

### **О перспективах детального исследования верхней части разреза методом отраженных электромагнитных волн**

О.А. Гулевич, Л.Б. Волкомирская, А.Е. Резников, В.В. Варенков

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),  
108840, г. Москва, г. Троицк. Калужское ш., 4.  
E-mail: o.a.gulevich@gmail.com*

*Метод отраженных электромагнитных волн, являющийся передовым методом глубинной георадиолокации, позволяет исследовать строение верхней части разреза с высокой детализацией. Представлен геоэлектрический разрез участка нефтегазового месторождения, характеризующий пространственное распределение удельного электрического сопротивления на глубину 500 метров. Данные метода могут быть использованы как для уточнения и верификации сейсмогеологической модели, так и самостоятельно.  
Ключевые слова: МОЭМВ, ВЧР, глубинный георадар, УЭС*

### **On the prospects for a detailed study of the upper part of the section using the method of reflected electromagnetic waves**

O.A. Gulevich, L.B. Volkomirskaya, A.E. Reznikov, V.V. Varenkov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN).*

*The method of reflected electromagnetic waves, which is an advanced method of deep georadar, is used to study the structure of the upper part of the section with high detail. A geoelectrical section of an oil and gas field is presented, which characterizes the spatial distribution of electrical resistivity to a depth of 500 meters. The method can be used both to refine and verify the seismogeological model and independently.  
Keywords: ECDP, deep GPR, electrical resistivity*

### **Введение**

Строение верхней части разреза (ВЧР) оказывает влияние на качество и точность геологической модели, построенной по данным глубинной сейсморазведки, которая в настоящее время является основным методом геологоразведочных работ на нефть и газ. Возможности глубинной георадиолокации методом отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ) позволяют получить данные о строении и свойствах ВЧР с высокой детализацией, характерной для волновых методов геофизических исследований [1,2].

Данные МОЭМВ, в зависимости от последовательности геофизических исследований и применения полученных результатов, перспективны для локализации низко- и высокоскоростных аномалий, приуроченных к ВЧР, в целях уточнения моделей верхнего интервала, с одной стороны, и могут служить для верификации сейсмогеологической модели, с другой стороны. При этом стоимость и трудоемкость георадиолокационных работ ниже, чем сейсмических.

В настоящей работе представляется геоэлектрический разрез, построенный на основе данных МОЭМВ в ходе пилотного исследования ВЧР на нефтегазовом месторождении Западной Сибири на глубину свыше 500 метров. Данные МОЭМВ

могут использоваться как самостоятельно, так и для уточнения сейсмогеологических моделей ВЧР в целях повышения успешности поисково-разведочного бурения.

### Методика и аппаратура

При проведении экспериментального проекта по глубинному исследованию нефтегазового месторождения в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа в 2020 г. были использованы: экспериментальный приемник производства ООО «Таймер» на основе прототипа ГРОТ 12 с увеличенной шкалой временных задержек до 40 мкс; экспериментальный передатчик ГРОТ с увеличенной мощностью (пиковая амплитуда напряжения 48-64 кВ); экспериментальные антенны – резистивно-нагруженные диполи длиной 30 и 50 м на приемник и передатчик.

Технические характеристики экспериментальной аппаратуры МОЭМВ представлены в таблице 1, динамический диапазон аппаратуры в экспериментальном проекте составил более 173 дБ.

**Таблица 1. Технические характеристики экспериментальной аппаратуры МОЭМВ**

| Параметр                                 | Значение     |
|--|--------------|
| Динамический диапазон                    | >173 дБ      |
| Диапазон частот                          | 1 – 200 МГц  |
| Частота дискретизации                    | 200 МГц      |
| Длительность регистрируемых реализаций   | до 32000 нс  |
| Чувствительность                         | 100 мкВ      |
| Пиковая амплитуда импульса передатчика   | >48 кВ       |
| Напряжение источника питания             | 10-15 В      |
| Диапазон температур                      | -20 +50°С    |
| Вес георадара с аккумулятором без антенн | 7 кг         |
| Обработка данных в реальном времени      | не более 1 с |
| Длина импульса передатчика               | 10 нс        |
| Вес передатчика                          | 3 кг         |
| Вес приемника                            | 0,91 кг      |

Экспериментальные антенны – гибкие резистивно-нагруженные диполи на приемник и передатчик в виде буксируемой приемо-передающей косы – представлены на рисунке 1.

