

УДК 53.082.74

ГЛУБИННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОЩНОГО НИЗКООМНОГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ*

В.А. Любчич, В.Ф. Григорьев, Р.Ю. Юрик
Полярный геофизический институт КНЦ РАН

Аннотация

Показано, что применение мощного генератора для электромагнитных зондирований с использованием промышленных линий электропередач в качестве антенны обеспечивает значительную глубинность исследований даже в неблагоприятных геоэлектрических условиях низкоомного, мощного осадочного чехла. В статье кратко приведены технические характеристики применявшейся аппаратуры для измерения и генерации гармонического электромагнитного поля. На примере зондирования в северной части Западно-Сибирской платформы показана целесообразность комплексной интерпретации данных электромагнитного зондирования с использованием ЛЭП и магнитотеллурического зондирования.

Ключевые слова:

генератор электромагнитного поля, линия электропередач, электромагнитное зондирование, осадочный чехол.



Введение

Для определения и изучения геологического строения земной коры на большую глубину в неблагоприятных геоэлектрических условиях низкоомного, мощного осадочного чехла Западно-Сибирской геологической платформы необходимо проводить электромагнитные зондирования с применением мощного

генератора электромагнитного поля экстремально низкочастотного (ЭНЧ) диапазона. При этом в качестве антенны удобно использовать промышленные линии электропередач (ЛЭП). Качественные условия заземления ЛЭП позволяют получать мощные зондирующие сигналы в выбранном частотном диапазоне, при этом сила тока в антенне (ЛЭП) может достигать сотни ампер.

Эксперименты по электромагнитному зондированию Земли с использованием ЛЭП описаны в работах [1, 2]. Эти исследования проводились как в условиях кристаллического фундамента Балтийского щита на Кольском п-ове и Карелии с незначительным осадочным покровом [1], так и в условиях мощного осадочного чехла Западной Сибири [2]. В работе [2] приводятся результаты электромагнитного зондирования с применением портативного генератора «Энергия-3» мощностью 2 кВт, что позволяло уверенно измерять сигналы в пунктах наблюдения в частотном диапазоне от 3.8 до 175 Гц.

В данной статье рассмотрен вопрос о возможности определения геологического строения низкоомного, мощного осадочного чехла северной части Западно-Сибирской платформы по результатам глубинного электромагнитного зондирования с применением генератора

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-05-12005 ОФИ_М).

мощностью порядка 200 кВт. Это дает возможность надежно регистрировать более низкочастотные сигналы с 0.01 Гц, что существенно увеличивает глубинность электромагнитных исследований с контролируемым источником.

Генерация искусственных сигналов с сеткой частот в диапазоне от 0.01 до 1 Гц требует значительных временных затрат. Поэтому в данном диапазоне целесообразно привлекать результаты магнитотеллурического зондирования (МТЗ) для корректной интерпретации экспериментальных данных.

Представлены экспериментальные работы по электромагнитному и магнитотеллурическому зондированиям, проведенные сотрудниками Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН (ПГИ КНЦ РАН) летом 2012 г. в районе г. Новый Уренгой Ямало-Ненецкого автономного округа.

Аппаратура и описание эксперимента

В июне 2012 г. сотрудниками ПГИ КНЦ РАН проведен эксперимент по глубинному электромагнитному зондированию осадочного чехла в одном из районов Ямало-Ненецкого автономного округа.

Мобильный генератор электромагнитного поля подключался к промышленной линии электропередачи Пангоды – Новый Уренгой на подстанции в городе Новый Уренгой.

Формирование радиочастотного сигнала, подлежащего излучению в диапазоне от 0.01 до 40 Гц, производилось мобильным генератором мощностью порядка 200 кВт, разработанным в институте на базе повышающего преобразователя и системы энергопередачи генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований [3]. Преобразование электромагнитных колебаний в распространяющуюся в пространстве электромагнитную волну осуществлялось антенной в виде ЛЭП длиной 110 км, представляющей собою горизонтальный заземленный диполь, имеющий субширотную ориентацию. Необходимая величина тока в антенне на частотах выше единиц герц обеспечивалась согласующим устройством [4]. На рис. 1 приведена структурная схема источника электромагнитного излучения.

