГД, так и других «обычных» методов (ВЭЗ, ЧЗ...), он собрал и упорядочил все эти материалы. Импульсы МГД, зарегистрированные во всех пунктах, он выложил в Интернет и каждый мог поучаствовать в их интерпретации. Для небольших глубин сопоставление импульсов в близко расположенных пунктах (по существу, профилирование) позволило получить новые интересные результаты о проводимости в земной коре [Жамалетдинов, 1990].

Зондирование сверхнизкочастотной (СНЧ) установкой «Зевс». В конце 60-х годов в сверхдержавах возникла потребность в дальней связи с атомными подводными лодками, находящимися под водой в любой точке мирового океана. Несущая частота должна быть достаточно низкой, чтобы ЕМ-поле не затухло на глубине подводной лодки (порядка 100 м). В СССР была выбрана частота 82 Гц и установка мощностью 5 МВт с питающей горизонтальной линией длиной 60 км под кодовым

названием «Зевс», сооруженная на Мурманском блоке Кольского полуострова в 100 км юго-восточнее установки «Хибины» (рис. 2 и 3). Аналогичная американская установка работала в районе Великих озер на частоте 76 Гц. Геофизики начали использовать излучение установки «Зевс» в 1980-е годы и Абдулхай Азымович активно включился в эти работы. Он ежегодно выезжает в поле, совершенствуя аппаратуру и методику наблюдений, получает новые уникальные результаты: профили до юга Карелии и Финляндии, зондирования на нефтяных структурах Западной Сибири на расстоянии 2100 км, регистрацию его коллегами сигналов «Зевс» в Китае на расстоянии 5000—7000 км. Однако зондирование в поле одной линии имело ограниченные возможности и Абдулхай Азымович организовал исследование двумя линиями.

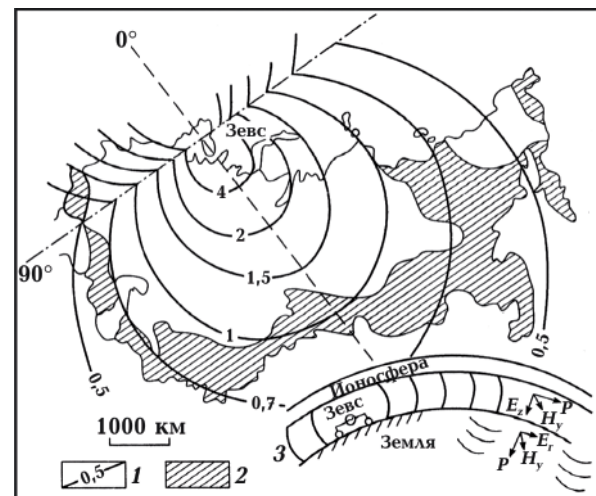


Рис. 2. Изолинии горизонтального магнитного поля источника «Зевс» в единицах 10^{-4} нТл: 1 — по теоретическим расчетам. Штриховая и штрихпунктирная прямые обозначают осевую (0°) и экваториальную (90°) линии источника; 2 — сейсмоопасные регионы на территории СНГ; 3 — схема распространения СНЧ-сигнала в волноводе Земля—ионосфера [Велихов и др., 1998].

Fig. 2. The horizontal magnetic field isolines of the «Zeus» source in units of 10^{-4} nT: 1—according to theoretical calculations. Dashed and dash-dotted straight lines denote the axial (0°) and equatorial (90°) lines of the source; 2 — earthquake-prone regions in the CIS; 3 — propagation diagram of an ELF signal in the Earth-ionosphere waveguide [Velikhov et al., 1998].

Тензорное зондирование «Феникс». В этом варианте используется две длинные взаимно перпендикулярные заземленные линии длиной порядка 100 км, в которые подаются со специально разработанных генераторов мощностью 100—200 кВт, сигналы синусоидальные или прямоугольные (меандр) с фиксированными частотами и с заданной линейной поляризацией. Такой источник при последовательном подключении обеих линий позволяет получить значения импеданса в двух направлениях и изучать параметры анизотропии и неоднородности. Методика и полученные результаты описаны в работах [Жамалетдинов и др., 2009, 2011, 2015], в настоящей статье они представлены на рис. 3, в и 4.

Работы с СНЧ излучателями обнаружили явление волноводного распространения сигнала в волноводе Земля — ионосфера.

На больших расстояниях поле убывает не обратно пропорционально кубу расстояния, как над однородным полупространством (3), а значительно медленнее и зависит от параметров ионосферы, сильно изменяющихся в течении суток и зависящих от сезона и геомагнитной активности [Жамалетдинов и др., 1999, 2015].

