

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.837

В.А. КУЛИКОВ, П.Ю. ПУШКАРЕВ, А.Г. ЯКОВЛЕВ, А.Д. ЯКОВЛЕВ

ОПЫТ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ НА РУССКОЙ ПЛИТЕ

Рассмотрены результаты работ методом частотных зондирований (ЧЗ) в трех районах Русской плиты. Совместная интерпретация кривых, полученных по разным компонентам поля, дала информацию как о проводящих слоях, так и о высокоомных экранах. Математическое моделирование ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах показало, что вопрос о точке записи можно решить, применяя импедансные измерения. При наличии в осадочном чехле высокоомных экранов целесообразно в качестве источника использовать вертикальный магнитный диполь. Если высокоомные экраны отсутствуют, импедансные измерения эффективнее проводить в поле горизонтального электрического диполя.

При изучении осадочного чехла платформ широко используются магнитотеллурические зондирования (МТЗ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Метод частотных зондирований (ЧЗ), хотя обладает очевидными преимуществами с точки зрения помехоустойчивости, применяется значительно реже, поскольку не решены некоторые принципиальные вопросы интерпретации данных этого метода.

Одномерная теория ЧЗ достаточно развита [2]. В ее рамках авторами создана программа решения прямой и обратной задач, позволяющая быстро рассчитывать теоретические и интерпретировать полевые кривые для любых установок в широком диапазоне частот и разносов [8].

Значительно слабее разработаны вопросы, связанные с применением ЧЗ в реальных трехмерных средах. Основной из них — выбор точки записи, т.е. точки, к которой относятся результаты одномерной интерпретации данной кривой [1, 4, 6, 7]. Дело в том, что частотные зондирования выполняются в дальней зоне (разнос между источником и приемником, как правило, составляет от 5 до 15 км). При региональных исследованиях и в условиях плавного изменения разреза можно использовать осредненные кривые для двусторонних или встречных установок [1, 4]. Такие кривые характеризуют область, горизонтальные размеры которой сопоставимы с расстоянием между источником и приемником. Данный подход применен авторами в трех районах Русской плиты (юго-восток Рязано-Саратовского прогиба, Токмовский свод, юго-запад Московской синеклизы).

При существенных горизонтальных изменениях геоэлектрического разреза, а также при детальном исследовании, произвол в выборе точки

записи порождает грубые ошибки в результатах интерпретации. Избежать этого поможет применение импедансных измерений [6, 7]. Для изучения возможностей импедансных ЧЗ авторами выполнено математическое моделирование в горизонтально-неоднородных средах. Получены полевые импедансные кривые для горизонтального электрического и вертикального магнитного диполей.

Методика полевых работ. Для создания переменного электромагнитного поля применялась генераторная группа УГЭ-50, способная возбуждать в земле стабилизированный ток силой до 100 А. Ток подавался либо в заземленную линию АВ длиной около 1 км, либо в незаземленную петлю Q размером 600 × 600 м. Измерения производились как с помощью портативных измерителей ЭИН-204, так и многоканальной цифровой станции ЦЭС-М. Использовалась экваториальная установка, причем измерялись три компоненты поля — горизонтальная электрическая E_x , горизонтальная магнитная H_y и вертикальная магнитная H_z (ось x направлена вдоль питающего диполя). Датчиками служили соответственно приемные линии длиной 50—500 м, индукционные датчики и многовитковые петли размером 100 × 100 м. Частота сигнала, имеющего форму меандра, менялась в геометрической прогрессии от 0,019 до 312 Гц с шагом, равным 2. Регистрировалась амплитуда сигнала на первой, третьей и пятой гармониках, что позволило увеличить число точек на кривой и расширить частотный диапазон. Компоненты H_z , H_y , E_x измерялись устойчиво в диапазоне разносов соответственно до 10, 18 и 25 км.