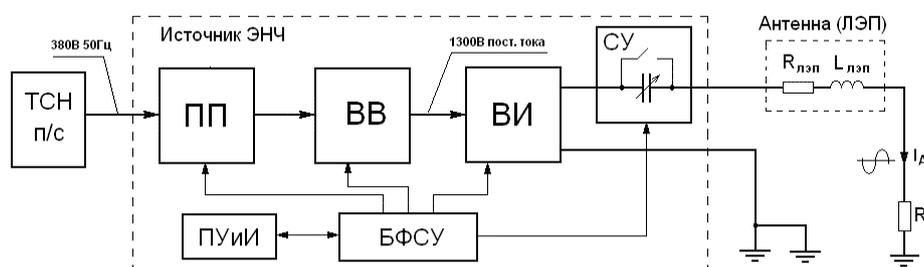


Рис. 1. Блок-схема генератора электромагнитного поля ЭНЧ-диапазона. Условные обозначения: ТСН п/с – трансформатор собственных нужд подстанции; ПП – повышающий преобразователь; ВВ – высоковольтный выпрямитель; ВИ – высоковольтный инвертор; СУ – согласующее устройство; БФСУ – блок формирования сигналов управления; ПУИИ – пульт управления и индикации

Передающее устройство устанавливается на территории электрической подстанции ЛЭП и питается от трансформатора собственных нужд подстанции (ТСН п/с). Сетевое напряжение промышленной трехфазной сети напряжением 380 В и частотой 50 Гц подается на повышающий преобразователь (ПП). Схема ПП реализована на основе повышающего трехфазного силового трансформатора, что обеспечивает гальваническую развязку от промышленной сети. На выходе ПП напряжение достигает 920 В. Далее это переменное напряжение поступает на высоковольтный выпрямитель (ВВ), на выходе которого формируется постоянное напряжение

величиной 1300 В. Оно поступает на высоковольтный инвертор (ВИ), который методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) создает в антенне (ЛЭП) синусоидальный ток необходимой амплитуды и частоты. Принцип формирования синусоидального тока иллюстрирует рис. 2. Максимальная амплитуда выходного сигнала ВИ составляет 1300 В. Высоковольтный инвертор – основной блок источника электромагнитного излучения, поскольку именно он определяет форму, амплитуду и частоту тока в антенне и, соответственно, выходные энергетические параметры в целом. На частотах выше 10 Гц для компенсации индуктивной составляющей полного сопротивления ЛЭП на выход генератора подключается согласующее устройство (СУ). Величина емкости СУ при переходе на другую частоту генерации должна изменяться так, чтобы всегда сохранялся резонанс напряжений в индуктивной нагрузке. При работе на частотах, когда подключается СУ, высоковольтный инвертор формирует на выходе меандр, а синусоидальность тока в антенне обеспечивается резонансом напряжений.

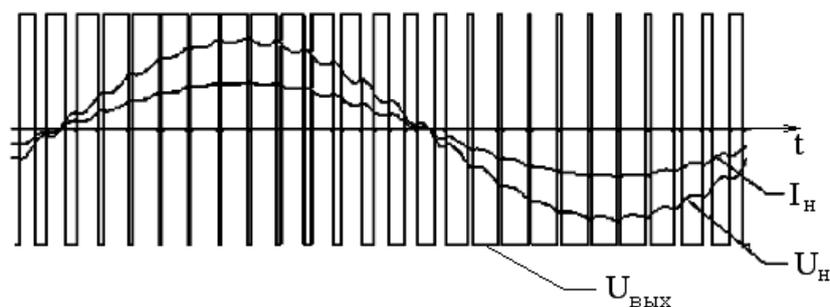


Рис. 2. Формы выходных сигналов высоковольтного инвертора при работе на активную нагрузку: I_n – ток в нагрузке, U_n – напряжение на нагрузке, $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе высоковольтного инвертора

Блок формирования сигналов управления (БФСУ) обеспечивает создание необходимых управляющих сигналов для всех блоков источника, анализ информации, поступающей с различных датчиков и цепей контроля, а также управление различными устройствами автоматики и защиты. Выносной пульт управления и индикации (ПУиИ) предназначен для управления режимами работы источника, задания выходных параметров сигнала и визуального контроля этих параметров оператором.

Электромагнитное зондирование проводилось на частотах: 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 3, 9.5, 12, 20, 33 и 42 Гц. При этом действующий ток в антенне (ЛЭП) был порядка 100–150 А.

Регистрация и сбор данных электромагнитного поля производились трехкомпонентным индукционным магнитометром, разработанным в ПГИ КНЦ РАН. Измерения выполнялись вдоль автодороги Новый Уренгой – Ямбург.