Первичные результаты наблюдений, полученных в экспериментах «Феникс», собраны в общедоступной базе данных на сайте <http://geoksc.apatity.ru/index.php/14-sample-data-articles/496-fenics-2019> [Жамалетдинов и др., 2015], как это было сделано в 1980-е годы с импульсами МГД-генератора.

Волгоград — Донбасс. Абдулхай Азымович задумал и организовал зондирование Волгоград—Донбасс с питающей линией длиной 473 км с токовыми импульсами

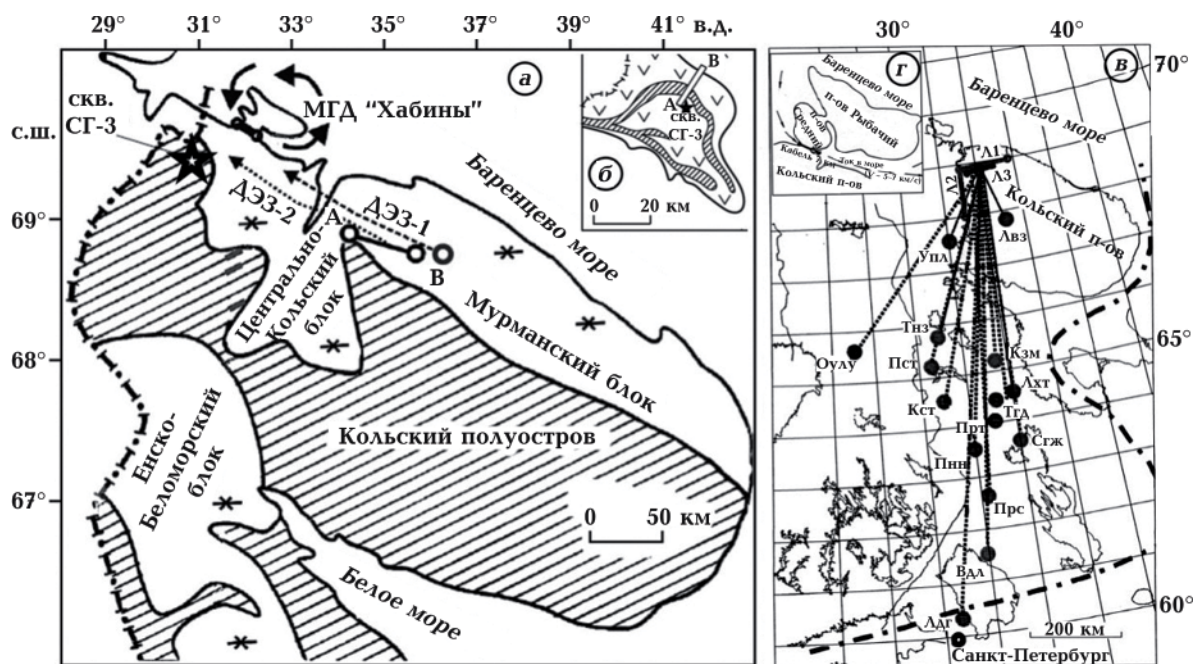


Рис. 3. Схема зондирований *a* — в окрестности сверхглубокой скважины СГ-3, показанной звездой; ДЭЗ — трассы детальных дипольных электрозондирований на постоянном токе; АВ — линия «Зевс»; *b* — окрестности сверхглубокой: Печенгское поле проводимости сульфидо-графитистой природы, выделенное косой штриховкой; *в* — эксперимент «Феникс»: пункты наблюдения (кружочки) и излучающие линии Л1-109 км, Л2-120 км, Л3 — линия «Зевс» 60 км. Штрихпунктир — граница Балтийского щита; *г* — растекание токов МГД.

Fig. 3. Sounding scheme *a* — in the superdeep borehole SD-3 vicinity, marked by the star; DES — traces of detailed dipole electrical soundings on direct current; АВ — «Zeus» line; *b* — Surroundings of the superdeep borehole: Pechenga conduction field of sulphide-graphitic nature, highlighted by oblique shading; *в* — Experiment Phoenix: observation points (circles) and radiating lines L1-109 km, L2-120 km, L3 — «Zeus» line 60 km. Dash-dotted line — Baltic shield border; *г* — MHD currents spreading.

