



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.15>

УДК: 537.87, 550.37

## РЕЗУЛЬТАТЫ СКОРОСТНОГО АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МОЭМВ-ОГТ В КРИОЛИТОЗОНЕ

О.А. Гулевич<sup>1,2</sup>, Л.Б. Волкомирская<sup>1</sup>, Е.П. Кайгородов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН,  
108840, Москва, г. Троицк, Калужское ш., д. 4

<sup>2</sup> ООО «Таймер»,  
108840, Москва, г. Троицк, ул. Лесная, д. 4Б

<sup>3</sup> Научно-аналитический центр рационального недропользования  
им. В.И. Шпильмана,  
625026 Тюмень, ул. Малыгина, 75

Статья поступила в редакцию 29 июля 2024 г.

**Аннотация.** Выполнен скоростной анализ экспериментальных данных, полученных в 2023 году методом отраженных электромагнитных волн с изменяемой базой разноса приемника и передатчика (МОЭМВ-ОГТ) на территории Мирнинского улуса республики Саха, Якутия. На основе данных скоростного анализа построена геофизическая модель разреза в точке ОГТ по параметру удельного электрического сопротивления – «виртуальная скважина» глубиной 500 метров. Обсуждаются возможности применения МОЭМВ-ОГТ для выявления малококонтрастных аномалий и геологических объектов в верхней части разреза.

**Ключевые слова:** МОЭМВ-ОГТ, глубинная георадиолокация, УЭС, виртуальная скважина.

**Автор для переписки:** Гулевич Оксана Александровна, [o.a.gulevich@gmail.com](mailto:o.a.gulevich@gmail.com)

## Введение

В классификации традиционных электромагнитных методов, применяемых в прикладной геофизике, принято группировать методы электроразведки, работающие в квазистационарном приближении, и методы малоглубинной георадиолокации, применяемой в приближении непроводящей среды в частотном диапазоне выше 30 МГц. На практике, преобладающее влияние волнового характера распространения поля над диффузионным условно определяют частотным диапазоном порядка 1 МГц и выше [1]. Однако получение волновой картины поля при электромагнитном зондировании геологических сред в диапазоне ниже 30 МГц сопряжено с известными трудностями. Во-первых, согласно теории взаимодействия импульсных сигналов с средами с проводимостью и дисперсией зона перехода от волнового характера поля к диффузионному зависит как от характеристик сигнала, так и исследуемой среды и может в первом приближении для сред с проводимостью оцениваться значением  $\sigma T$ , где  $\sigma$  – электропроводность среды, а  $T$  – характерная длительность зондирующего сигнала, определяемая длиной волны для сигналов с несущей частотой [2]. Чем выше проводимость и больше длительность сигнала, тем раньше происходит деформация формы сигнала в результате его взаимодействия со средой, а отслеживание волновой картины по движению фронта сигнала становится затруднительным, требует дополнительных приемов обработки. Во-вторых, в соответствии с критерием Рэля, при увеличении характерной длительности сигнала для увеличения глубины зондирования теряется пространственное и/или временное разрешение. На практике лучшие показатели по глубине зондирования были получены при зондировании сигналами особой формы, без несущей частоты – сверхширокополосными электромагнитными импульсами с крутым передним фронтом, позволяющим увеличить пространственное разрешение и получить волновой характер взаимодействия поля в геологических условиях сред с дисперсией и проводимостью [3]. В-третьих, технические параметры аппаратуры должны позволять не только

генерацию, но и регистрацию сигналов особой формы в требуемом режиме, с наименьшими потерями в информативности [4].

Несмотря на потерю в пространственном разрешении при переходе от малоглубинных исследований до 30 метров к глубинам в сотни метров, МОЭМВ значительно превосходит по детальности в верхней части разреза существующие методы электроразведки за счет прямой регистрации времени задержки сигнала от подповерхностных границ и, соответственно, в отсутствии необходимости применения моделей среды, определяющих качество процедур инверсии и интерпретации.