Для достижения максимальной точности измерений магнитного поля до и после проведения эксперимента датчики магнитометра калибровались в одинаковых внешних условиях. Эти датчики для обеспечения ортогональности и точности установки их относительно горизонта, а также для устранения взаимного воздействия магнитного поля размещались в специальных обоймах (рис. 3). Обойма с датчиками помещалась в выкопанную яму, накрывалась коробом и засыпалась землей.

При измерении электрических компонент поля раскладывались две взаимно ортогональные заземленные приемные линии длиной по 100 м. За ось X принято направление на север вдоль магнитного меридиана.

В пунктах наблюдения определялось магнитное склонение, необходимое для представления результатов измерений компонент электромагнитного поля в универсальных географических координатах.

Ток в антенне, аналоговые сигналы с магнитных датчиков и приемных электрических линий обрабатывались цифровой системой регистрации и сбора информации, основанной на 6-канальном 22-битном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) с частотой дискретизации 512 Гц [5]. Система регистрации и сбора информации производит привязку измеренных сигналов к мировому времени UT по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS с погрешностью не более 1 мкс. Оцифрованные данные сохраняются в памяти прибора.



Рис. 3. Размещение магнитных датчиков в обойме

Для анализа зарегистрированных временных рядов геофизических данных используется метод Уэлча, основанный на дискретных преобразованиях Фурье измеренных сигналов. В результате обработки временных рядов по методу Уэлча получают оценки спектральной плотности мощности сигнала с учетом влияния шума, по которым после калибровочных преобразований вычисляются значения амплитуд сигналов.

Широкая полоса пропускания (от 0.01 до 200 Гц) индукционных датчиков магнитометра позволяет использовать приемную аппаратуру не только для регистрации активных сигналов при проведении электромагнитных зондирований с контролируемым источником, но и для измерения уровней естественных шумов при выполнении магнитотеллурических зондирований (МТЗ).

Геоэлектрический разрез в данном районе имеет характерную трехслойную структуру. Верхняя часть разреза представлена вечномерзлыми породами с высоким удельным сопротивлением порядка 100 Ом·м. Мощность мерзлого слоя может меняться от 30–40 до 150–200 м [6]. Средняя часть разреза состоит из низкоомных осадочных пород мощностью свыше 6 тыс. м с удельным сопротивлением от 2 до 20 Ом·м. В нижней части разреза находятся вулканогенные метаморфические породы складчатого фундамента, представленные измененными базальтами, с высоким удельным сопротивлением порядка 100 Ом·м.

Строение осадочного чехла не однородно [7], в его пределах отмечаются мощные зоны с пониженным сопротивлением. Так, по данным электрического каротажа Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6 (рис. 4), в интервале глубин от 400 до 1400 м сопротивление пород понижается до 2–5 Ом·м, в геологическом разрезе эта зона соответствует слабопроницаемым глинам палеогеново-верхнемелового возраста. Далее, в интервале глубин от

1400 до 2700 м, отмечается область с повышенным сопротивлением порядка 20 Ом·м, которая относится к зоне поровых коллекторов нижнемелового периода, перспективных на обнаружение углеводородного сырья. Еще ниже, в интервале глубин от 2700 до 4300 м, сопротивление пород вновь понижается до 10 Ом·м, что соответствует осадочным породам верхнеюрского периода с более низкой пористостью. Таким образом, можно отметить корреляцию электрического сопротивления пород с их коллекторскими свойствами, вследствие чего становится возможным выявление методами глубинной электроразведки слоев, перспективных на обнаружение углеводородного сырья.