Координатная привязка данных на участке на участке экспериментальных работ в Надымском районе проводилась в реальном времени с помощью GPS приемника. Перемещение аппаратуры производилось последовательно с помощью неметаллического троса, при профилировании использовался вездеход (рис. 2). Управление измерением при профилировании осуществлялось промышленным полевым компьютером по Wi-Fi связи из вездехода.

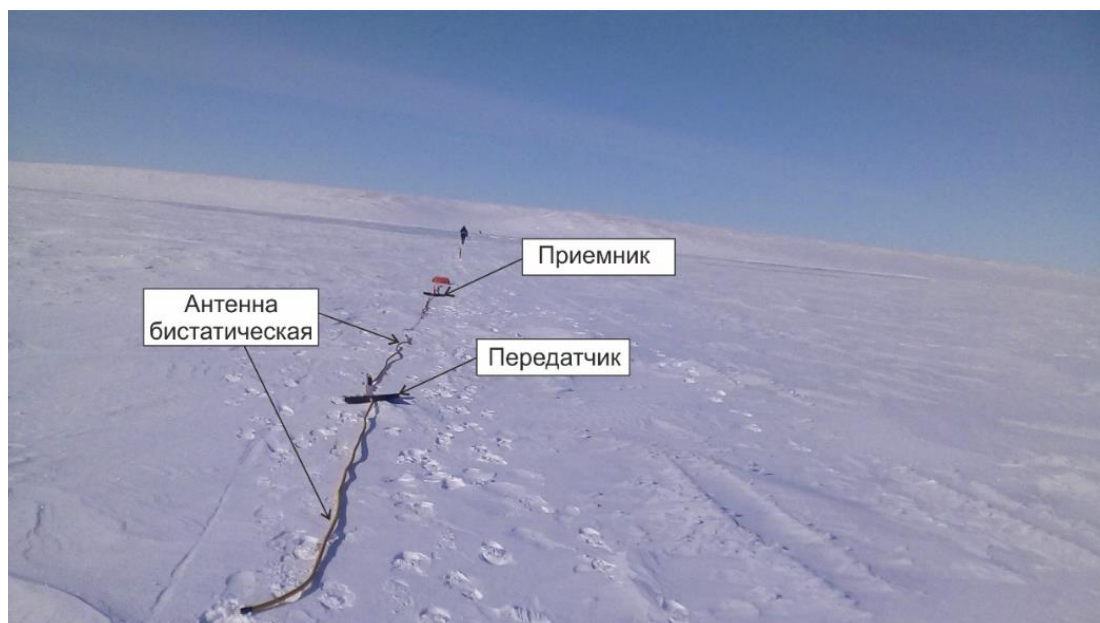


Рис. 1. Антенная установка МОЭМВ на участке экспериментальных работ

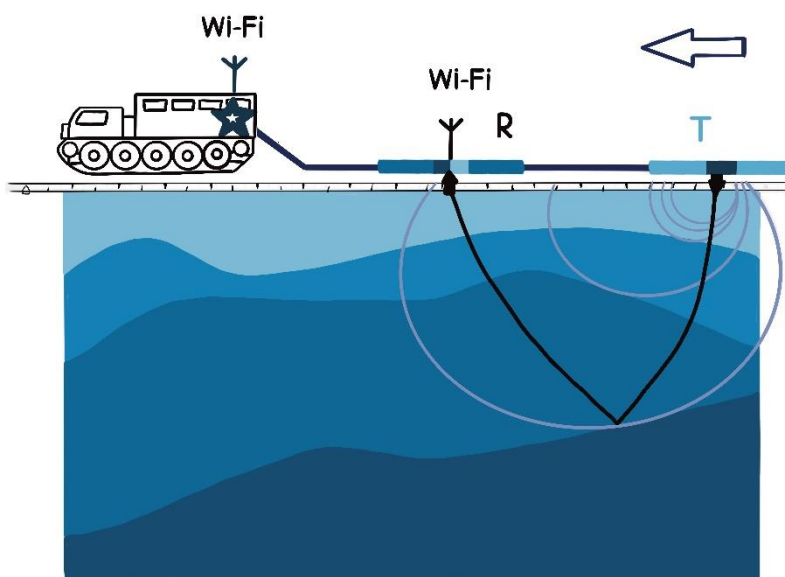


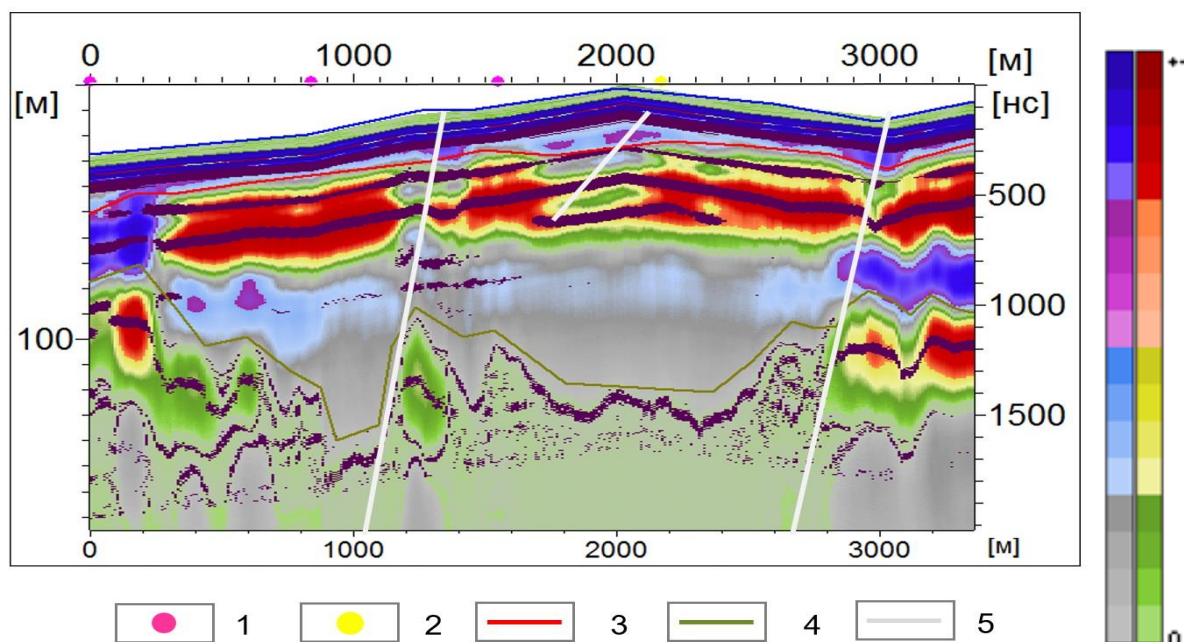
Рис. 2. Схема профилирования МОЭМВ с помощью вездехода  
R – приемник; T – передатчик.

### Результаты

Основные результаты работ, в том числе сопоставление данных МОЭМВ с данными сейсморазведки МОВ и метода ЗСБ опубликованы в [1-4].

Для более детального рассмотрения зоны распространения ММП мы провели анализ на основе проведения дополнительных границ, наблюдаемых с помощью МОЭМВ 2D, начиная с поверхности (рис. 3). Изменение теплового режима в поверхностной части криолитозоны приводит к протаиванию отдельных участков грунта, вытаиванию сегрегационных и жильных льдов и, как следствие, к просадке грунта и возникновению специфических форм термокарстового, отрицательного рельефа. Поэтому существенное значение имеет учет рельефа при интерпретации данных МОЭМВ. В качестве исходных данных был выбран профиль, на котором ранее

получено глубинное распределение скорости электромагнитных волн по данным годографа методом общей глубинной точки (ОГТ) в программе ProMAX [1].