Впервые скоростной анализ данных МОЭМВ до глубин более 500 м был получен на основе глубинного георадарного исследования участка нефтегазового месторождения в Надымском районе, в Ямало-Ненецком автономном округе, в зоне сплошного распространения вечной мерзлоты [5,6].

В настоящей работе представлены некоторые результаты экспериментального геофизического исследования МОЭМВ-ОГТ на Мирнинском участке недр, Якутия, которое проводилось в ходе комплексного изучения гидрогеологических условий. Скоростной анализ полученных данных МОЭМВ-ОГТ был произведён на основе алгоритмов обработки данных сейсморазведки в пакете типовой обработки SeisSpace/ProMAX. Полученные результаты затем анализируются и используются для построения геофизической модели в точке ОГТ, так называемой «виртуальной скважины».

## **1. Методика работ**

Полевые работы МОЭМВ проводились на территории Мирнинского участка недр в октябре 2023 года при отрицательных температурах воздуха. В геокриологическом отношении участок работ находится в области распространения вечной мерзлоты с подошвой мерзлых пород на глубине около 150 м. Сопоставление полученных данных с априорной информацией обеспечивалось изученностью района работ методами сейсморазведки, электроразведки и бурением скважин.

Полевые работы проводились с помощью экспериментальной аппаратуры МОЭМВ, разработанной ООО «Таймер» [7]. Моноимпульсный широкополосный аппаратно-программный комплекс МОЭМВ включал передатчик повышенной мощности с пиковой амплитудой импульса 48кВ, модификации приемников ГРОТ 12 и ГРОТ 12Н, экспериментальные антенны на приемник и передатчик 50 м. При съемке годографов методом общей глубинной точки (МОЭМВ-ОГТ) производилось раздвижение блоков приемника и передатчика по профилю от начального положения в 100 м до 280-740 м для разных расстановок, с шагом перемещения блоков между точками измерения – 10 м. Синхронизация записи в приемнике осуществлялась беспроводным способом (блоки не соединены между собой).

Регистрация волновых форм на всю глубину временных задержек для разных годографов длительностью от 10 до 32 микросекунд, в каждой точке измерений осуществлялось посредством накоплений измерений  $N$  с увеличением числа накоплений с максимальным их количеством:  $N = 20;50$ .

## 2. Результаты

При обработке данных в программном комплексе обработки сейсмических данных SeisSpace/ProMax применялись следующие процедуры: полосовая фильтрация, адаптивное подавление помех, спектральное отбеливание, расчёт и ввод корректирующих статических поправок, а также программы по улучшению формы амплитудно-частотного спектра, соотношения сигнал/помеха и другие, менее значимые процедуры.

На рисунке 1 представлен пример основного этапа обработки одного из годографов МОЭМВ-ОГТ во временном интервале от 0 до 10000 нс. Слева направо: вертикальный спектр ЭМ скоростей  $V_{rms}$  с указанными амплитудными разрастаниями (semblances), радарограмма ОГТ до кинематической коррекции с отмеченными осями синфазности, соответствующими амплитудным разрастаниям коэффициента подобия и суммарная динамическая трасса; на правом фрагменте рисунка (в глубинном масштабе): спектр скоростей после

интерпретации, радарограмма ОГТ после кинематической коррекции – белые штрих-линии указывают на соответствие спрямлённых осей синфазности после ввода нормальных кинематических поправок амплитудным разрастаниям вертикальных спектров скоростей.