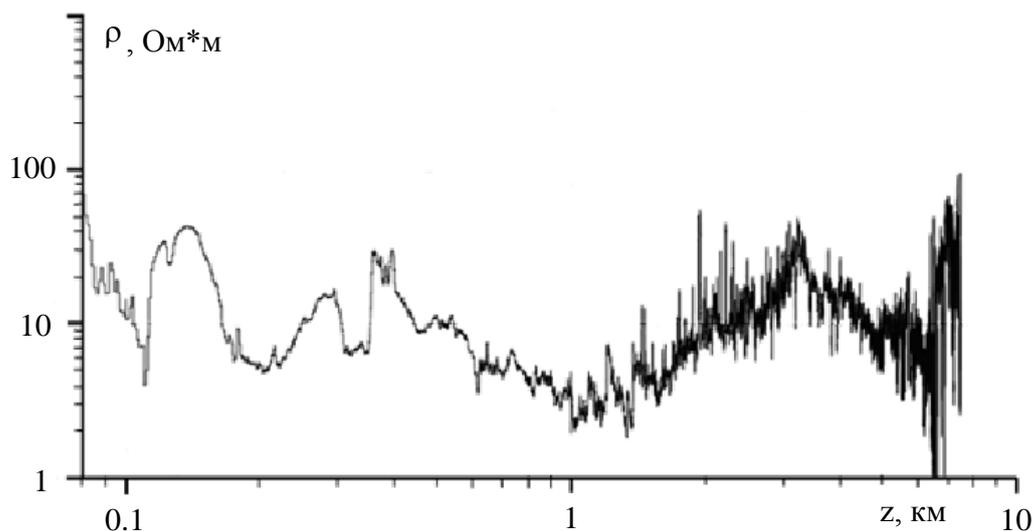


Рис. 4. Данные электрического каротажа сопротивления с применением установки «потенциал – зонд» (ПЗ) Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6

Результаты и их обсуждение

Согласно данным бурения и результатам сейсмического профилирования методом отраженных волн с общей глубинной точкой (МОВ ОГТ) [8], отличительной особенностью строения осадочной толщи северной части Западно-Сибирской платформы является латеральная выдержанность составляющих чехол пород. Поэтому для интерпретации данных электромагнитного зондирования удобно использовать горизонтально-слоистую модель Земли. В таблице представлены параметры такой модели, выбранные по данным электрического каротажа Тюменской сверхглубокой скважины СГ-6.

Для сравнения представлены экспериментальные кривые зависимости амплитуд компонент электромагнитного поля от частоты генерируемого излучения, измеренные в одном из пунктов наблюдения (рис. 5), и теоретические кривые для этой точки, рассчитанные для горизонтально-слоистой модели среды, параметры которой показаны в таблице. Пункт наблюдений располагался в 21 км к северу от одного из питающих электродов линии, заземленного на подстанции г. Новый Уренгой.

Из графиков видно, что для горизонтальных компонент электромагнитного поля модельные значения в целом соответствуют измеренным величинам. Больше соответствие наблюдается для электрических компонент поля только на относительно высоких частотах, начиная с 20 Гц модельные значения несколько превышают измеренные величины. Для согласования этих значений потребовалась некоторая корректировка исходной модели. Так, была уменьшена мощность мерзлого слоя до 40 м и понижено удельное сопротивление верхней части осадочного чехла до 10 Ом·м в интервале глубин 40–400 м. Графики частотной

зависимости компонент электромагнитного поля для скорректированной модели среды также представлены на рис. 5.

