

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ПЛАТО ГИЗА (ЕГИПЕТ)

Барсуков П.О., Файнберг Э.Б.

Центр Геоэлектромагнитных Исследований Института Физики Земли РАН, Москва

На основе результатов импульсных электромагнитных зондирований территории Сфинкс - Пирамида Хефрена (Гиза, Египет) построена 3D модель электрических сопротивлений горных пород до глубины 150 м. Описана технология зондирований, обработки данных и дизайна модели среды как результата 3D блоковой инверсии. На основе геологической интерпретации модели впервые определена граница палеогеновых известняков, слагающих плато пирамид, и подстилающей складчатой меловой структуры.

Ключевые слова: электромагнитные зондирования, TEM-FAST технология, 3D инверсия, геоэлектрический разрез, плато Гиза, Пирамиды, Сфинкс

В 1994 г. в рамках совместного проекта НРИАГ (Египет) и ИФЗ РАН (Россия) [1] были проведены исследования территории Сфинкс – п. Хефрена импульсным электромагнитным методом. Расположение пирамид, Сфинкса и рельеф местности показаны на рис. 1. Целью исследований была оценка конфигурации водоносных горизонтов и резервуаров грунтовых вод и комбинирование полученных данных с результатами ранее проведённых НРИАГ вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) в окрестностях Сфинкса. Для возбуждения и измерения полей использовались квадратные совмещённые антенны размером 50×50 м и технология TEM-FAST [2] зондирований. Отклики среды на импульсное возбуждение поля измерялись в диапазоне 4-1000 мс, что обеспечивало исследование электрического сопротивления пород в интервале глубин 5-150 м.

Одним из факторов, осложняющих измерения TEM-откликов, является наличие электрических линий и металлических объектов на исследуемой территории способных существенно исказить данные измерений и создавать интенсивные помехи. Поэтому для контроля результатов измерений были выполнены дополнительные зондирования вдали от пирамид в незагрязнённой помехами западной части плато в пределах залегания формации Моккатам. В настоящей работе данные этих зондирований используются для изучения геоэлектрического строения и геологии разреза формации Моккатам.