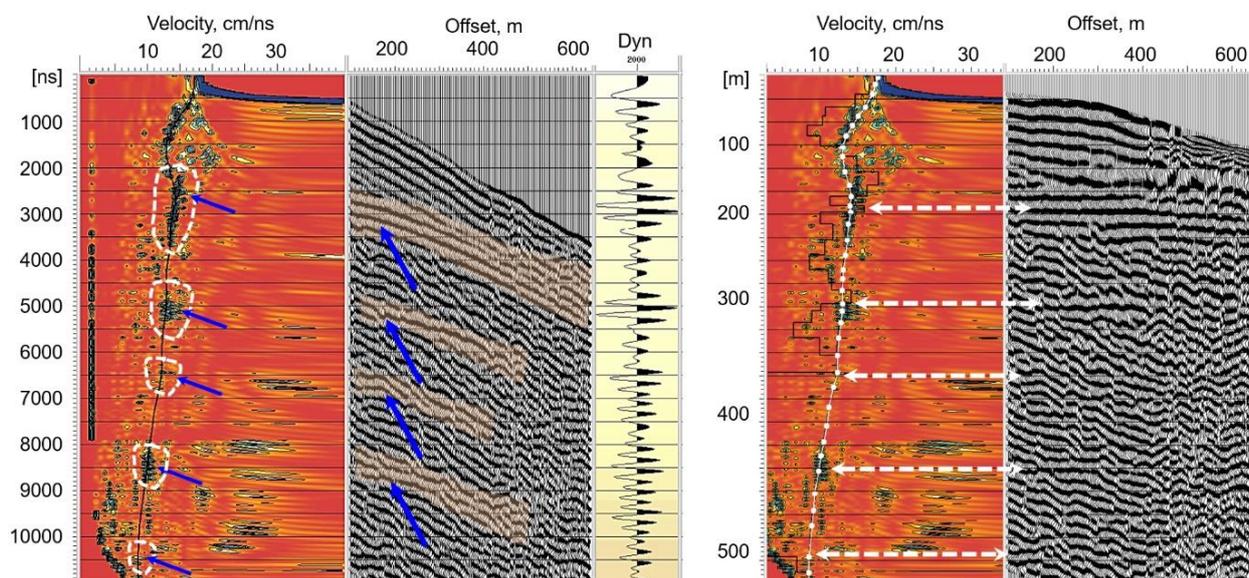


Рис. 1. Скоростной анализ данных МОЭМВ-ОГТ в интервале 0-10000 нс до интерпретации слева и после – справа.

Характерной особенностью всех полученных на участке данных МОЭМВ-ОГТ является зона инверсии скорости в области 1500 нс с разбросом значений 100-200 нс (рис. 1). Данная инверсия служит признаком неоднородности структуры толщи мерзлых пород.

Все годографы МОЭМВ-ОГТ были получены в пределах небольшого участка на расстоянии не более 10 км друг от друга. Тем не менее, наблюдается изменчивость между данными, полученными на удалении, и годографами, снятыми с поворотом вокруг общей центральной точки на поверхности. Изменчивость электрических характеристик по латерали вызвана неоднородными гидрогеологическими условиями, влиянием речек и ручьев, относящихся к бассейну реки Чуоналыр, сложным строением толщи многолетнемерзлых пород.

В качестве примера рассмотрим поведение функции скорости  $V_{rms}$  на годографах, снятых модифицированным приемником ГРОТ 12Н с длительностью

регистрации 32 мкс и накоплением  $N = 50$  (рис. 2). Годографы 1А и 2В сняты на перпендикулярных профилях с общей центральной точкой, годограф 3С снят на расстоянии около 5,3 км от них. Наблюдается сходство паттернов полученных распределений скорости с общей центральной точкой, с небольшими отличиями, вызванными азимутальной неоднородностью разреза в области ОГТ. При этом паттерн годографа 3С выражено отличается на всем диапазоне времён.

