

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ СКОРОСТНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ МЕТОДА ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН (МОЭМВ-ОГТ)

О. А. Гулевич^{*,1,2}, Л. Б. Волкомирская¹ и Е. П. Кайгородов³¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия²ООО «Таймер», г. Москва, Россия³АУ «НАЦ РН им. В. И. Шпильмана», г. Тюмень, Россия* **Контакт:** Оксана Александровна Гулевич, o.a.gulevich@gmail.com

Разработан алгоритм оценки удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород на основе скоростного анализа данных метода отраженных электромагнитных волн с изменяемой базой разнеса приемника и передатчика (МОЭМВ-ОГТ). При построении геоэлектрической модели в точке («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. Приводится пример виртуальной скважины по параметру УЭС глубиной 500 метров, построенной в ходе экспериментального исследования в криолитозоне.

Ключевые слова: МОЭМВ-ОГТ, глубинная георадиолокация, УЭС, виртуальная скважина.**Цитирование:** Гулевич, О. А., Л. Б. Волкомирская, Е. П. Кайгородов Оценка электрических свойств горных пород на основе скоростного анализа данных метода отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ-ОГТ) // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES1003. — DOI: 10.2205/2025es000933 — EDN: FEVYKC**Введение**

Целью геофизических исследований является восстановление параметров разреза и образующих его горных пород и техногенных объектов по данным измерений, то есть решение обратной задачи. В классе электромагнитных методов условно выделяют большую группу методов электроразведки, работающих в квазистационарном приближении, и метод малоглубинной георадиолокации, применяемой в приближении непроводящей среды в частотном диапазоне выше 30 МГц.

Построение геоэлектрической модели разреза в методах электроразведки требует априорной геолого-геофизической информации об основных чертах инженерно-геологических и гидрогеологических условий исследуемого региона. Поэтому проблема достоверности геоэлектрического моделирования остается одной из самых актуальных геофизических проблем несмотря на использование компьютерных технологий и новые алгоритмы инверсии [Christensen, 2000; Doyoro et al., 2022; Gautier et al., 2023; Hou et al., 2020; Olayinka and Yaramanci, 2000].

Метод отраженных электромагнитных волн отличается от классической георадиолокации рядом технологических особенностей, в том числе: способом генерации и формой зондирующего сигнала, высоким динамическим диапазоном аппаратуры, более широкой полосой рабочих частот (1–1000 МГц), особой технологией регистрации сигнала в приемном устройстве и другими особенностями аппаратуры и обработки данных [Волкомирская и др., 2019; Volkomirskaya et al., 2021]. Развитие технологии метода отраженных электромагнитных волн на базе технологии георадаров ГРОТ позволяет проводить исследования на глубину свыше 500 метров [Кильпио и Щербаков, 2022].

<https://elibrary.ru/fevykc>

Получено: 29 июля 2024 г.

Принято: 29 августа 2024 г.

Опубликовано: 19 февраля 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

В настоящей работе представлено поэтапное построение «виртуальной скважины» (распределение УЭС по глубине в точке ОГТ) на основе результатов скоростного анализа экспериментальных данных МОЭМВ-ОГТ в зоне распространения вечной мерзлоты в Мирнинском улусе, Якутия. Данные «виртуальной скважины» сопоставляются с геологическими сведениями об участке исследования.

Методика работ

Полевые работы МОЭМВ проводились на территории участка недр в 30 км от г. Мирный, Якутия 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» [Волкомирская и Гулевич, 2024]. Моноимпульсный широкополосный аппаратно-программный комплекс МОЭМВ включал передатчик повышенной мощности с пиковой амплитудой импульса 48 кВ, 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 до максимального количества $N = 50$.

Обработка и результаты

Скоростной анализ полученных данных МОЭМВ-ОГТ был произведён на основе алгоритмов обработки данных сейсморазведки в пакете типовой обработки SeisSpace/ProMAX. При обработке данных 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 рис. 1 иллюстрируется один из основных этапов обработки годографа МОЭМВ-ОГТ №7С, снятого рядом со скважиной 2751 – Боурдахская. Представлен вертикальный спектр среднеквадратической скорости электромагнитного сигнала (V_{rms}) после интерпретации и суммарная динамическая трасса.

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 является признаком неоднородности структуры толщи мерзлых пород.