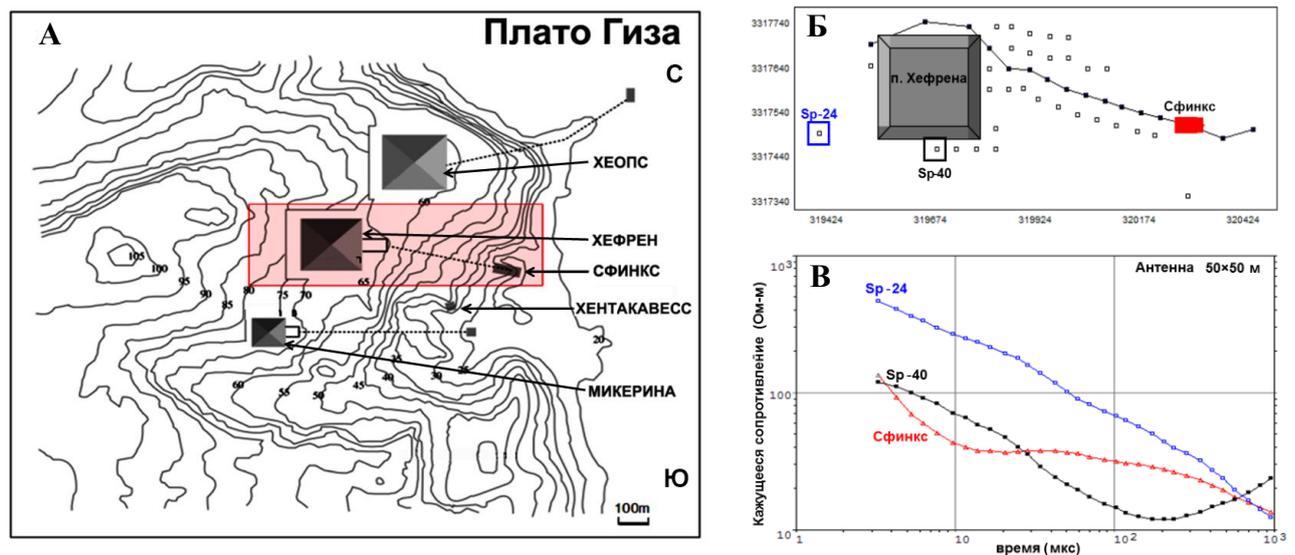


Рис. 1. Территория исследований. А - изолинии - рельеф земной поверхности (в метрах), точечные линии - подземные входы в пирамиды. Б - пункты зондирований показанные на рис. 1В и профиль зондирования (ломаная линия) вдоль которого строился разрез. В - переходные отклики в виде кажущегося сопротивления.

Технология TEM-FAST зондирований

Рассмотрим особенности технологии TEM-FAST зондирований. После того, как импульсный отклик измерен, его трансформируют в зависимость кажущегося сопротивления от времени $\rho_a(t)$, используя известную асимптотическую формулу становления поля для поздних времён. Примеры таких откликов приведены на рис. 1. Однако для построения 3D моделей среды такой нормировки недостаточно. В технологии TEM-FAST применяется трансформация откликов в зависимости кажущегося сопротивления от глубины исследования $\rho(h)$. Алгоритм трансформации содержит три последовательных этапа: 1) аппроксимация измеренных откликов функцией $E(t)$, представляющей собой сумму затухающих во времени экспоненциальных членов [8]; 2) вычисление сопротивления однородного полупространства $\rho(t)$, отклик от которого совпадает с $E(t)$ на всех временах t ; 3) вычисление параметрически заданной функции $\rho(h)$ для каждого параметра t . Пример трансформаций $\rho(t)$ и $\rho(h)$ иллюстрируют рис. 2А и Б, соответственно.

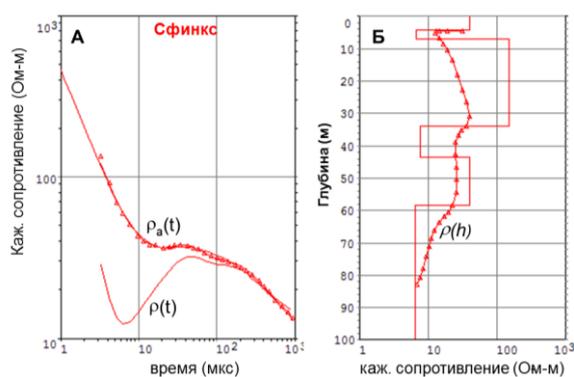


Рис. 2. А - импульсные отклики в виде кажущегося сопротивления $\rho_a(t)$ и $\rho(t)$; Б - $\rho(h)$ - зависимость кажущегося сопротивления от глубины исследования h . Кусочно-однородная кривая - результат 1D инверсии отклика, полученного при зондировании площадки под Сфинксом.

Трансформации сглаживают кусочно-однородное распределение сопротивлений среды, несколько искажая значения ρ и глубины h . Тем не менее, основные особенности структуры среды сохраняются. Кроме того, важно, что при таком подходе для дизайна устойчивой трансформации не требуется никакой априорной информации об изучаемой среде; локальные 1D трансформации $\rho(h)$, «сшитые» в 2D или 3D структуры, создают электромагнитный образ среды, который в 2D варианте называется псевдо-разрезом сопротивлений.

Следующим шагом построения 3D модели среды является проецирование трансформаций на вертикальную сетку модели, т.е. замена непрерывной функции $\rho(h)$ (рис. 2Б) её ступенчатой, кусочно-однородной аппроксимацией. Количество слоёв с разными сопротивлениями может достигать нескольких десятков в зависимости от необходимой детальности исследований. Сетка анализируемой здесь 3D модели состояла из одинаковых ячеек размером $\Delta x = \Delta y = 25$ м, $\Delta z = 2$ м. На рис. 3 А показано сечение 3D модели, «сшитой» из локальных 1D моделей. Положение профиля показано на рис. 1Б, а экспериментальные данные и рассчитанные вдоль профиля 3D отклики показаны на верхних панелях рис. 3. Видно, что невязка (средний квадрат отклонений - rms) между наблюдаемыми и модельными данными недопустима высока.