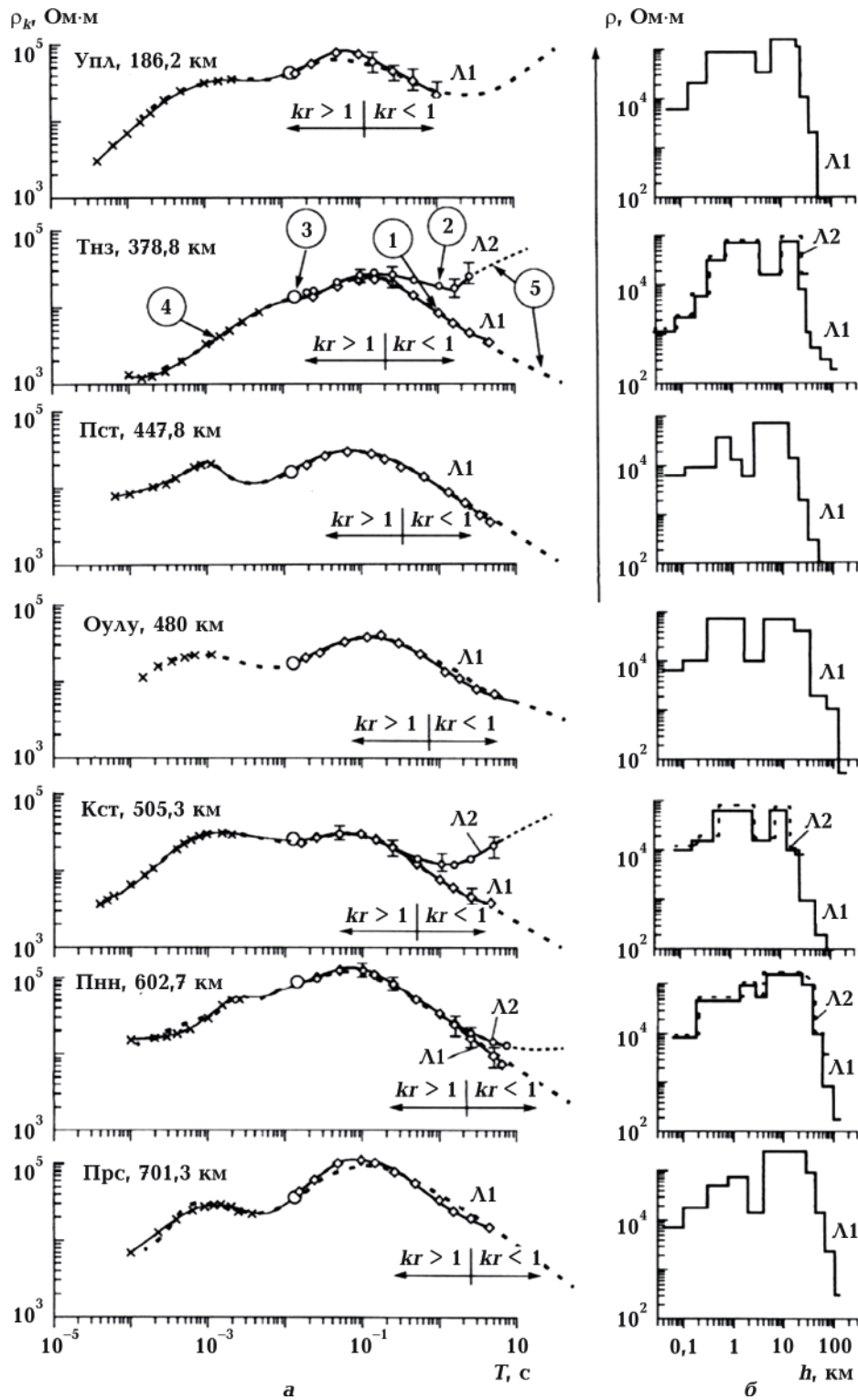


Рис. 4. Кривые кажущегося сопротивления (а) и полученных одномерных разрезов (б) в эксперименте «Феникс» [Жамалетдинов и др., 2009, 2011]. Кривые ρ_k скомпонованы по данным нескольких источников. На периодах короче 0,005 с крестиками даны результаты расчета по данным ВЭЗ с разносами до 10 км. Большим кругом на периоде 1/82 с (указан цифрой 3 на пункте Тнз) даны результаты зондирования установкой «Зевс» с фиксированной частотой 82 Гц. На более длинных периодах ромбиками показаны результаты зондирований с источником Л1, кружочками (пункты Тнз, Кст, Пнн) — с источником Л2; на коротких периодах ($kr > 1$) кружочки совпадают с ромбиками — волновая зона, на длинных ($kr < 1$) — рас-

± 700 А длительностью порядка 100 с, питаемой от Волгоградской ГЭС напряжением 800 кВ. Первый сеанс был проведен в 1979 г. двумя приемными станциями ЦЕС, была отработана методика, получены оценки поперечного сопротивления литосферы [Жамалетдинов и др., 1982]. К 1986 году удалось организовать Всесоюзный проект «Волга-86» с участием более 20 отрядов различных организаций, обеспечивших наблюдения в более чем 100 пунктах с удалением от источника до 700 км [Велихов и др., 1989]. Пятикомпонентные станции ночью регистрировали импульсы ЛЭП, а днем писали МТЗ. На Воронежском массиве были обнаружены две аномалии электропроводности. Десятки пунктов работали на Приазовском массиве и Донбассе. МВП на длинных периодах зафиксировало интенсивную аномалию электропроводности — Донбасскую, однако на записях импульсов ЛЭП и МТЗ эта аномалия отразилась весьма сложным образом и без МВП не была бы обнаружена.