На рис. 2 приводится радарограмма годографа №7С после обработки. Видно, что увеличение разноса датчиков (L) негативно влияет на качество записи волнового поля сигнала. Это связано с рядом причин: влиянием параметра синхронизации приемника и передатчика, который необходимо регулировать при беспроводной синхронизации по мере увеличения разноса блоков, постепенной потерей отраженного сигнала за пределами критического угла, влиянием рельефа и неоднородностью электрофизических свойств в приповерхностном слое. Кроме того, при больших разносах блоков ухудшается соотношение сигнал/шум во всем интервале глубин. Применяемое накопление результатов серии последовательных регистраций на каждом шаге измерений улучшает обнаружение отражающих границ и увеличивает глубину зондирования МОЭМВ-ОГТ.

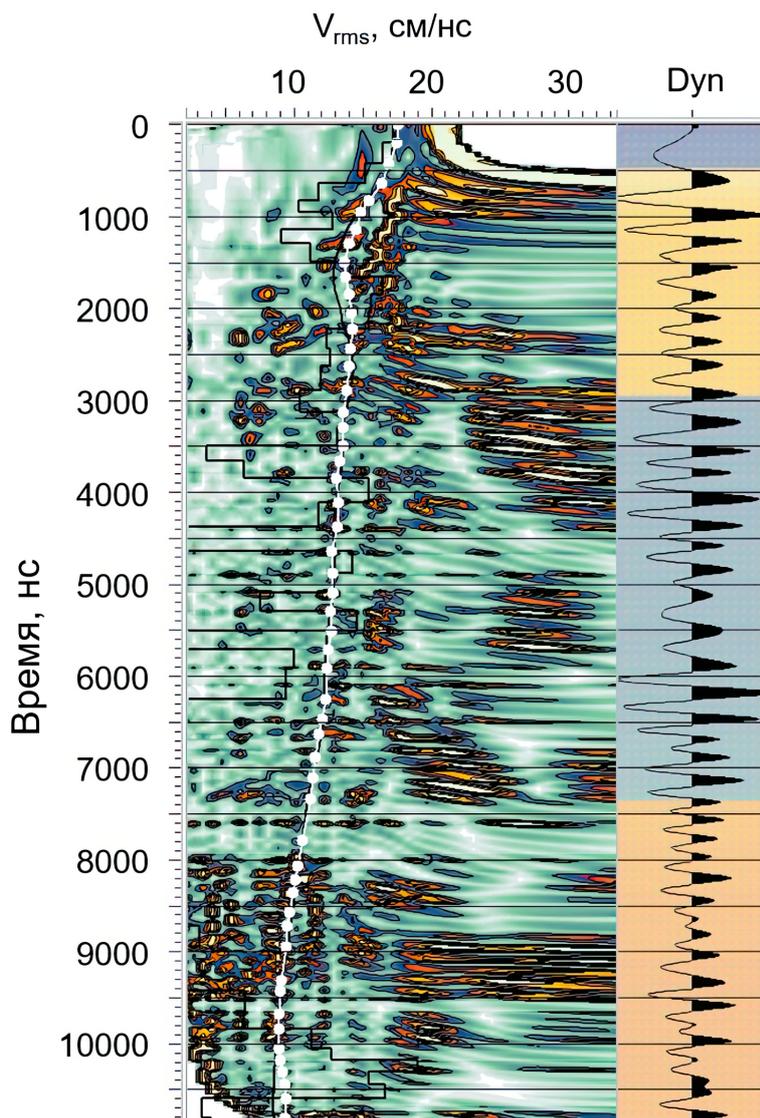


Рис. 1. Результаты скоростного анализа: спектр скорости V_{rms} и суммарная динамическая трасса.

В данном случае, качество записи приемлемо вплоть до расстояния между блоками в 520 м, что вполне достаточно для дальнейшего анализа.

Для построения геофизической модели разреза и сопоставления результатов скоростного анализа с данными других методов удобнее перейти к интервальным скоростям электромагнитного 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 рис. 3 приведено распределение эффективных интервальных электромагнитных скоростей по данным годографа №7С. Интервальные скорости здесь рассчитаны с шагом (интервалом) 50 нс. Этот шаг задаёт погрешность определения электрофизических параметров и разрешения пластов с разными электрофизическими параметрами.