На следующем шаге производится 1D инверсия откликов в рамках многослойных локальных моделей в каждой точке измерения. В качестве стартовых моделей используются ранее построенные на основе трансформаций $\rho(h)$ ступенчатые структуры. В процессе 1D инверсии подбираются сопротивления слоистых структур, при которых минимизируется невязка между наблюдаемыми и расчётными откликами в каждой точке измерения. Дополнительным ограничением на значения сопротивлений слоёв служит дискретная шкала сопротивлений, содержащая ограниченное количество градаций (в данном случае 10). Результат 1D инверсии вдоль профиля показан на рис. 3Б. На верхней панели показаны экспериментальные и рассчитанные 3D отклики. Видно, что невязка уменьшилась, однако по-прежнему оставляет желать лучшего.

На заключительном этапе производится 3D инверсия данных в рамках построенной блоковой структуры, т.е. минимизируется невязка между наблюдаемыми и модельными откликами, при этом подбираются сопротивлениям блоков без изменения их границ. В данном случае инверсия осуществлялась относительно 10 сопротивлений в рамках шкалы 1-1000 Ом-м. Результат показан на рис. 3В. Невязка между наблюдаемыми и модельными откликами оказалась в пределах 12% для

$t=250 \mu\text{s}$. Общая невязка по всему временному диапазону rms $\sim 8\%$, что в целом соответствует погрешности данной съёмки.

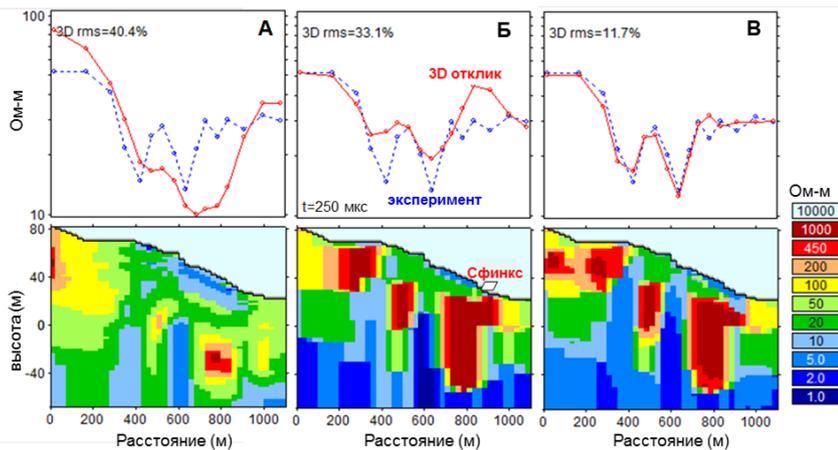


Рис. 3. Разрезы сопротивлений 3D модели по профилю, показанному на рис. 1Б.

А - структура, созданная на основе трансформаций $\rho(h)$;

Б - структура, созданная на основе локальных 1D инверсий;

В - результат 3D инверсии

Анализируя результаты инверсии на разных этапах можно заметить, что главные особенности модели проявляются уже на начальном этапе трансформаций (рис. 3А) - это три блока с высокими сопротивлениями, разбитые субвертикальными низкоомными швами. Разрезы, представленные на панелях Б и В, принципиально не отличаются, однако их 3D отклики более контрастны и лучше согласуются с наблюдаемыми данными.

Анализ геоэлектрической модели.