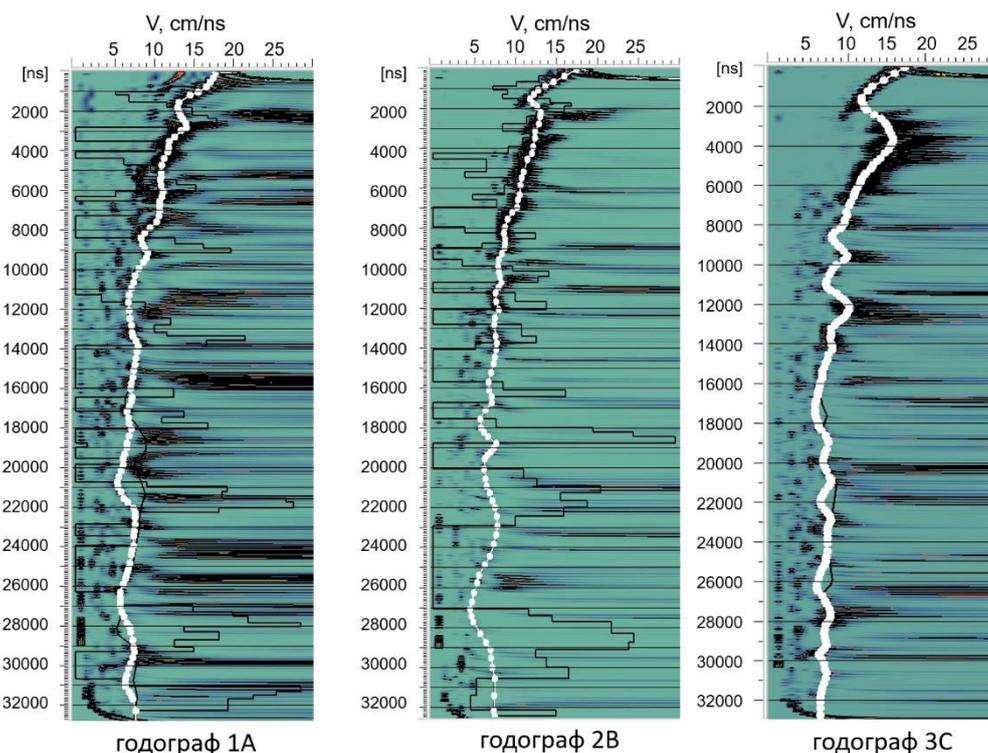


Рис. 2. Распределение ЭМ скоростей  $V_{rms}$  в интервале 0-32000 нс по данным годографов, снятым на разных профилях.

Для построения геофизической модели разреза и сопоставления результатов скоростного анализа с данными других методов удобнее перейти к интервальным скоростям ЭМ сигнала, так как интервальные скорости наиболее дифференцированно отображают изменение скоростных зависимостей в исследуемом разрезе с выбранным шагом и определяются электрофизическими характеристиками горных пород в этих интервалах. На рисунке 3 приведен пример распределения эффективных интервальных ЭМ скоростей в приповерхностной части разреза по данным годографа, снятого рядом со скважиной. Интервальные скорости здесь рассчитаны с шагом (интервалом) 50 нс. Этот шаг задаёт погрешность определения

электрофизических параметров и разрешения пластов с разными электрофизическими параметрами.

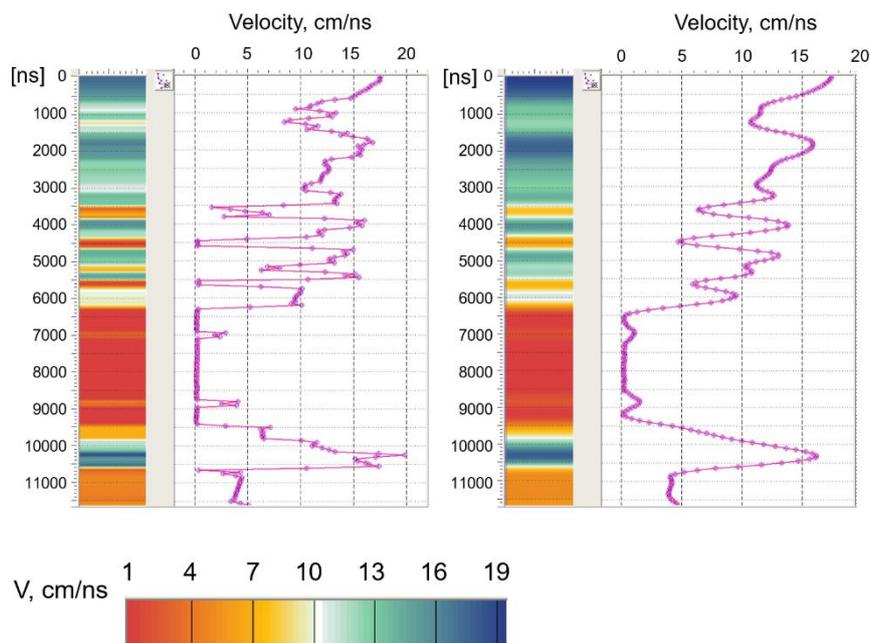


Рис. 3. Интервальные скорости ЭМ сигнала до и после сглаживания.