Абдулхай Азымович организовал издание и выступил редактором сборника «Коровые аномалии электропроводности» (1984), написал в 2012 г. с С. Н. Куликом обзор «Крупнейшие аномалии электропроводности мира», во многих работах обсуждал природу аномалий, творчески отставивая для одних объектов электроннопроводящую природу [Жамалетдинов, 1996], для других — флюидную [Жамалетдинов, 2011а].

Абдулхай Азымович написал ряд учебников, много научно-популярных и публицистических работ (в том числе «Популярную астрономию»), а также высокохудожественные с великолепным восточным юмором «Легенды и изречения мудрейшего Джамаль-эт-Дина», которые следовало бы переиздать большим тиражом.

Выводы. Работы, выполненные А. А. Жамалетдиновым с мощными контролируруемыми источниками, являются высшим достижением мировой геоэлектрики в этой области. Это относится и к физико-математическому обоснованию методик исследования, и к подбору технических средств — мощных контролируемых источников поля и высокочувствительной регистрирующей аппаратуры, и к выбору геологических объектов исследования. Вот очень кратко основные полученные результаты.

Зондированиями с контролируемыми и естественными источниками детально исследована электропроводность литосферы Балтийского щита, установлена ее блочно-слоистая структура.

Выделены высокоомные блоки архейского возраста — «окна прозрачности», через которые удалось с хорошей точностью измерять поперечное сопротивление всей толщи литосферы.

Измерено «нормальное» поперечное сопротивление литосферы Балтийского щита. Оно равно $\sim 10^{10}$ Ом \times м². На его фоне в центральной Карелии и Финляндии была

ходятся, поскольку геометрические параметры азимутальной и осевой конфигураций зондирования не совпадают. Пунктиром даны теоретические кривые, рассчитанные по результатам решения обратной задачи, т. е. для разрезов рис. 4, б. На всех разрезах выделяется проводящий слой на глубине от 2 до 10 км с суммарной продольной проводимостью порядка 1 См, Жамалетдинов и соавторы предполагают, что этот слой имеет дилатантно-диффузионную природу.

Fig. 4. Apparent resistivity curves (a) and obtained one-dimensional resistivity cross-sections (b) in the Phoenix experiment [Zhamaletdinov et al., 2009, 2011]. The ρ_k curves are compiled from several sources. For periods shorter than 0,005 s that marked by crosses, the calculation results are given according to VES data with spacing of up to 10 km. The large circle at period 1/82 s (indicated by the number 3 at point Тнз) gives the results of sounding by the «Zeus» unit with a fixed frequency of 82 Hz. For longer periods, the results of sounding with the source L1 marked by rhombuses, with the source L2, by circles (points Тнз, Кст, Пнн); at short periods ($kr > 1$), the circles coincide with rhombuses — the wave zone, at long periods ($kr < 1$) — they diverge, since the geometric parameters of the azimuthal and axial sounding configurations do not coincide. The dotted line shows the theoretical curves calculated from the results of solving the inverse problem, i. e. for the cross-sections given in Fig. 4, б. In all sections, a conducting layer is distinguished at a depth of 2 to 10 km with a total longitudinal conductance in order of 1 S. Zhamaletdinov et al. suggest that this layer is of a dilatant-diffusion nature.

выявлена единая аномальная область пониженного поперечного сопротивления (до 10^9 Ом \times м²), примерно совпадающая с обширной областью понижения границы Мохо от 40 до 60 км, полученной по сейсмическим данным.

На блоках с высоким (более 5×10^4 Ом \times м) удельным сопротивлением верхней части коры на глубинах 1—20 км выделена область небольшого (в ~ 2 —5 раз) понижения сопротивления в интервале глубин 2—10 км. Предположена дилатантно-диффузионная природа этого понижения и ему придан термин ДДС — дилатантно-диффузионный слой. Он трудно наблюдаем и еще не совсем ясно, это слой или отдельные включения слегка пониженного сопротивления.