Созданная геоэлектрическая 3D модель показывает следующее. Сопротивление поверхностного слоя (первые 5 м) меняется в пределах от 10 до 500 Ом-м, достигая минимума восточнее Сфинкса. Этот результат полностью согласуется с данными ВЭЗ, полученными в окрестности (± 100 м) монумента. Здесь также при разносе $AB/2 < 5$ м сопротивление не превышает 20 Ом-м. Глубже идёт возрастание сопротивления пород до глубины ~ 10 м от поверхности, что также подтверждается ВЭЗ [5]. На горизонте 0 м (отсчитывается от уровня моря) центр и южное крыло территории имеет сопротивление более 200 Ом-м, в то время как северное крыло имеет сопротивление $\sim 10-20$ Ом-м. В центральной части прослеживается низкоомный шов мощностью 30-50 м ЮВ-СЗ направления. На горизонте -50 м общее сопротивление пород падает до 5-10 Ом-м, за исключением двух областей. На глубоком горизонте -100 м виден единственный блок у южной грани п. Хефрен сопротивлением более 200 Ом-м, на фоне практически однородной среды с сопротивлением менее 10 Ом-м. На вертикальном разрезе модели (рис. 3В) видны три блока пород с сопротивлением более 200 Ом-м, разделённые субвертикальными швами сопротивлением менее 10 Ом-м. Все блоки подстилаются толщей пород сопротивлением менее 10 Ом-м. Восточный, самый мощный блок, на котором расположен Сфинкс, прослеживается до горизонта - 50 м.

Геологическая интерпретация.

Как известно, плато пирамид Гиза сложено Средне-Эоценовыми известняками формации Моккатам; породы этого горизонта в регионе нигде, кроме плато, не встречаются [7]. Известняки моноклиинально падают в ЮВ направлении под углом $5-7^\circ$. Толща Моккатам несогласно залегает на меловых карбонатах, которые интенсивно смяты в результате поздне меловой тектонической активности. В работе [6] приведён фрагмент геологической карты, на которой видна сложная складчатая структура Абу-Раваш (9 км СЗ от плато Пирамид), сложенная Меловыми породами, в пределах которой формация Моккатам отсутствует. Меловые отложения перекрыты более молодыми породами Верхне-Эоценовой Маади формацией. Мощность формации Моккатам не определена. В СЗ направлении подошва Моккатам обнажается на горизонте +100 м в 2.5 км от плато Пирамид. Если предположить, что подошва толщи плоская, можно оценить максимальную мощность Моккатам в основании Сфинкса (горизонт +25 м) - $H_{\text{max}} \sim 190 - 280$ м при углах падения $5-7^\circ$ ЮВ, соответственно. Сопротивление пород в созданной 3D модели изменяется почти на 3 порядка, что явно противоречит предположению о том, что мы имеем дело только с латерально однородной толщей известняков. Столь резкая вертикальная неоднородность сопротивлений в модели объясняется сложным рельефом кровли подстилающей толщи Меловых отложений. Так, например, в структуре Абу-Раваш пачки

пород изменяют угол и вектор падения с 15° ЮВ на 15° СЗ на расстоянии ~ 2 км, образуя “мини депрессию” глубиной ~ 250 м. Эта же складчатая структура подстилает и плато Пирамид [3,4].

Таким образом, высокоомные блоки модели сложены плотными известняками формации Моккатам и разбиты обводнённой разломной зоной ЮЗ - направления. Максимальная мощность плотных известняков под южной гранью п. Хефрен (горизонт +65 м) – не менее 160 м, а вблизи Сфинкса (горизонт +25 м) ~ 80 м. Низкоомные подстилающие толщи представляют собой смятые в складки трещиноватые меловые карбонаты, насыщенные минерализованными водами. В Западной части плато (0.5-1 км западнее п. Хефрен), где были сделаны «калибровочные» зондирования, импульсные отклики аналогичны sp24 (рис. 2), т.е. сопротивление поверхностного слоя (~ 25 м) $\rho > 500$ Ом-м. Глубже наблюдается 100-кратное падение сопротивления до 5 Ом-м на глубине 45 м и до 1 Ом-м на глубине 70 м. Верхний слой соответствует плотным, слабопроницаемым известнякам, а подстилающая толща представлена насыщенными минерализованной водой трещиноватыми породами. Таким образом, граница высокоомных и низкоомных образований в созданной модели вероятней всего соответствует границе меловых и палеогеновых отложений. Схематический геологический разрез плато Пирамид по линии Сфинкс-Хефрен показан на рис. 4.