График интервальных скоростей МОЭМВ-ОГТ обладает большой изменчивостью на всем интервале глубин, что показывает высокую разрешающую способность метода глубинной георадиолокации в сравнении с поверхностными и дистанционными методами электроразведки. В качестве основных характеристик разреза можно укрупненно выделить область высоких скоростей с областью максимума на глубине 120-150 м (предположительно соответствующему слою реликтовой мерзлоты с высоким УЭС). Начиная с времени 3500 нс на графике появляются участки экстремально низких значений скоростей, в абсолютном выражении значения интервальной скорости, рассчитанные с применением метода сглаживающих градиентов, реализованного в пакете обработки SeisSpace/ProMAX, падают до 0,2-1 см/нс.

### 3. Обсуждение результатов

Представленные результаты скоростного анализа МОЭМВ-ОГТ с распределением интервальных скоростей в центре ОГТ получены впервые. Наблюдается качественное соответствие значений скорости

зондирующего сигнала априорной информации о геологическом разрезе, в том числе повышение скорости сигнала в мерзлых грунтах и ее снижение в талых.

Целью геофизических исследований является восстановление параметров разреза и образующих его горных пород и техногенных объектов по данным измерений, то есть решение обратной задачи.

Наиболее простой способ оценить электрические свойства горных пород разреза по результатам скоростного анализа МОЭМВ-ОГТ – это откалибровать полученное распределение эффективной интервальной скорости по табличным значениям диэлектрической проницаемости горных пород, которые получены в лабораторных исследованиях, проведенных в условиях, заведомо отличающихся от условий эксперимента (монохроматический источник с частотой, как правило, 100 МГц, определенная температура, влажность, пористость, плотность и т.д.). Табличные значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  широко применяются в классической георадиолокации и дают малую погрешность не в последнюю очередь за счет малой глубины таких исследований. Данный способ также удобен тем, что позволяет легко оценить погрешность перевода временного разреза (радарограммы) в глубинный, так как для подавляющего большинства горных пород, встречающихся в естественных условиях залегания, значения  $\epsilon$  лежат в пределах от 3 до 30, с исключением  $\epsilon = 81$  для воды.

Описанный способ может быть эффективен для решения некоторых практических задач по картированию геологических структур с большим контрастом электрофизических параметров.

Оценим полученный разброс значений интервальных скоростей ЭМ сигнала с точки зрения его возможности в условиях рассматриваемого эксперимента. Для этого воспользуемся математической постановкой задачи распространения сигнала в среде, которая описывается системой уравнений Максвелла, дополненной материальными уравнениями и законом Ома. Для однородной, линейной среды без учета дисперсии имеем:

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}, \operatorname{rot}\mathbf{H} = \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J},$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = 0, \operatorname{div}\mathbf{B} = 0,$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E},$$

где  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{B}$  – это векторы напряженности магнитного поля и магнитной индукции, соответственно;  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$  – векторы электрического поля и электрической индукции, соответственно;  $\mathbf{J}$  – плотность тока проводимости,  $\mu$  и  $\varepsilon$  – абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемость среды,  $\sigma$  – электропроводность среды,  $t$  – время. После применения оператора ротор к закону Фарадея:

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{E} = \operatorname{rot}\left(-\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}\right),$$

учитывая, что:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{rot}\mathbf{B}).$$

Из материального уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{rot}\mathbf{B}) = \mu\frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{rot}\mathbf{H}).$$

После подстановки полученных выражений в закон Ампера получим:

$$\Delta\mathbf{E} = \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа. Это уравнение называют телеграфным по аналогии с уравнениями, применяемыми в теории передачи ЭМ сигналов в волноводе [8]. Частными случаями этого уравнения являются волновое уравнение, применяемое в классической георадиолокации, и уравнение диффузии, или теплопроводности, применяемое в электроразведке.