Метод ЧЗ применяли в комплексе с МТЗ и ЗСБ. С помощью ЗСБ в основном изучена верхняя часть разреза. Метод МТЗ позволил получить информацию о нижних горизонтах чехла, фундаменте и земной коре. Между данными ЗСБ и МТЗ был разрыв, охватывающий среднюю часть осадочного чехла, который удалось заполнить с помощью метода ЧЗ.

Рассмотрим примеры практического применения частотных зондирований на территории Русской плиты.

Юго-восток Рязано-Саратовского прогиба характеризуется выдержанным по горизонтали разрезом. Это позволило применять одиночные зондирования и относить точку записи к середине установки. В осадочном чехле отсутствуют высокоомные экраны [5], поэтому кривые по горизонтальной электрической компоненте $\rho_{\omega}(E_x)$ и по вертикальной магнитной компоненте $\rho_{\omega}(H_z)$ имеют схожую форму (рис. 1, А) и отражают разрез до кристаллического фундамента.

Геоэлектрический разрез, полученный в результате интерпретации материалов по району (модель 1), приведен в таблице. Первый слой — терригенный комплекс J_2 , второй — глины и известняки C_2 , третий — аргиллиты с прослоями песчаников C_2 . Ниже залегают известняки C_1 — C_2 , глины C_1 , известняки с прослоями аргиллитов D_3 — C_1 и терригенно-карбонатная толща D_2 — D_3 . В основании разреза находится высокоомный фундамент. Результаты интерпретации данных ЧЗ хорошо согласуются с априорной геолого-геофизической информацией.

В районе Токмовского свода комплексом методов ЗСБ, ЧЗ, МТЗ отработан профиль общей протяженностью 100 км от г. Лада до г. Алатырь (республика Мордовия).