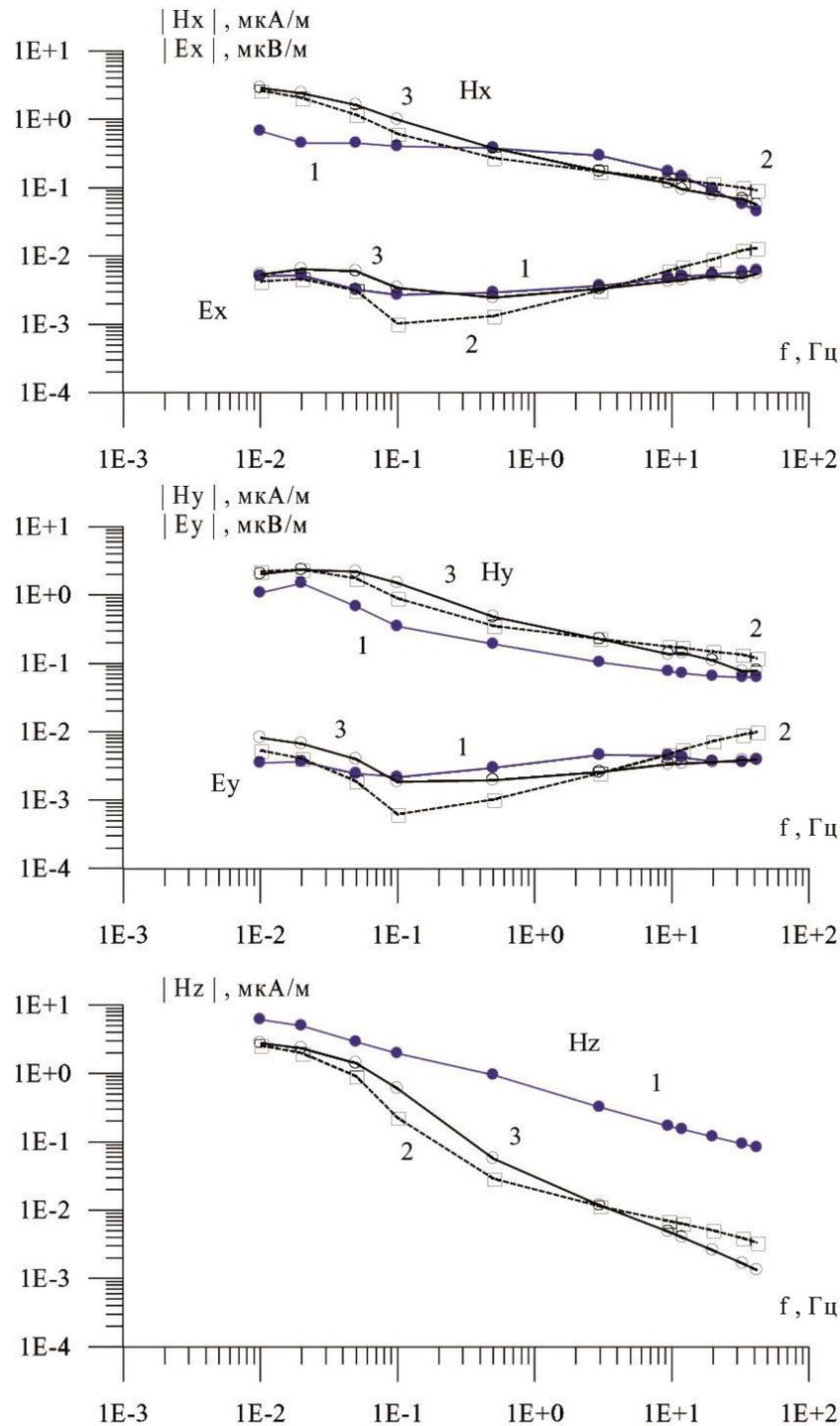


Рис. 5. Кривые частотной зависимости амплитуд компонент электромагнитного поля: 1 – экспериментально измеренные значения, 2 – теоретически рассчитанные значения для горизонтально-слоистой модели среды, представленной в таблице, 3 – значения для скорректированной модели

Другая особенность представленных графиков состоит в значительном превышении измеренных значений вертикальной компоненты магнитного поля H_z над модельными величинами в широком диапазоне частот выше 0.1 Гц. Этот факт можно объяснить влиянием линейных техногенных проводников на поверхности Земли, а именно ветки трубопровода, проходящей вблизи точки наблюдения. Наведенные токи в таких проводниках могут существенно завышать амплитуду вертикальной компоненты магнитного поля.

Параметры горизонтально-слоистой модели осадочного чехла северной части Западно-Сибирской платформы

№	Описание слоя	Интервал глубин, м	Удельное сопротивление, Ом·м
1	Вечномерзлые породы	0–100	100
2	Осадочные породы палеогена	100–400	20
3	Осадочные породы палеогена и верхнего мела, соответствующие слабопроницаемым глинам	400–1400	5
4	Осадочные породы нижнего мела, относящиеся к зоне поровых коллекторов	1400–2700	20
5	Осадочные породы верхнеюрского периода с более низкой пористостью	2700–4300	10
6	Осадочные породы нижнеюрского и верхнетриасового периодов	4300–6500	20
7	Складчатый фундамент	> 6500	100

Для оценки геоэлектрического разреза в районе расположения выбранной точки наблюдения были построены кривые кажущегося сопротивления ρ_k (рис. 6). Измерения в указанной точке производились в течение нескольких дней. Значения кажущегося сопротивления для электромагнитных зондирований с контролируемым источником рассчитывались по кривым нормального поля. Для заданной геометрии эксперимента – взаимном расположении питающей длинной линии и точки наблюдения электромагнитного поля – были построены графики зависимости отношения полных горизонтальных компонент электрического поля к магнитному E_r/H_r от сопротивления нижнего однородного полупространства для каждой частоты генерации поля. Используя экспериментально измеренные амплитуды компонент электромагнитного поля, по этим графикам и оценивались значения кажущегося сопротивления среды ρ_k .

Из рис. 6 видно, что кривые 1 и 2 кажущегося сопротивления для глубинных электромагнитных зондирований с контролируемым источником, проведенных в разные дни, хорошо согласуются между собой и имеют характерную параболическую форму. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на результаты измерений оказывают влияние высокоомный фундамент на низких частотах, проводящий осадочный чехол на относительно средних частотах и плохо проводящий мерзлый слой на относительно высоких частотах. Однако этим кривым не хватает детальности для дифференциации слабоконтрастного осадочного чехла из-за ограниченности набора частот генерации поля.