Из методических результатов отметим два:

– частотные зондирования (во многих случаях и ВЭЗ на постоянном токе) позволяют выполнять более корректную поправку статических искажений кривых МТЗ по сравнению с традиционной привязкой к глобальной кривой МВЗ;

– естественные источники поля рассматриваются как магнитная мода, в которой преобладают горизонтальные компоненты поля, и потому методы естественного МТ-

поля чувствительны к хорошо проводящим слоям и мало чувствительны к плохо проводящим образованиям литосферы. Искусственные контролируемые источники в ближней и промежуточной зонах, наоборот, более чувствительны к плохо проводящим слоям.

Рекомендация. Зондирования с контролируемыми источниками позволяют несколько иначе «взглянуть» на объекты геологических структур, различающихся по электропроводности (высокоомные слои, проводящие слои, вертикальные и наклонные разломы, трехмерные включения), по сравнению с МТ-методами естественного поля. Например, они легче определяют поперечное сопротивление плохопроводящих слоев, чем МТ-методы с их первично-горизонтальными полями, а последние легче определяют продольную проводимость слоев пониженного сопротивления.

Целесообразно крупные синхронные съемки методами МТЗ—МВП естественного поля дополнять измерениями сигналов мощного контролируемого источника.

Благодарность. Авторы выражают признательность Н. В. Реве и А. Н. Шевцову за полезные замечания и плодотворное обсуждение работы.

Список литературы

- Бердичевский М. Н., Ваньян Л. Л., Файнберг Э. Б. Частотное зондирование Земли по результатам сферического анализа электромагнитных вариаций. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1969. № 9. С. 372—374.
- Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. Москва: Научный мир, 1997. 218 с.
- Велихов Е. П. (отв. ред.). Геоэлектрические исследования с мощным источником тока на Балтийском щите. Москва: Наука, 1989. 272 с.
- Велихов Е. П., Жамалетдинов А. А., Токарев А. Н., Асминг В. Э., Шевцов А. Н., Гуревич А. Е., Ковалевский В. А., Мержеевский В. А., Тетерин В. П., Байсарович М. Н., Ингеров А. И., Попов В. М., Ваньян Л. Л., Рокитянский И. И., Сапужак Я. С. Эксперимент «Волга» по глубинному зондированию земной коры с использованием линии электропередачи постоянного тока. *Докл. АН СССР*. 1989. Т. 307. № 5. С. 1077—1081.
- Велихов Е. П., Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Токарев А. Д., Кононов Ю. М., Песин Л. Б., Кадышев Г. М., Пертель М. И., Вещев А. В. Глубинные электромагнитные исследования с применением мощных сверхнизкочастотных радиоустановок. *Физика Земли*. 1998. № 8. С. 3—22.
- Жамалетдинов А. А. Графит в земной коре и аномалии электропроводности. *Физика Земли*. 1996, № 4. С. 12—29.
- Жамалетдинов А. А. Кольская сверхглубокая скважина СГ-3 — 50 лет. *Геофизические процессы и биосфера*. 2020. Т. 19. № 4. С. 94—

116. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.4-7>.
- Жамалетдинов А. А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируруемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Ленинград: Наука, 1990. 159 с.
- Жамалетдинов А. А. О флюидной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по результатам электромагнитных зондирований и каротажа сверхглубоких скважин. *Физика Земли*. 2011а. № 1. С. 1—11.
- Жамалетдинов А. А. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируруемыми источниками. Материалы 5-й Всерос. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли. Санкт-Петербург: Изд. СПб ун-та, 2011б. С. 21—51.
- Жамалетдинов А. А., Ковалевский В. Я., Павловский В. И., Таначев Г. С., Токарев А. Д. Глубинное электрозондирование с ЛЭП постоянного тока 800 кВ «Волгоград-Донбасс». *Докл. АН СССР*. 1982. Т. 265. № 5. С. 1101—1105.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Велихов Е. П., Скороходов А. А., Колесников В. Е., Короткова Т. Г., Рязанцев П. А., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Баранник М. Б., Прокопчук П. И., Селиванов В. Н., Копытенко Ю. А., Копытенко Е. А., Исмагилов В. С., Петрищев М. С., Сергушин П. А., Терещенко П. Е., Самсонов Б. В., Бируля М. А., Смирнов М. Ю., Корья Т., Ямпольский Ю. М., Колосков А. В., Бару Н. А., Поляков С. В., Щенников А. В., Дружин Г. И., Джозвиак В., Реда Я., Щорс Ю. Г. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ—СНЧ диапазона (0,1—200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент «FENICS»). *Геофизические процессы и биосфера*. 2015. Т. 14. № 2. С. 5—49.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Короткова Т. Г., Ефимов Б. В., Баранник М. Б., Колобов В. В., Прокопчук П. И., Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Песин Л. Б. Глубинные зондирования с промышленными ЛЭП в комплексе с МТЗ (CSMT). *Физика Земли*. 2007. № 3. С. 74—80.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Короткова Т. Г., Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Ефимов Б. В., Баранник М. Б., Колобов В. В., Прокопчук П. И., Смирнов М. Ю., Вагин С. А., Пертель М. И., Терещенко Е. Д., Васильев А. Н., Гохберг М. Б., Корья Т. Международный эксперимент FENICS по тензорному частотному электромагнитному зондированию литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита. *Докл. АН*. 2009. Т. 427. № 3. С. 388—393.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Короткова Т. Г., Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Петрищев М. С., Ефимов Б. В., Баранник М. Б., Колобов В. В., Прокопчук П. И., Смирнов М. Ю., Вагин С. А., Пертель М. И., Терещенко Е. Д., Васильев А. Н., Григорьев В. Ф., Гохберг М. Б., Трофимчик В. И., Ямпольский Ю. М., Колосков А. В., Федоров А. В., Корья Т. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент Fenics). *Физика Земли*. 2011. № 1. С. 4—26.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Токарев А. Н., Кононов Ю. М., Ваньян Л. Л. Влияние ионосферы и токов смещения на результаты глубинных электромагнитных зондирований в поле СНЧ антенны. *Докл. АН*. 1999. Т. 366. № 5. С. 688—691.
- Рокитянский И. И. Заметки о геоэлектрике. *Геофиз. журн*. 2012. Т. 34. № 4. С. 235—244. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116777>.
- Рокитянский И. И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наук. думка, 1981. 296 с.
- Рокитянский И. И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 296 с.
- Рокитянский И. И. Исследование глубинной электропроводности. *Геофиз. сб. АН УССР*. 1970. № 38. С. 102—106.
- Сараев А. К., Косткин П. М. Структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. *Вопросы геофизики*. 1998. Вып. 35. С. 117—135.
- Тихонов А. Н. Об устойчивости обратных задач. *Докл. АН СССР*. 1943. Т. 39. С. 195—198.

- Backus, G., & Gilbert, F. (1967). Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problem. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 13(1-3), 247—276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1967.tb02159.x>.
- Backus, G., & Gilbert, F. (1970). Uniqueness in the inversion of inaccurate gross Earth data. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 266, 123—192. <https://doi.org/10.1098/rsta.1970.0005>.
- Parker, R. L. (1972). Inverse theory with grossly inadequate data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 29(2), 123—138. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02203.x>.

Multiparameter approach in the deep geoelectrics

I. I. Rokityansky, A. V. Tereshyn, 2021

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy
of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

The main provisions of geoelectrics are described, the importance of taking into account the ambiguity of its inverse problem is emphasized. Three main methods of deep geoelectrics which use natural fields of ionospheric-magnetospheric origin are considered: geomagnetic deep sounding (GDS), magnetotelluric sounding (MTS), and magnetovariational profiling (MVP). The response functions of each method are described. Each response function carries its own specific information about some parameters of the studied object and is characterized by the degree of reliability of the information about the object extracted from it. For example, the most reliable information about electrical conductivity anomalies (if any in the study area) is contained in the MVP response functions. The horizontal tensor of the anomalous field contains information about the electrical conductivity under the observation point, and the tipper (induction vector) contains information from the surrounding areas. In general, MVP information is less susceptible to distortions than MTS information and deserves more trust. Artificial field sources in deep geoelectrics are rarely used due to their high cost. Since 1970, two powerful sources created for other purposes arised on the Kola Peninsula and were used for deep sounding. In the center of these studies found themself young talented geologist-geophysicist and organizer of major projects AbdulkhaiAzimovichZhamaletdinov. The «Khibiny» project with an MHD generator and an ultra-deep well as one of the objects of the study, the «Zeus» low-frequency emitter, the signals of which were recorded in China at a distance of 7000 km, and a number of projects conceived and organized by Zhamaletdinov and executed under his leadership: «Volgograd-Donbass» (1979, 1986), experiments «PHOENIX» (2007, 2009, 2014, 2019) and others. At the same time, methods of interpretation were developed for sounding with artificial EM sources and new response functions were obtained which make it possible to «see» the object of research in a new way. This experience must be preserved, generalized, improved and used, for example as follows. In the area of modern synchronous multipoint MTS-MVP survey, a controlled source composed of two grounded lines emits strong current (harmonics at fixed frequencies and/or pulses) which signal will be recorded by survey instruments during night-time sessions.

Key words: deep geoelectrics, response function, Earth electrical conductivity.