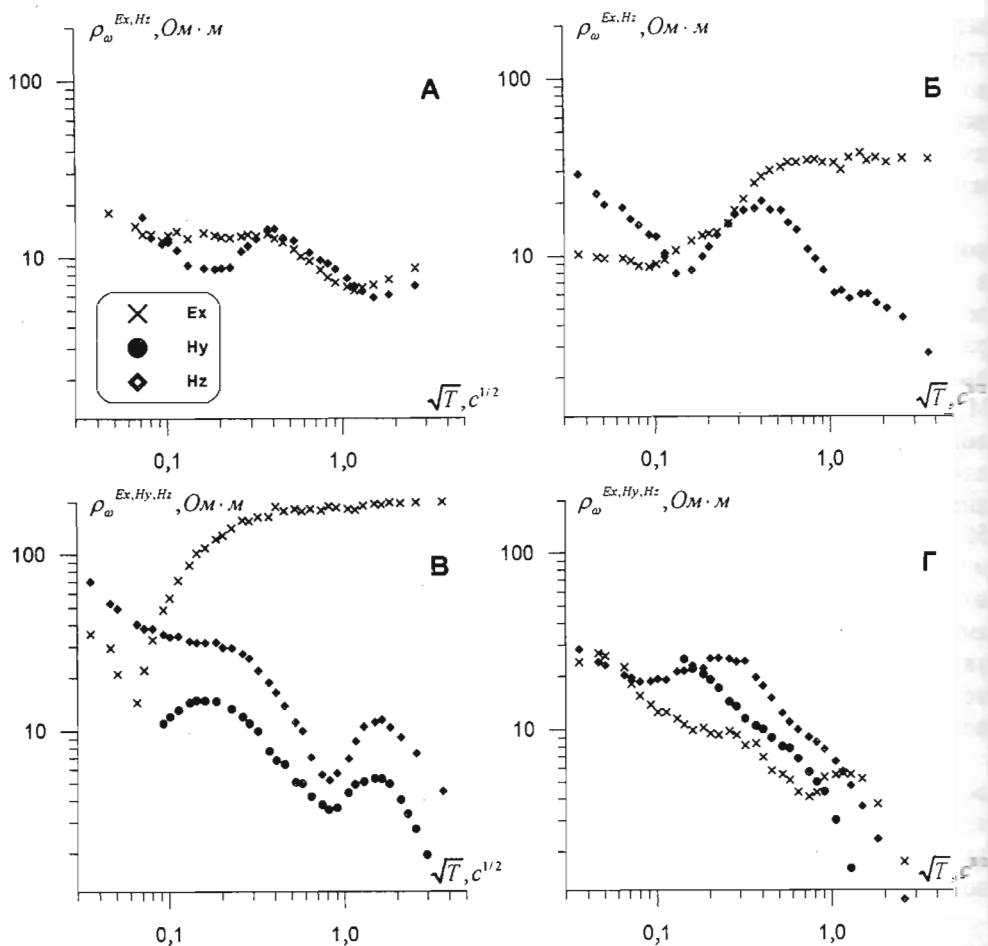


Рис. 1. Полевые кривые ЧЗ: А — Рязано-Саратовский прогиб, источник АВ, разнос 9400 м; Б — Токмовский свод, источник АВ, разнос 6000 м; В, Г — юго-западная часть Московской синеклизы: В — источник АВ, разнос 7640 м; Г — источник Q, разнос 3660 м.

Кривые ЧЗ медленно меняются по профилю. Типичные кривые представлены на рис. 1, Б. Двусторонние кривые, полученные от одного АВ, либо совпали, либо оказались близки по форме. Поэтому в дальнейшем использовали осредненные двусторонние кривые, причем точка записи относилась к источнику. Обобщенная модель разреза, построенного в результате интерпретации кривых, приведена в таблице. Невязка полевых и расчетных кривых составила менее 5 %.

Первый слой разреза (модель 2) представлен преимущественно песчаными, а второй — главным образом глинистыми отложениями мезозоя. Ниже находятся карбонатная толща С—D₃ и терригенные породы верхнего девона. В основании разреза залегает высокоомный фундамент. Геоэлектрический разрез, полученный по результатам ЧЗ, хорошо согласуется с данными других методов. При совместной интерпретации результатов методов ЗСБ, ЧЗ и МТЗ удалось построить общий разрез по всему профилю. Небольшой объем работ, выполненных методом ЧЗ, позволил получить информацию об участках, расположенных вблизи населенных пунктов, где качество кривых МТЗ невысоко из-за промышленных помех. Кроме того, по

Геоэлектрические разрезы в пределах Русской плиты

| Район | Номер слоя | ρ | h |
|---|------------|--------|------|
| Юго-восточная часть Рязано-Саратовского прогиба | 1 | 20 | 100 |
| | 2 | 9 | 260 |
| | 3 | 15 | 240 |
| | 4 | 30 | 230 |
| | 5 | 1 | 160 |
| | 6 | 60 | 270 |
| | 7 | 10 | 1000 |
| | 8 | 1000 | |
| Токмовский свод | 1 | 23 | 100 |
| | 2 | 4,5 | 90 |
| | 3 | 450 | 720 |
| | 4 | 0,9 | 400 |
| | 5 | 1000 | |
| Юго-западная часть Московской синеклизы | 1 | 30 | 100 |
| | 2 | 25000 | 100 |
| | 3 | 10 | 100 |
| | 4 | 5000 | 250 |
| | 5 | 2,5 | 500 |
| | 6 | 1000 | |

Примечание. Удельное сопротивление ρ в Ом · м, мощность h — в метрах

результатам интерпретации ЧЗ определено поперечное сопротивление экрана, что важно при оценке разрешающей способности кривых МТЗ по отношению к параметрам подэкранной толщи.

В юго-западной части Московской синеклизы выполнено около 150 точек частотных зондирований. В качестве источников поля поочередно использовали 9 заземленных линий АВ и одну незаземленную петлю Q. На рис. 1, В, Г показаны типичные кривые ЧЗ, полученные с использованием различных установок.