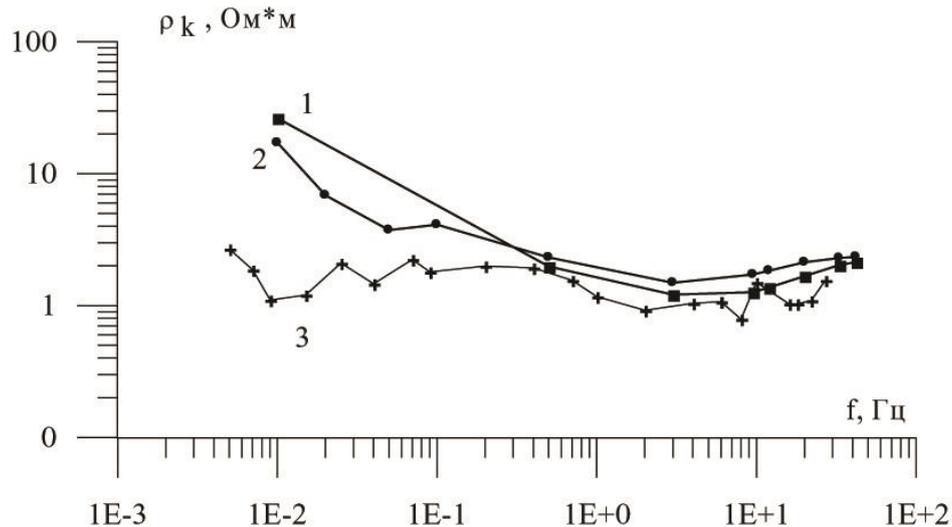


Рис. 6. Кривые кажущегося сопротивления ρ_k , рассчитанные по результатам измерений компонент электромагнитного поля в пункте наблюдения:
 1 – график значений ρ_k , вычисленных по кривым нормального поля для данных ЭМЗ с контролируемым источником 9 июня 2012 г., 2 – график ρ_k для данных ЭМЗ с контролируемым источником 13 июня 2012 г., 3 – кривая МТЗ $\rho_{k(xy)}$, полученная по записи компонент электромагнитного поля 9 июня 2012 г.

Дополнительную информацию о геоэлектрическом разрезе могут дать кривые кажущегося сопротивления, полученные методом магнитотеллурического зондирования Земли. Значения кажущегося сопротивления ρ_k связаны с модулем нормального импеданса Z формулой [9]

$$\rho_e = \frac{|Z|^2}{\omega \mu_0}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ω – круговая частота электромагнитного поля.

Для однородной горизонтально-слоистой модели среды нормальный импеданс является скалярной величиной и представляет собой отношение горизонтальных взаимно перпендикулярных компонент электрического и магнитного полей, измеренных на земной поверхности:

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}.$$

Такая характеристика среды удобна, так как однозначно определяется параметрами модели – удельным сопротивлением и мощностью слоев – в виде рекуррентной формулы Липской:

$$Z = \frac{i\omega\mu_1}{k_1} \text{th} \cdot (k_1 h_1 + \text{arth} \cdot (\frac{k_1\mu_2}{k_2\mu_1} \text{th} \cdot (k_2 h_2 + \text{arth} \cdot (\frac{k_2\mu_3}{k_3\mu_2} \text{th} \cdot (k_3 h_3 + \dots + \text{arth} \frac{k_{N-1}\mu_N}{k_N\mu_{N-1}}) \dots))),$$

где k_i – волновое число.

$$k_i = \sqrt{\frac{-i\omega\mu_i}{\rho_i}},$$

где ρ_i – удельное сопротивление, μ_i – магнитная проницаемость, h_i – мощность слоя, i – мнимая единица.

Из-за неоднородностей земной коры импеданс представляет собой тензор, в котором основную информацию о геоэлектрических свойствах пород несут антидиагональные члены $Z_{xy} = E_x/H_y$ и $Z_{yx} = -E_y/H_x$. В двумерном случае эти члены отвечают двум поляризациям естественного электромагнитного поля, которые по-разному реагируют на неоднородности в земной коре.

Амплитуды импедансов Z_{xy} и Z_{yx} определялись в частотном диапазоне 0.005–27 Гц как корень из отношения средних значений спектральной плотности мощности шума взаимно ортогональных компонент электрического и магнитного полей. Здесь использовалась та же информация, записанная в памяти измерителя во время проведения электромагнитных зондирований с контролируемым источником, только частоты для оценки спектральной плотности мощности естественного шума выбирались не совпадающими с частотами генерации электромагнитного поля.