Решение телеграфного уравнения для гармонического поля, представленного формулой  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0^{i\omega t}$ , где  $\mathbf{E}_0$  – амплитуда колебаний,  $\omega$  – круговая частота,

определяется комплексным волновым числом, которое можно записать в виде  $k = \alpha + i\beta$ . Тогда решение для плоской волны в одномерном приближении имеет вид:

$$E(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}. \quad (2)$$

В этом случае получают выражение для фазовой постоянной  $\beta$  (1), которая характеризует фазовую скорость волнового фронта  $v_p$  (2) [8]:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}, \quad (3)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta}. \quad (4)$$

В непроводящей среде и в приближении малого затухания  $\sigma \ll \varepsilon\omega$  выражение для фазовой постоянной сводится к:

$$\beta = \omega \sqrt{\varepsilon\mu},$$

тогда:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$

Отсюда, при условии немагнитной среды, получают выражение для скорости ЭМ волны, традиционно применяемое в георадиолокации:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды. В первом приближении скорость распространения зондирующего импульса георадара в высокоомных слоях разреза, в том числе в мерзлых породах, можно оценивать по формуле (5), помня о погрешностях,

которые могут быть связаны с дисперсией, а также статистическими поправками, в том числе связанными с разносом блоков и потерями при синхронизации [9].

Для проводящей среды, в условиях квазистационарности  $\sigma \gg \varepsilon\omega$ , из (3) получаем:

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega\sigma\mu}{2}}.$$

Тогда

$$v_p = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} = 2\sqrt{\frac{\pi f \rho}{\mu}}, \quad (6)$$

где  $f$  – частота приложенного ЭМ поля,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление (УЭС) среды. В этом случае скорость сигнала не зависит от диэлектрической проницаемости среды.

Учитывая тот факт, что метод МОЭМВ работает в переходной зоне между двумя крайними рассмотренными условиями, можно ожидать получение промежуточных значений для скорости ЭМ сигнала в эксперименте, а оценку скорости по формуле (6) рассматривать как крайнюю снизу.

Например, для частоты  $f = 3$  МГц и относительной диэлектрической проницаемости, в среднем характерной для мерзлых пород,  $\varepsilon = 4$ , учитывая, что диэлектрическая проницаемость вакуума  $\varepsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, условие квазистационарности можно переписать в параметре УЭС в виде  $\rho \ll \frac{1}{\varepsilon\omega} \approx 1500$  Ом\*м, аналогично для  $\varepsilon = 9$  условие квазистационарности  $\rho \ll 660$  Ом\*м.

Из формулы (6) для оценки УЭС горных пород по данным скоростного анализа МОЭМВ-ОГТ получаем:

$$\rho = \frac{\mu v_p^2}{4\pi f}. \quad (7)$$

Для немагнитной среды можно положить магнитную проницаемость равной магнитной постоянной  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м.

Расчет эффективного УЭС по формуле (7) позволяет получить приближенную количественную оценку УЭС горных пород в частотном диапазоне МОЭМВ-ОГТ.

Следует отметить, что в общем случае частотная зависимость электрических свойств горных пород в естественных условиях может быть весьма сложной, однако количественная оценка имеет большую ценность для решения практических задач.

На рисунке 4 приведен пример геофизической модели разреза в точке ОГТ, построенной по данным распределения интервальных скоростей (рис. 3). Геологические данные приведены по данным ближайшей скважины. Значения УЭС получены по формуле (7) для немагнитной среды и центральной частоты 3 МГц. Перевод временной шкалы в шкалу глубин (h) произведен по результатам скоростного анализа.