Верхняя часть разреза неоднородна по горизонтали. Четвертичные и каменноугольные отложения изрезаны современными и древними речными долинами, поэтому от точки к точке кривые сильно меняются и многие из них заметно искажены. В связи с этим для интерпретации использованы осредненные встречные кривые с предварительной отбраковкой заведомо искаженных. Подобный подход возможен при региональных исследованиях, в задачу которых входит изучение фонового разреза, но не пригоден для детального изучения строения района.

В результате интерпретации построен сводный геоэлектрический разрез (модель 3) для района (таблица). Первый слой представлен четвертичными моренными образованиями, известково-глинистыми и песчаными отложениями S_1 . Второй слой сложен преимущественно карбонатными породами верхнего девона с прослоями гипсов, обладающих очень высокими сопротивлениями. Ниже по разрезу залегают глины D_3 . Четвертый слой

образован плотными известняками D_3 с прослоями гипсов. На фундаменте залегают терригенные отложения D_2 — в основном пески и песчаники, насыщенные высокоминерализованными (до 200 г/л) водами.

Анализ одномерных моделей. Расчет кривых ЧЗ для одномерных моделей позволил определить возможности и ограничения разных модификаций частотных зондирований.

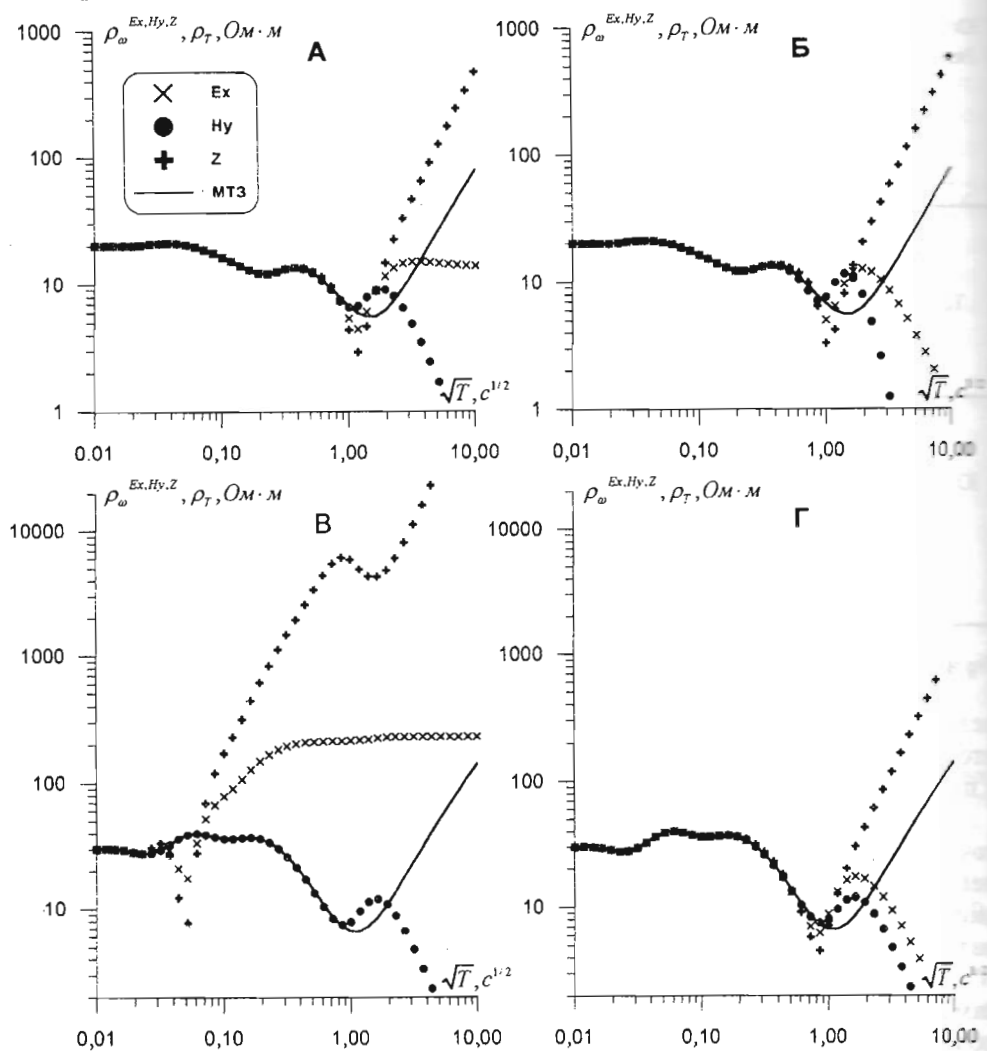


Рис. 2. Результаты расчета прямой одномерной задачи (разнос 6000 м): А — модель 1, источник АВ; Б — модель 1, источник Q; В — модель 3, источник АВ; Г — модель 3, источник Q

Как и следовало ожидать, для разрезов, содержащих высокоомный экран с суммарным поперечным сопротивлением 1 млн Ом · м² и более (модель 3 — рис. 2, В, Г), кривые $\rho_\omega(E_x)$ при возбуждении электрическим диполем не несут достаточной информации о заэкранированной толще, но позволяют определить глубину кровли и поперечное сопротивление экрана. Чтобы кривые $\rho_\omega(E_x)$ «почувствовали» подэкранную толщу, необходимо использовать столь большие разности, что уровня сигнала не хватит для

получения удовлетворительной точности даже с использованием станции ЦЭС-М в качестве измерителя. В то же время кривые по магнитным компонентам поля электрического диполя, а также по всем компонентам поля магнитного диполя, напротив, не «чувствуют» сопротивление маломощного экрана, но позволяют изучать нижележащие слои.