Значения кажущегося сопротивления рассчитывались через амплитуды импедансов Z_{xy} и Z_{yx} для двух поляризаций естественного поля согласно формуле (1). Используя графики кажущегося сопротивления ρ_k , полученные по результатам электромагнитного зондирования с контролируемым источником, в качестве реперных значений, была выбрана наиболее подходящая для интерпретации кривая кажущегося сопротивления по данным МТЗ $\rho_{k(xy)}$, (рис. 6, номер 3). Из рис. 6 видно, что средний уровень значений кажущегося сопротивления $\rho_{k(xy)}$ отражает низкоомную природу осадочных пород. Кроме того, в диапазоне частот 0.1–1 Гц наблюдается пологий максимум, свидетельствующий о неоднородном строении осадочного чехла. Расхождение кривых, полученных разными методами, в диапазоне частот ниже 0.1 Гц можно объяснить высоким уровнем случайных промышленных помех, связанных с деятельностью трубопровода в районе измерений электромагнитного поля. Несмотря на это расхождение, локальные особенности кривой $\rho_{k(xy)}$ несут важную качественную информацию о геологическом строении осадочного чехла.

С целью исследования геоэлектрического разреза в данной точке наблюдений преобразуем кривую зависимости кажущегося сопротивления по данным МТЗ ρ_k от периода T электромагнитного поля в график зависимости действующего сопротивления ρ' от действующей глубины z' с помощью дифференциальной трансформации Молочнова-Ле Вьета [10]:

$$z' = \sqrt{\frac{\rho_k}{\omega\mu_0}};$$

$$\rho'(z') = \rho_k \cdot (1 + m/2)^2 \text{ для нисходящей ветви кривой } \rho_k;$$

$$\rho'(z') = \rho_k \cdot (1 - m/2)^2 \text{ для восходящей ветви кривой } \rho_k,$$

где параметр m определяет тангенс угла наклона кривой кажущегося сопротивления в двойном логарифмическом масштабе:

$$m = \frac{d(\log(\rho_k))}{d(\log(\sqrt{T}))}.$$

Полученный геоэлектрический псевдоразрез представлен на рис. 7, из которого видно, что график зависимости действующего сопротивления от глубины хорошо согласуется с результатами каротажа по сверхглубокой скважине СГ-6, показанными на рис. 4. Так, на глубинах порядка 100 м действующее сопротивление достигает 300 Ом·м, это может объясняться влиянием высокоомного мерзлого слоя. Далее, до глубин порядка 7000 м, значения действующего сопротивления колеблются в диапазоне единиц – десятков (Ом·м), отражая высокую электропроводность осадочного чехла. При этом наблюдаются отдельные максимумы графика $\rho'(z')$ на глубинах порядка 450, 1800, 2600 м, что свидетельствует о неоднородном строении осадочного чехла. Максимумы на глубинах 1800 и 2600 м отвечают зоне поровых коллекторов нижнемелового периода с относительно повышенным удельным сопротивлением.

Максимум на глубине 450 м наблюдается также и на каротажной кривой. Наконец, на глубине порядка 7000 м происходит рост действующего сопротивления до 300 Ом·м, определяющийся влиянием высокоомного складчатого фундамента.

Полученные результаты показывают целесообразность комплексной обработки данных глубинного электромагнитного зондирования с применением мощного контролируемого источника излучения и магнитотеллурического зондирования для построения геоэлектрического разреза исследуемой области.

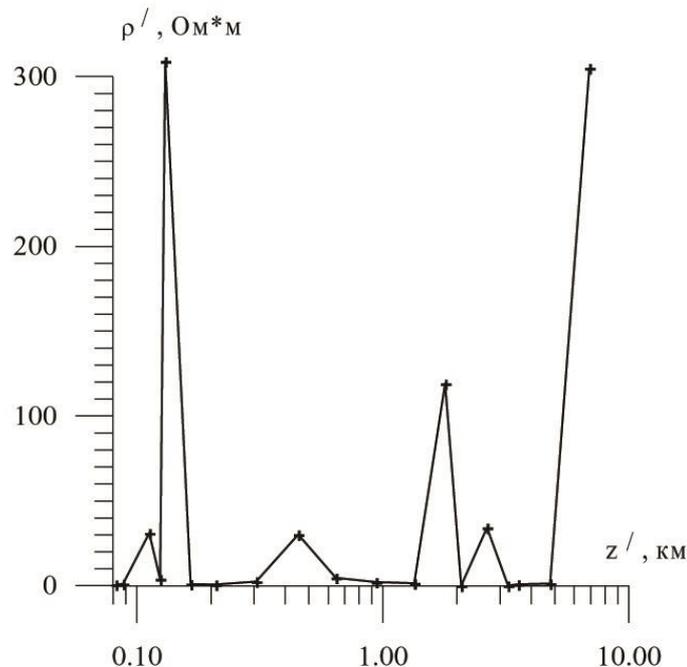


Рис. 7. График зависимости действующего сопротивления ρ' от действующей глубины z' , полученный с помощью дифференциальной трансформации Молочнова-Ле Вьета кривой кажущегося сопротивления МТЗ