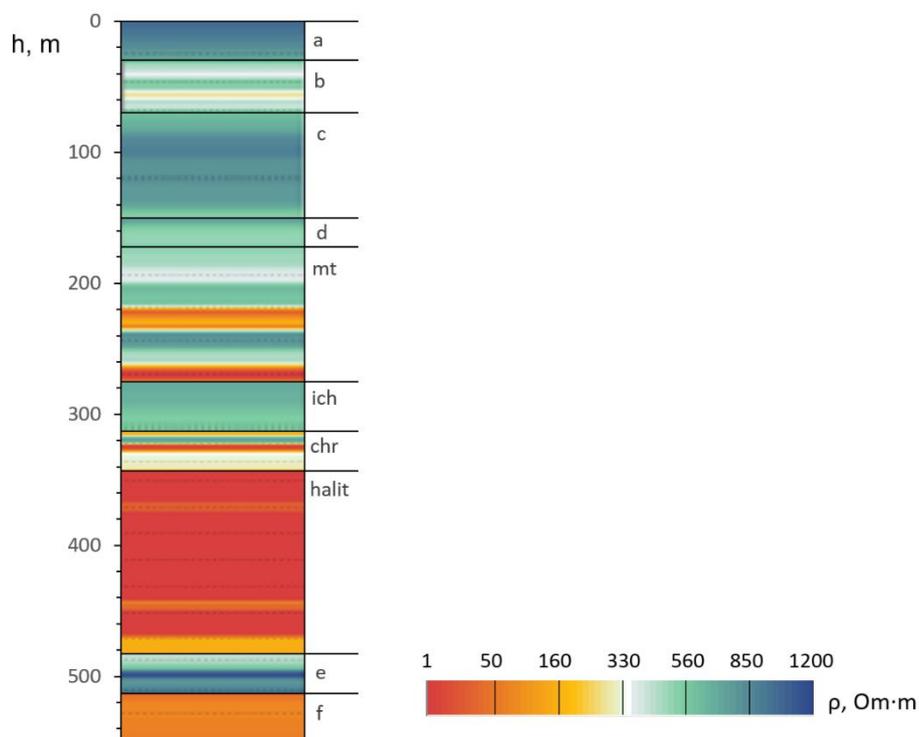


Рис. 4. Виртуальная скважина по параметру УЭС – геоэлектрическая модель МОЭМВ-ОГТ.

Согласно полученным данным (рис. 4), разрез имеет достаточно контрастные электрические характеристики, в основном обусловленные зависимостью свойств горных пород от температуры (талый/мерзлый) и влажности. Слой (а) с высоким УЭС ( $\sim 900 \text{ Ом*м}$ ) переходит в зону (b) с пониженным УЭС ( $200\text{-}500 \text{ Ом*м}$ ), в слое (с) УЭС возрастает до  $850 \text{ Ом*м}$ , затем, вплоть до кровли Метегерской свиты (mt), УЭС снижается. Слой (с) соответствует положению слоя реликтовой мерзлоты, причем полученные эффективные значения УЭС (свыше  $800 \text{ Ом*м}$ ) находятся в пределах диапазона значений удельных электрических сопротивлений мерзлых пород, известных по большому количеству источников. Появление прослоя b с пониженными УЭС горных пород может быть приурочено к участку растепления/расслаивания мерзлоты, в слое b возможно также наличие межмерзлотных вод (УЭС подземных вод в областях развития многолетнемерзлых горных пород варьируется в пределах  $40\text{-}300 \text{ Ом*м}$  [1]).

Метегерская свита (mt) находится ниже границы мерзлых пород и представлена несколькими слоями с УЭС, изменяющимся в широком диапазоне от 3 до  $400 \text{ Ом*м}$ , что может быть обусловлено напластованием осадочных горных пород с различными свойствами. Ичерская свита (ich) представлена породами с относительно повышенным средним УЭС ( $\sim 600 \text{ Ом*м}$ ).

Отложения Чарской свиты (chr) на всём интервале её распространения (развития) в целом характеризуются повышенными значениями кривых ГИС: нейтронного гамма-каротажа (НГК), кавернометрии (КВ) и пониженными значениями кривой гамма-каротажа по сравнению с отложениями пород, перекрывающими данную свиту. Этот интервал для «виртуальной скважины» по параметру УЭС характеризуется низкими значениями (от 1 до  $160 \text{ Ом*м}$ ). По данным метода МОЭМВ-ОГТ исключение составляет слой на глубине порядка 500 м, в пределах которого фиксируются повышенные значения УЭС для «виртуальной скважины». Примечательно, что и по результатам оперативной обработки материалов ГИС для скв. 2751 – Боурдахская в пределах вышеназванного интервала зарегистрированы по данным методов ГИС:

бокового микрокаротажа и бокового каротажа (БК) – повышенные (по сравнению с вмещающими породами) значения УЭС.