Расчеты подтверждают целесообразность измерения горизонтальной компоненты магнитного поля, возможность использования которой рассмотрена в [6]. Эта компонента ранее считалась малоинформативной, так как пропорциональна не сопротивлению среды, а лишь корню из него. Однако при расчете кривых кажущегося сопротивления компонента H_y возводится в квадрат, поэтому кривые $\rho_{\omega}(H_y)$ при высокоточных измерениях сопоставимы по информативности с кривыми $\rho_{\omega}(H_z)$. Применение станции ЦЭС-М позволяет с помощью индукционных датчиков измерять горизонтальную составляющую магнитного поля с необходимой точностью. Компонента H_y убывает с расстоянием на порядок медленнее компоненты H_z . Следовательно, ее можно регистрировать на больших разносах, повышая таким образом, глубинность исследований. Кроме того, измерив компоненту H_y , можно перейти к импедансу $Z = E_x/H_y$.

Как видно из рис. 2, А, Б, наиболее благоприятна для применения импедансных ЧЗ с электрическим возбуждением модель 1, в которой отсутствуют экраны. Кривые, полученные по всем компонентам, хорошо отражают весь разрез осадочного чехла и в широком диапазоне частот совпадают с кривыми МТЗ. В этом случае использование импеданса, как показано ниже, устраняет неопределенность в выборе точки записи и уменьшает влияние неоднородностей вблизи питающего диполя. При наличии в осадочном чехле высокоомного экрана (модель 3) импедансные кривые ЧЗ, полученные с электрическим возбуждением, зависят от разноса и азимутального угла. Очевидно, в этом случае вопрос о точке записи остается открытым. Выход видится либо в использовании магнитовариационного

импеданса $Z = -i\omega\mu_0 H_z / \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \right)$, либо в переходе к индукционному возбуждению (рис. 2, Г).

Анализ горизонтально-неоднородных моделей. Для изучения влияния приповерхностных неоднородностей на кривые ЧЗ, полученные при электрическом возбуждении, авторами проведено математическое моделирование с применением программы пленочного моделирования Э.Б. Файнберга и Б.Ш. Зингера [3].