References

- Berdichevskiy, M. N., Vanyan, L. L., & Faynberg, E. B. (1969). Frequency sounding of the Earth based on the results of spherical analysis of electromagnetic variations. *Geomagnetizm i aeronomia*, (9), 372—374 (in Russian).
- Vanyan, L. L. (1997). *Electromagnetic soundings*. Moscow: Nauchnyy Mir, 218 p. (in Russian).
- Velikhov, E. P. (Ed.). (1989). *Geoelectric research with a powerful current source at the Baltic Shield*. Moscow: Nauka, 272 p. (in Russian).
- Velikhov, E. P., Zhamaletdinov, A. A., Tokarev, A. N., Asming, V. E., Shevtsov, A. N., Gurevich, A. E., Kovalevskiy, V. A., Merzheevskiy, V. A., Teterin, V. P., Baysarovich, M. N., Ingerov, A. I., Popov, V. M., Vanyan, L. L., Rokityansky, I. I., & Sapuzhak, Ya. S. (1989). The experiment «Volga» on Earth's crust deep sounding using a DC power line. *Doklady AN SSSR*, 307(5), 1077—1081 (in Russian).
- Velikhov, E. P., Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Tokarev, A. D., Kononov, Yu. M., Pesin, L. B., Kadyshovich, G. M., Pertel, M. I., & Veschev, A. V. (1998). Deep electromagnetic research using powerful extra-low-frequency radio installations. *Fizika Zemli*, (8), 3—22 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A. (1996). Graphite in the Earth's Crust and Electrical Conductivity Anomalies. *Fizika Zemli*, (4), 12—29 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A. (2020). Kola superdeep well SD-3—50 years. *Geofizicheskie protsesy i biosfera*, 19(4), 94—116. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.4-7> (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A. (1990). *Model of the electrical conductivity of the lithosphere based on the results of studies with controlled field sources (Baltic shield, Russian platform)*. Leningrad: Nauka, 159 p. (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A. (2011a). On the fluid nature of intermediate conductive layers in the earth's crust based on the results of electromagnetic sounding and superdeep well logging. *Fizika Zemli*, (1), 1—11 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A. (2011b). Theory and methodology of deep electromagnetic sounding with powerful controlled sources. *Materials of the 5th All-Russian School-Seminar on Electromagnetic Earth Sounding* (pp. 21—51). St. Petersburg: Edition of St. Petersburg University (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A., Kovalevskiy, V. Ya., Pavlovskiy, V. I., Tanachev, G. S., & Tokarev, A. D. (1982). Deep electrical sounding from 800 kV DC transmissionlines «Volgograd-Donbass». *Doklady AN SSSR*, 265(5), 1101—1105 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Velikhov, E. P., Skorokhodov, A. A., Kolesnikov, V. E., Korotkova, T. G., Ryazantsev, P. A., Efimov, B. V., Kolobov, V. V., Barannik, M. B., Prokopchuk, P. I., Selivanov, V. N., Kopytenko, Yu. A., Kopytenko, E. A., Ismagilov, V. S., Petrishchev, M. S., Sergushin, P. A., Tereshchenko, P. E., Samsonov, B. V., Birulya, M. A., Smirnov, M. Yu., Korya, T., Yampolsky, Yu. M., Koloskov, A. V., Baru, N. A., Polyakov, S. V., Shchennikov, A. V., Druzhin, G. I., Dzhozviak, V., Reda, Ya., & Shchors, Yu. G. (2015). Study of the interaction of ELF—SLF electromagnetic waves (0,1—200 Hz) with the earth's crust and ionosphere in the field of industrial power transmission lines (experiment «FENICS»). *Geofizicheskie protsesy i biosfera*, 14(2), 5—49 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Korotkova, T. G., Efimov, B. V., Barannik, B. G., Kolobov, V. V., Prokopchuk, P. I., Kopytenko, Yu. A., Ismagilov, V. S., & Pesin, L. B. (2007). Deep sounding with industrial powerlines in combination with MTS (CSMT). *Fizika Zemli*, (3), 74—80 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Korotkova, T. G., Kopytenko, Yu. A., Ismagilov, V. S., Efimov, B. V., Barannik, M., Kolobov, V. V., Prokopchuk, P. I., Smirnov, M. Yu., Vagin, S. A., Pertel, M. I., Tereshchenko, E. D., Vasiliev, A. N., Gokhberg, M. B., & Korya, T. (2009). International experiment FENICS on tensor frequency electromagnetic sounding of the lithosphere in the eastern part of the Baltic (Fennoscandian) shield. *Doklady AN*, 427(3), 388—393 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Korotkova, T. G., Kopytenko, Yu. A., Ismagilov, V. S., Petrishchev, M. S., Efimov, B. V., Baran-