Резкое повышение значений кривых НГК и КВ определяют положение границы «halit» (глубина 340 м), которая предположительно отделяет нефтенасыщенные коллекторы от водонасыщенных с повышенной электропроводностью. Таким образом, породы Чарской свиты характеризуется засоленными породами (каменная соль, доломиты, известняки), насыщенными водой, появление залежей каменной соли отмечается ниже 340 м, это соответствует интервалу глубин 340-500 м «виртуальной скважины» с минимальными значениями УЭС.

Учитывая широкий диапазон УЭС горных пород, полученный результат скоростного анализа МОЭМВ-ОГТ особенно важен для практических задач по выявлению аномалий и объектов, малоконтрастных по электрическим свойствам ко вмещающим породам.

Отметим, что в рассматриваемом эксперименте размер установки аппаратуры МОЭМВ на поверхности сопоставим с исследуемыми глубинами, источник сигнала, в строгом понимании, нельзя рассматривать как точечный, а потенциальными целями являются крупные геологические структуры, слои горных пород с разными электрическими характеристиками.

При построении виртуальной скважины по данным МОЭМВ-ОГТ, в отличие от алгоритмов обработки данных методов электроразведки, не требуется априорная информация о геологическом и структурном строении участка, достаточно данных измерений. Однако, для повышения точности геолого-геофизической модели по данным МОЭМВ-ОГТ, рекомендуется анализировать полученный результат, сопоставляя его с другими данными о районе исследования.

## Заключение

Впервые получено распределение эффективных интервальных скоростей электромагнитного сигнала по результатам скоростного анализа данных МОЭМВ-ОГТ на глубинах свыше 500 метров.

Впервые произведена оценка УЭС горных пород геологического разреза по данным скоростного анализа ЭМ сигналов. Полученная геофизическая модель разреза в точке ОГТ по параметру УЭС («виртуальная скважина») соответствует имеющейся априорной информацией о разрезе, данным бурения и ГИС.

Количественная оценка УЭС горных пород по результатам скоростного анализа данных МОЭМВ-ОГТ перспективна для выявления малоcontrastных аномалий и объектов в верхней части разреза.

Высокое пространственное разрешение МОЭМВ-ОГТ и повышенная за счет усовершенствованного скоростного анализа информативность перспективны для применения метода в практической геофизике.

## Литература

1. Алексанова Е.Д. и др. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей // Под ред. проф. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М. – 2005.
2. Гулевич О.А. Импульсное сверхширокополосное электромагнитное зондирование природных и техногенных сред с дисперсией // Москва. – 2015.
3. Волкомирская Л.Б. и др. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – Т. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.6>
4. Volkomirskaya L.B. et al. Impact of signal registration technology on GPR data // Engineering and Mining Geophysics 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – Т. 2021. – №. 1. – С. 1-9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152005>

5. Kilpio E.Y., Shcherbakov I.A. On the Results in Physics Obtained in 2020–2021 //Doklady Physics. – Moscow: Pleiades Publishing, 2022. – Т. 67. – №. 10. – С. 377-404. <https://doi.org/10.31857/S2686740022070069>
6. Dolgikh Y.N. et al. The reflected electromagnetic wave CDP method (ECDP) testing results and possibilities for the future oil and gas exploration //Tyumen 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – Т. 2021. – №. 1. – С. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150007>
7. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А. Способ глубинной георадиолокации и устройство для его осуществления. Патент на изобретение № RU2816128С1 от 26.03.2024г.
8. Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. – 1985.
9. Gulevich O. et al. Typical effects of the registration technology implemented in the GPR receiver //NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – Т. 2021. – №. 1. – С. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120153>

**Для цитирования:**

Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Кайгородов Е.П. Результаты скоростного анализа экспериментальных данных МОЭМВ-ОГТ в криолитозоне. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.15>