Рассмотрим результаты моделирования для двух важных моделей. Первая представляет собой горизонтально-слоистую среду (одномерная модель 3) с низкоомной неоднородностью в верхнем слое. Питающий диполь АВ располагался на неоднородности, ближе к ее краю. На рис. 3, А в плане показана схема модели. Здесь же приведены некоторые результаты моделирования в виде кривых ЧЗ для точки, расположенной в 10 км от АВ. Видно, что импедансная кривая наилучшим образом характеризует разрез в точке наблюдения, а кривые, построенные по компонентам, смещены по уровню.

Вторая модель — двухслойный разрез с постепенно выклинивающимся первым слоем, что достигается плавным уменьшением продольной проводимости пленки S . Линия профиля расположена по направлению градиента S , причем питающий диполь находится в области больших значений S , а с ростом

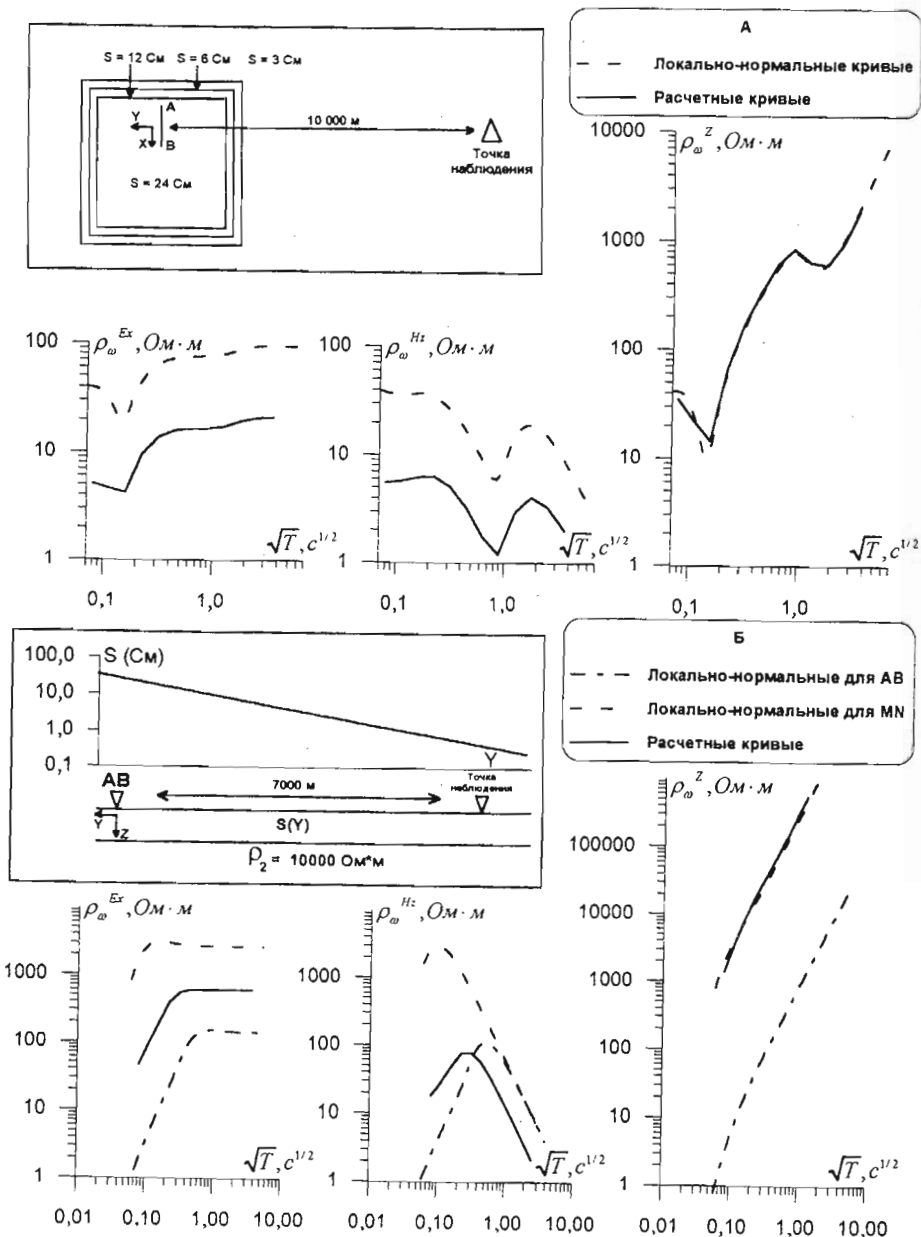


Рис. 3. Схемы модели, результаты моделирования: А — локальной неоднородности под источником (источник АВ, разнос 10000 м), Б — региональной аномалии (источник АВ, разнос 7000 м)