**Рис. 3. Радарограмма ВЧР с учетом рельефа (слева), палитра градаций амплитуд (справа)  
1 - пикеты профилирования; 2- центр ОГТ;  
3 – кровля ММП; 4 – подошва ММП; 5 – оси разломных аномалий**

На рисунке 3 выделяются структурные особенности на радарограмме с дополнительной интерпретацией в программе обработки GROT: белыми линиями отмечены оси разломов, выделены границы кровли и подошвы ММП.

Относительная проводимость  $\sigma_i$  слоя с постоянным значением диэлектрической проницаемости на глубине от  $z_1$  до  $z_2$  определялась в первом приближении на основе решения телеграфного уравнения в виде  $E = \exp(-pz - ikz + i\omega t)$  следующей пропорцией [2]:

$$\sigma_i \sim \frac{\ln(A_1/A_2)}{(z_2 - z_1)}, \quad (1)$$

где  $p$  – коэффициент затухания;

$k$  – волновое число;

$\omega$  – круговая частота;

$A_1$  и  $A_2$  – значения амплитуды принимаемого сигнала на глубинах  $z_1$  и  $z_2$  соответственно.

После проведения процедур миграции и пересчета данных по формуле 1 для нормированных амплитуд получен геоэлектрический разрез по параметру относительного удельного сопротивления – УЭС (рис. 4). Процедура миграции, реализованная в программе обработки GROT, заключается в пересчете глубины разреза с применением соответствующих скоростных характеристик электромагнитных волн послойно, то есть без общего усреднения.

Геоэлектрический разрез представлен в палитровом отображении, т.е. отображении амплитуды сигнала с помощью цветовой градации амплитуды (рис. 5). При таком отображении амплитудные значения электромагнитного поля позволяют определить только смены полярности сигнала, которые обусловлены изменением комплексной функцией диэлектрической проницаемости, но не затухание сигнала.

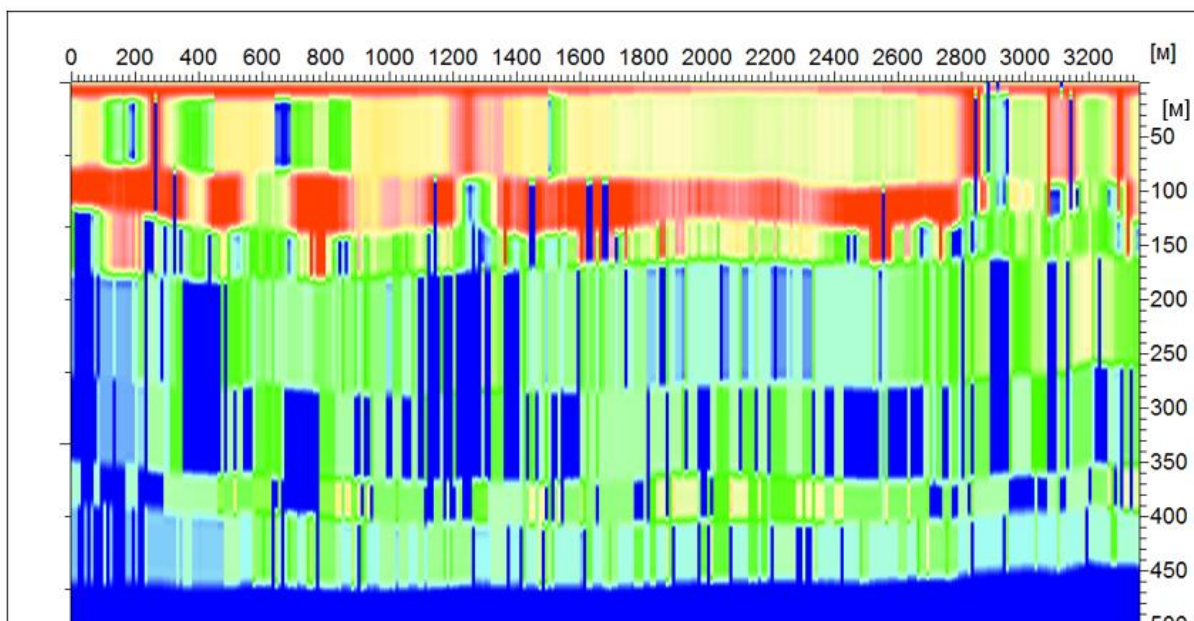


Рис. 4. Геоэлектрический разрез МОЭМВ по параметру относительного УЭС (градации палитры нормированных значений УЭС на рис. 5).