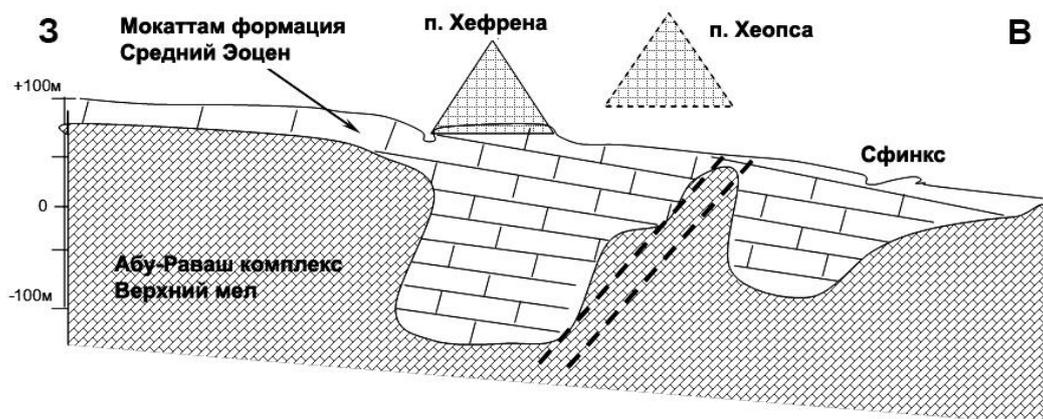


Рис. 4. Схематический геологический разрез плато Пирамид. Пунктир - разломная зона. Вертикальный масштаб – высотные отметки в метрах от среднего уровня моря.

Отметим, что соответствие данных «калибровочных» измерений и откликов, полученных на основной территории исследований, свидетельствует об отсутствии существенных погрешностей съёмки, обусловленных обилием рукотворных объектов на плато пирамид. Поверхностный (~ 5 м) слой Моккатам известняков характеризуется весьма неоднородным электрическим сопротивлением, что подтверждается ВЭЗами [5] В работах [3,4] отмечается, что нижняя пачка формации Моккатам (основание Сфинкса) представлена глинистыми известняками с вкраплением галита, а верхняя пачка (п. Хефрен) – массивными рифовыми известняками (биогермы). По-видимому, этим можно объяснить вариации сопротивления в приповерхностном слое плато пирамид Гиза.

1. Barsukov P.O., Hassaneen A.Gh., Svetov B.S., Osman S.Sh. Geoelectrical Study in the Vicinity of Giza Pyramids, Egypt //13-th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 1996. Japan
2. Barsukov P.O., Fainberg E.B., Khabensky E.O. 2015. Shallow investigations by TEM-FAST technique: methodology and examples. Electromagnetic sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice, Elsevier, Ed. Spichak V.V., Chapter 3, C. 47-78
3. Gauri K.L. Geologic Study of the Sphinx. ARCE Newsletter, No. 127, 1984. C. 24-43
4. Guirand R., Bosworth W. Phanerozoic geodynamic evolution of northeastern Africa and the northwest Arabian Platform //Tectonophysics 315 (1-4),1999. C. 73-108
5. NRIAG (National Research Institute of Astronomy and Geophysics). Report of the first six months of underground water monitoring at Sphinx area to Egyptian Authority of Monuments, 1993, Egypt
6. Raynaud S., Boisse H., Makroum F.M., Bertho J. Geological and Geomorphological study of the original hill at the base of Fourth Dynasty Egyptian monuments // Bulletin de la Societe Geologique de France, V. 181, no. 3, 2010. C. 279-290
7. Said R. The Geology of Egypt. Elsevier Publishing Co., Amsterdam-New York, 1962. 377 C.
8. Svetov B. S., Barsukov P. O. Transformation of the quasi-stationary transient processes in the geoelectrically equivalent waves // Physics of the Earth, V.8, 1984. C. 29-37