разноса точка наблюдения попадает в область все меньших значений S . Схема модели (в разрезе) показана на рис. 3, Б. Здесь же представлены результаты расчетов для этой модели. Видно, что расчетные кривые $\rho_{\omega}(E_x)$ и $\rho_{\omega}(H_z)$ не совпадают ни с локально-нормальными кривыми для точки, в которой размещался диполь АВ, ни с локально-нормальными кривыми для точки наблюдения. Напротив, расчетная импедансная кривая совпадает с локально-нормальной кривой для точки наблюдения. Это доказывает, что точка записи при импедансных измерениях относится к точке наблюдения.

Обобщая результаты расчета для ряда трехмерных моделей, отметим следующее: 1. Кривые ЧЗ искажаются лишь теми локальными неоднородностями, которые находятся вблизи питающего или приемного диполя; 2. Кривые $\rho_{\omega}(E_x)$ и $\rho_{\omega}(H_y)$ и в случае локальной неоднородности в точке наблюдения смещаются по уровню, слабо искажаясь по форме. Например, над проводящей неоднородностью кривые $\rho_{\omega}(E_x)$ смещаются вниз, а кривые $\rho_{\omega}(H_y)$ вверх. Кривые $\rho_{\omega}(H_z)$ искажены наиболее сложно, не столько по уровню, сколько по форме; 3. Если питающий диполь находится в центре локальной неоднородности, превышающей его размеры, кривые $\rho_{\omega}(E_x)$, $\rho_{\omega}(H_y)$ и $\rho_{\omega}(H_z)$ просто смещаются по уровню; 4. Характер и степень искажения кривых приповерхностными неоднородностями зависят от наличия в чехле высокоомного экрана; 5. Кривые, полученные по импедансу, наилучшим образом отражают разрез в точке наблюдения и слабо зависят от неоднородностей вблизи питающего диполя.

Заклучение

При отсутствии в осадочном чехле высокоомных экранов целесообразно применение импедансных ЧЗ с электрическим возбуждением. При наличии