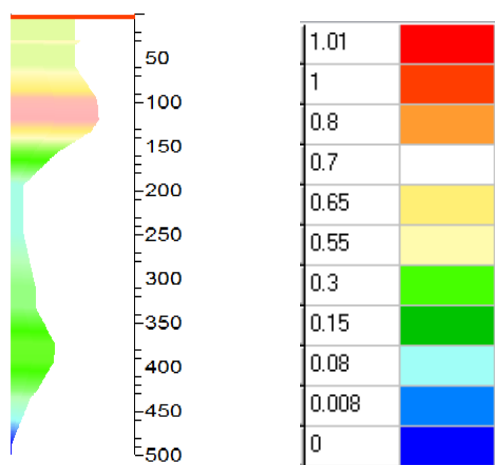


Рис. 5. Распределение УЭС в нормированных единицах в центре МОЭМВ-ОГТ (слева) и палитра нормированных значений УЭС (справа).

В толще ММП выделяется два слоя, отличающиеся по электрофизическим свойствам, что характерно для строения ММП исследуемого региона Западной Сибири: выделяются верхний слой и нижний реликтовый слой вечной мерзлоты, который по полученным данным отличается более высоким УЭС. В целом, проводимость на участке работ вблизи центра МОЭМВ-ОГТ согласно рис. 4,5 увеличивается с глубиной, что соответствует геологическому строению участка с учетом положения зоны ММП.

Количественная оценка УЭС по данным МОЭМВ в абсолютных значениях возможна после калибровки по данным измерений, проводимым на участке другими методами, или на основе лабораторных исследований взятых проб горных пород.

### Выводы

Увеличенная глубина зондирования, информативность в низкоомных средах и возможность построения геоэлектрического разреза, характеризующего

пространственное распределение УЭС выгодно отличают МОЭМВ от классической малоглубинной георадиолокации.

Метод МОЭМВ позволяет отслеживать изменения относительной проводимости по профилю и по глубине, что позволяет использовать естественное преимущество электромагнитного зондирования над акустическим при локализации границ вода/лед и вода/углеводороды в целях картирования ММП и перспективно для определения характера насыщения пласта (вода, нефть, газ, конденсат).

### **Литература**

1. Gulevich O.A., Kaigorodov E.P., Lyakhov G.A., Reznikov A.E., Varenkov V.V., Volkomirskaya L.B. Experimental Study of a Deep Oil and Gas Deposit by the Method of Reflected Electromagnetic Waves, ISSN 1541-308X, Physics of Wave Phenomena, 2021, Vol. 29, No. 4, 311–320.
2. Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Резников А.Е., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Изучение распределения проводимости в криолитозоне на основе данных метода отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ). Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №9 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.6>
3. Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Долгих Ю.Н., Кайгородов Е.П., Санин С.С., Варенков В.В., Резников А.Е., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Опыт исследования криолитозоны методом отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ) на глубину свыше 500 метров. // Сборник тезисов научно-практической конференции «Электроразведка 2021»; под ред. М.С. Судаковой, В.В. Оленченко, М.Р. Садуртдинова. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. С. 82-88.
4. Dolgikh Yu.N., Volkomirskaya L.B., Kaygorodov E.P., Sanin S.S., Kuznetsov V.I., Gulevich O.A., Reznikov A.E., Varenkov V.V. The Reflected Electromagnetic Wave CDP Method (ECDP) Testing Results and Possibilities for The Future Oil and Gas Exploration. // Proceedings of the conference «Tyumen 2021», March 2021. Vol. 2021. P. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150007>