Выводы

Проведенные экспериментальные работы показали принципиальную возможность определения геологического строения земной коры на большую глубину в неблагоприятных геоэлектрических условиях низкоомного, мощного осадочного чехла Западно-Сибирской геологической платформы по результатам электромагнитного зондирования с мощным контролируемым источником излучения ЭНЧ-диапазона.

Установлено, что при зондированиях на очень низких частотах (порядка 0.01–0.1 Гц) на результаты измерений компонент электромагнитного поля начинал оказывать влияние складчатый фундамент. Возможность откартирования складчатого фундамента при проведении площадных съемок позволяет выявить крупные геологические структуры – грабены и горсты, контролирующие расположение крупных месторождений углеводородов. На частотах от 0.1 до 20 Гц измеренные компоненты поля несли информацию о геоэлектрических свойствах низкоомного осадочного чехла. Результаты интерпретации полученных данных в этом частотном диапазоне позволяют судить о геоэлектрическом строении осадочного чехла, выявлять зоны с относительно повышенным сопротивлением, перспективные на обнаружение месторождений углеводородов.

Ограниченность частот искусственно генерируемого излучения затрудняла дифференциацию слабоконтрастного осадочного чехла. Показано, что для построения

геоэлектрического разреза изучаемого участка работ целесообразно проводить совместную интерпретацию данных электромагнитного зондирования с контролируемым источником и данных магнитотеллурического зондирования, которые могут существенно дополнить информацию о геоэлектрическом разрезе земной коры. В свою очередь, данные ЭМЗ могут послужить надежным репером для выбора наименее искаженных кривых МТЗ.

При электромагнитных зондированиях на относительно высоких частотах (выше 20 Гц) измеренные компоненты электромагнитного поля определялись мощностью вечномерзлого слоя с высоким удельным сопротивлением. Интерпретация полученных данных в этом частотном диапазоне позволяет решать инженерно-геологические задачи, важные при строительстве объектов инфраструктуры: железных дорог, трубопроводов и т.п., и проектировании буровых скважин.

Авторы благодарны В.В. Колобову, В.Н. Селиванову, П.И. Прокопчуку за обеспечение генерации электромагнитного поля и Ю.В. Федоренко, С.В. Пильгаеву, П.Е. Терещенко, И.И. Демченко, М.В. Швецу за обеспечение регистрации сигналов при проведении экспериментальных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глубинные зондирования с промышленными ЛЭП в комплексе с МТЗ / А.А. Жамалетдинов и др. // Известия РАН. Физика Земли. 2007. № 3. С. 74–80.
2. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников / А.А. Жамалетдинов и др. // Известия РАН. Физика Земли. 2013. № 6. С. 99–115.
3. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / Е.Д. Терещенко и др. // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44, № 4. С. 43–66.
4. Разработка согласующего устройства стационарного источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона / Е.Д. Терещенко и др. // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Т. 4, № 1. С. 68–78.
5. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 73–75.
6. Шаманова И.И. Прибрежная криолитозона центральной части Обской губы // Инженерная геология. 2008. № 3. С. 8–14.
7. Есипко О.А., Горбачев В.И., Соколова Т.Н. Физические свойства пород Тюменской сверхглубокой скважины по данным геофизических исследований // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 6. С. 905–919.
8. Объяснительная записка к Тектонической карте морей Карского и Лаптевых и севера Сибири М 1:2500000 / Н.А. Богданов и др. // Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с.
10. Контролируемая трансформация кривых МТЗ / Е.В. Андреева и др. // Известия РАН. Физика Земли. 1991. № 10. С. 89–95.

Сведения об авторах

Любич Владимир Алексеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН; e-mail: lubchich@yandex.ru

Григорьев Валерий Федосеевич – помощник директора Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН; e-mail: valgri@pgi.ru

Юрик Роман Юрьевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Полярного геофизического института Кольского научного центра РАН; e-mail: roman.yurik@pgi.ru