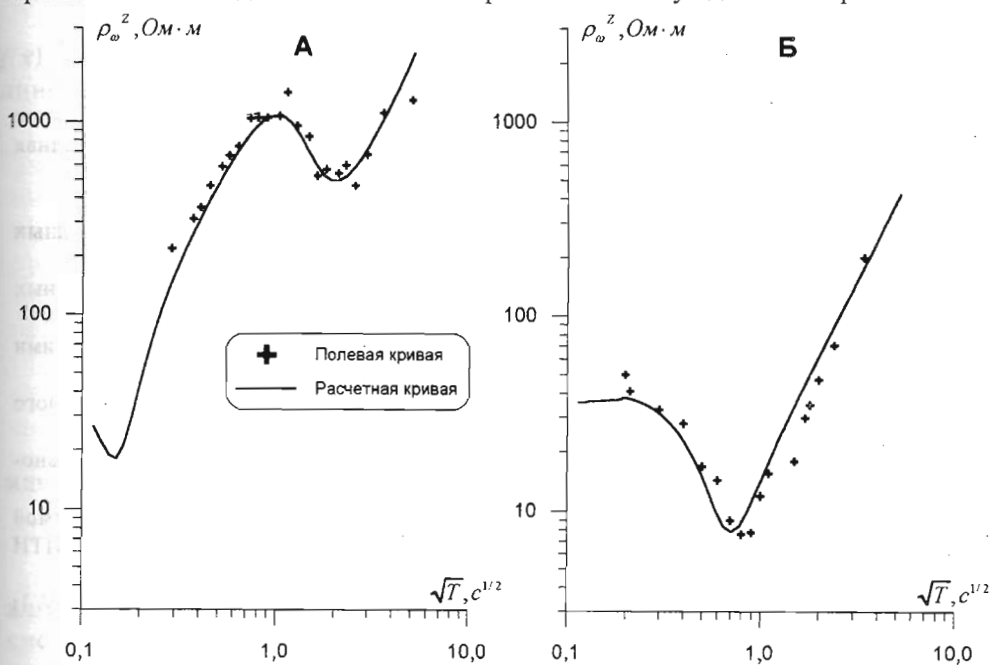


Рис. 4. Результаты импедансных измерений: А — источник АВ, разнос 18000 м. Б — источник Q, разнос 4635 м

в чехле платформы хотя бы одного экрана импедансные ЧЗ эффективнее проводить с индукционным возбуждением. В обоих случаях результат измерения в основном зависит от разреза в точке наблюдения, следовательно, к ней можно привязывать точку записи. Для выполнения полевых работ, обработки и интерпретации импедансных ЧЗ имеются аппаратура и программное обеспечение. На рис. 4 приведены примеры полевых и расчетных импедансных кривых для юго-западной части

Московской синеклизы. Анализ и интерпретацию данных импедансного ЧЗ в рамках горизонтально-неоднородных моделей можно проводить по технологиям, разработанным в методе МТЗ.

При региональных исследованиях возможно выполнять частотные зондирования по отдельным компонентам поля. При наличии неоднородного верхнего слоя надежнее использовать встречные или двусторонние установки с последующим осреднением результатов. Для изучения больших глубин компонента H_y предпочтительнее компоненты H_z . Совместная интерпретация кривых для горизонтальной электрической и одной из магнитных компонент позволяет полнее изучать разрез (в частности, получать значения коэффициентов макроанизотропии слоев).

Метод ЧЗ целесообразно применять в комплексе с другими методами. В частности, авторы использовали ЧЗ вместе с методами ЗСБ и МТЗ, что позволило получить непрерывный разрез от нескольких десятков метров до нескольких километров. Область применения ЧЗ не ограничивается структурными задачами. Перспективно направление, связанное с импедансными малоуглубинными исследованиями. Например, за рубежом для инженерно-геологических изысканий успешно применяется аналогичная методика — CSAMT (аудио-МТЗ с контролируемым источником) [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М. Н., Кузнецов А. Н., Завадская Т. Н. Дипольное электромагнитное зондирование горизонтально-неоднородных сред // Прикладная геофизика. 1972. В. 68.
2. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997.
3. Зингер Б. Ш., Файнберг Э. Б. Электромагнитная индукция в неоднородных тонких слоях. М.: ИЗМИРАН, 1985.
4. Иванов А. П., Скугаревская О. А. Методика частотных электромагнитных зондирований. М.: Наука, 1978.
5. Изучение геологического строения Восточно-Европейской платформы геофизическими методами / Под ред. Н. В. Неволина и др. М.: Недра, 1971.
6. Кузнецов А. Н., Обухов Г. Г. Свойства горизонтальной компоненты магнитного поля при частотных зондированиях // Прикладная геофизика. 1970. В. 60.
7. Обухов Г. Г. Определение точки записи в методах ЧЗ и ЗС в горизонтально-неоднородной среде // Прикладная геофизика. 1970. В. 61.
8. Пушкарев П. Ю., Яковлев А. Г., Яковлев А. Д. Программа решения прямой и обратной одномерной задачи метода частотных зондирования // Деп. в ВИНТИ 22.01.99, №199-599.
9. Investigations in Geophysics. No. 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. V. 1: Theory, edited by M.N. Nabighian. 1988.

Московский государственный университет
П. Ю. Пушкарев, А. Д. Яковлев — аспиранты