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

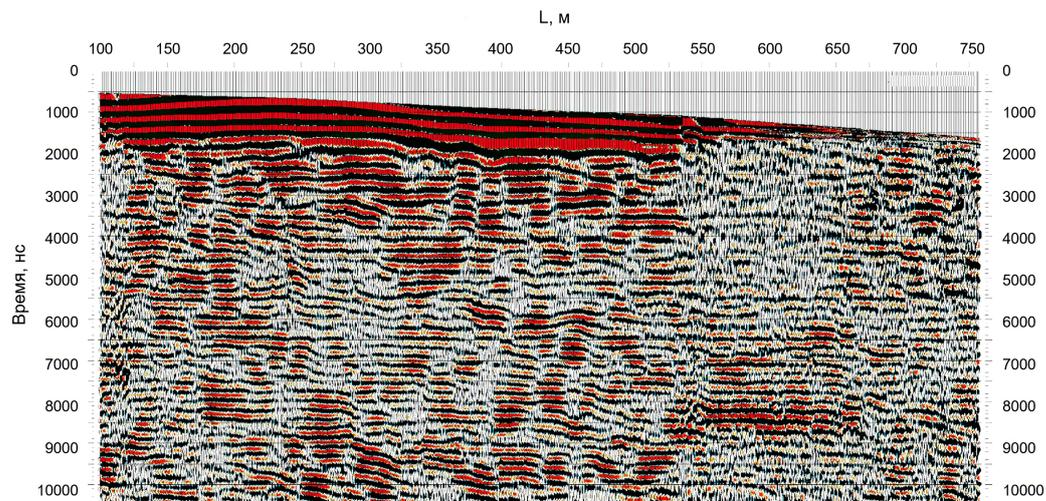


Рис. 2. Радарограмма годографа №7С после обработки.

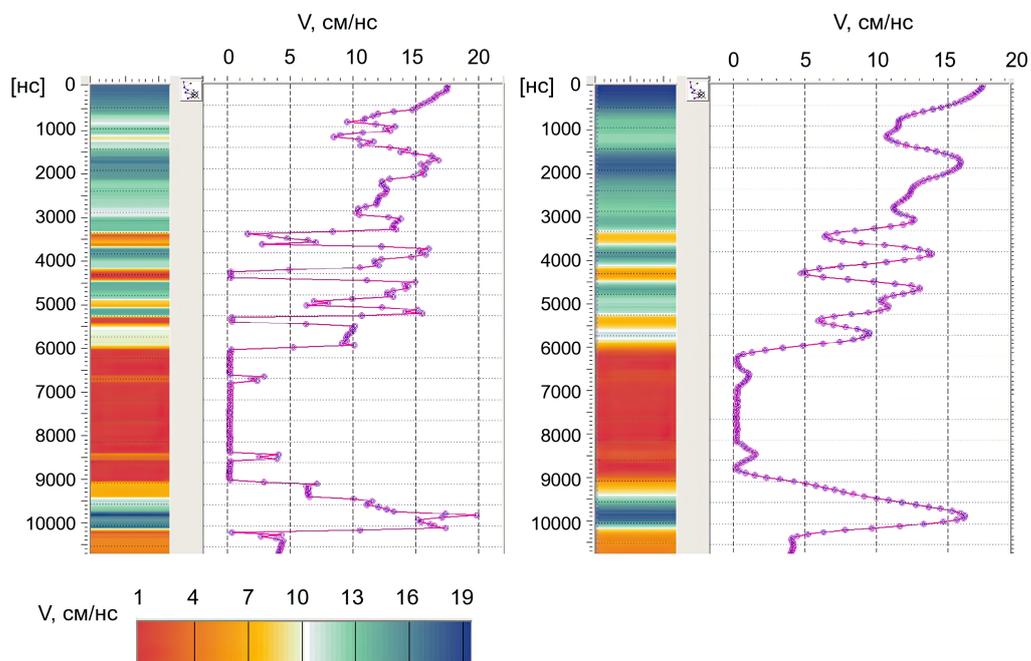


Рис. 3. Интервальные скорости сигнала до и после сглаживания.

(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.

Обсуждение результатов

Рассмотрим перспективы дальнейшего анализа полученного распределения интервальных скоростей электромагнитного сигнала для оценки свойств горных пород. Для этого воспользуемся математической постановкой задачи распространения сигнала в среде, которая описывается системой уравнений Максвелла, дополненной матери-

альными уравнениями и законом Ома. Для однородной, линейной среды без учета дисперсии имеем:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= 0, & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E}, & \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}, & \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}, \end{aligned}$$

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, μ и ε – абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемость среды, σ – электропроводность среды, t – время. После применения оператора ротор к закону Фарадея:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= \operatorname{rot} \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right), \text{ учитывая, что} \\ \operatorname{rot} \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) &= -\frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \mathbf{B}). \text{ Из материального уравнения:} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \mathbf{B}) &= \mu \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \mathbf{H}). \end{aligned}$$

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 Δ – оператор Лапласа. Уравнение (1) называют телеграфным по аналогии с уравнениями, применяемыми в теории передачи электромагнитных сигналов в волноводе [Альпин и др., 1985]. 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 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}$, где \mathbf{E}_0 – амплитуда колебаний, ω – 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 (2):

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

В этом случае получают выражение для фазовой постоянной β (3), которая характеризует фазовую скорость электромагнитной волны v_p (4) [Альпин и др., 1985]:

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

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

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 электромагнитной волны, традиционно применяемое в георадиолокации:

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

где c – скорость света в вакууме, ε – 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.