- nik, M. B., Kolobov, V. V., Prokopchuk, P. I., Smirnov, M. Yu., Vagin, S. A., Pertel, M. I., Tereshchenko, E. D., Vasiliev, A. N., Grigoriev, V. F., Gokhberg, M. B., Trofimchik, V. I., Yampolsky, Yu. M., Koloskov, A. V., Fedorov, A. V., & Korya, T. (2011). Deep electromagnetic sounding of the lithosphere of the eastern part of the Baltic (Fennoscandian) shield in the field of powerful controlled sources and industrial transmission lines (Fenics experiment). *Fizika Zemli*, (1), 4—26 (in Russian).
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Tokarev, A. N., Kononov, Yu. M., & Vanyan, L. L. (1999). Influence of the ionosphere and displacement currents on the results of deep electromagnetic sounding in the field of an ELF antenna. *Doklady AN*, 366 (5), 688—691 (in Russian).
- Rokityansky, I. I. (2012). Notes on geoelectrics. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(4), 235—244. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116777> (in Russian).
- Rokityansky, I. I. (1981). *Induction sounding of the Earth*. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).
- Rokityansky, I. I. (1975). *Investigation of electrical conductivity anomalies by the method of magnetovariational profiling*. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).
- Rokityansky, I. I. (1970). Investigation of deep electrical conductivity. *Geofizicheskiy sbornik AN USSR*, (38), 102—106 (in Russian).
- Saraev, A. K., & Kostkin, P. M. (1998). The structure of the electromagnetic field of an ELF radio installation. *Voprosy geofiziki*, (35), 117—135 (in Russian).
- Tikhonov, A. N. (1943). On the stability of inverse problems. *Doklady AN SSSR*, 39, 195—198 (in Russian).
- Backus, G., & Gilbert, F. (1967). Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problem. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 13(1-3), 247—276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1967.tb02159.x>.
- Backus, G., & Gilbert, F. (1970). Uniqueness in the inversion of inaccurate gross Earth data. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 266, 123—192. <https://doi.org/10.1098/rsta.1970.0005>.
- Parker, R. L. (1972). Inverse theory with grossly inadequate data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 29(2), 123—138. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02203.x>.

Багатопараметричний підхід у глибинній геоелектриці

І. І. Рокитянський, А. В. Терешин, 2021

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Описано основні положення геоелектрики, підкреслено важливість врахування неоднозначності її оберненої задачі. Розглянуто три основні методи глибинної геоелектрики, які використовують природні поля іоносферно-магнітосферного походження: магнітоваріаційне зондування (МВЗ), магнітотелуричне зондування (МТЗ) та магнітоваріаційне профілювання (МВП). Описано функції відгуку кожного методу. Кожна функція відгуку несе свою специфічну інформацію про деякі параметри досліджуваного об'єкта і характеризується ступенем достовірності інформації про об'єкт, яку отримують із неї. Наприклад, найдостовірнішу інформацію про аномалії електропровідності (якщо вони є на площі дослідження) мають функції відгуку МВП. Горизонтальний тензор аномального поля містить інформацію про електропровідність під пунктом спостереження, а типер (вектор індукції) — інформацію із навколишніх ділянок. У цілому інформація МВП менш спотворюється, ніж інформація МТЗ, і заслуговує на більшу довіру. Штучні джерела поля у глибинній геоелектриці використовують рідко у зв'язку із їх дорожнечою. Із 1970 р. два потужні джерела, що були створені для інших цілей, знаходились на Кольському півострові та були

використані для глибинних зондувань. У центрі цих досліджень опинився молодий талановитий геолог-геофізик і організатор великих проєктів Абдулхай Азимович Жамалетдинов. Це проєкт «Хібіни» із МГД генератором і надглибокою свердловиною як одного із об'єктів дослідження, низькочастотний випромінювач «Зевс», сигнали якого записано в Китаї на відстані 7000 км, а також низка проєктів, задуманих та організованих А. А. Жамалетдиновим і виконаних під його керівництвом: Волгоград—Донбас (1979, 1986), експерименти «Фенікс» (2007, 2009, 2014, 2019) та ін. При цьому було розроблено методики інтерпретації для зондувань із використанням штучних електромагнітних джерел, отримано нові функції відгуку, що дало змогу по-новому «побачити» об'єкт дослідження. Цей досвід необхідно зберегти, узагальнити, удосконалити і використовувати, наприклад, у такий спосіб. Під час проведення синхронного багатоточкового знімання методами MTS-MVP обладнують контрольоване джерело, яке складається із двох заземлених ліній, через які пропускають сильний струм у вигляді гармонік на фіксованих частотах та/або імпульсів, сигнали якого реєструватимуть прибори мережі МТЗ—МВП під час нічних сеансів.

Ключові слова: глибинна геоелектрика, функції відгуку, електропровідність Землі.