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 электромагнитного поля, ρ – 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 электромагнитного 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 $\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ Ф/м, условие квазистационарности можно переписать в параметре УЭС в виде $\rho \ll 1/\varepsilon\omega \approx 1500$ Ом·м, аналогично для $\varepsilon = 9$ условие квазистационарности имеет вид $\rho \ll 660$ 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 основе произведенного расчета построена геофизическая модель скважины – виртуальная скважина в палитре УЭС (рис. 4). Геологические данные приведены по данным ближайшей буровой 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.

Согласно полученным данным (рис. 3, 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 (~ 900 Ом·м) переходит в зону (б) с пониженным УЭС (200–500 Ом·м), в слое (с) УЭС возрастает до 940 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 Ом·м) находятся в пределах диапазона значений удельных электрических сопротивлений мерзлых пород, известных по большому количеству источников. Появление прослоя (б) с пониженными УЭС горных пород может быть приурочено к участку растепления/расслаивания мерзлоты, в слое (б) возможно также наличие межмерзлотных вод (УЭС подземных вод в областях развития многолетнемерзлых горных пород варьируется в пределах 40–300 Ом·м [Электроразведка..., 2005]).

Метегерская свита (mt) находится ниже границы мерзлых пород и представлена несколькими слоями с УЭС, изменяющимся в широком диапазоне от 3 до 400 Ом·м,

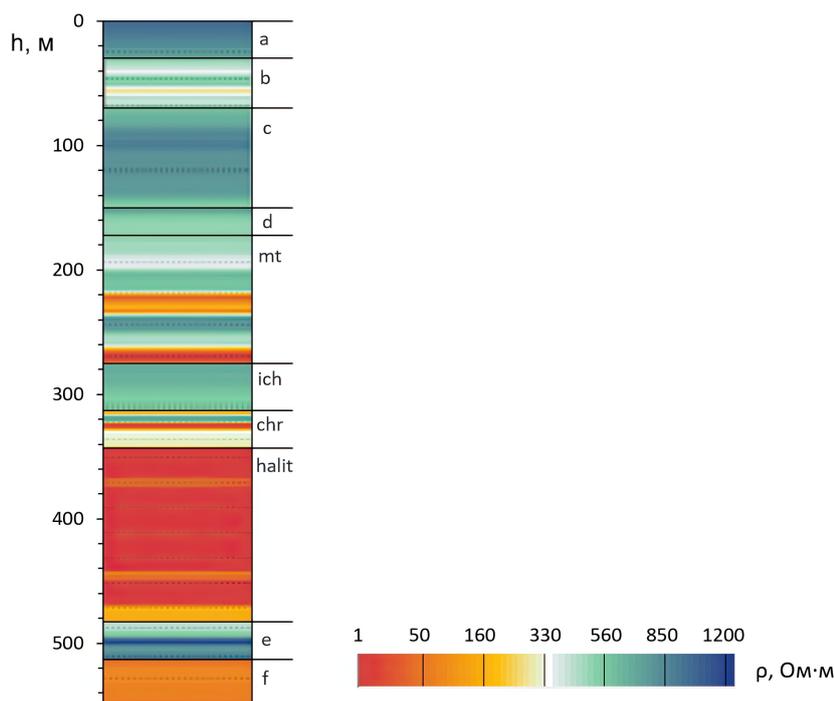


Рис. 4. Виртуальная скважина по параметру УЭС.

что может быть обусловлено напластованием осадочных горных пород с различными свойствами. Ичерская свита (ich) представлена породами с относительно повышенным средним УЭС (~ 600 Ом·м).

Отложения Чарской свиты (chr) на всём интервале её распространения (развития) в целом характеризуются повышенными значениями данных методов геофизического исследования скважин (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 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 скважины 2751 – Боурдахская в пределах вышеназванного интервала зарегистрированы повышенные (по сравнению с вмещающими породами) значения УЭС по данным бокового микрокаротажа и бокового каротажа (БК).

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, интервал глубин 340–500 м «виртуальной скважины» с минимальными значениями УЭС соответствует породам Чарской свиты (каменная соль, доломиты, известняки), насыщенным водой.

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.

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.

Выводы

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

Разработан алгоритм оценки УЭС горных пород на основе скоростного анализа данных МОЭМВ-ОГТ.

Полученная геофизическая модель разреза в точке ОГТ по параметру УЭС («виртуальная скважина») соответствует имеющейся априорной информации о разрезе, данным бурения и ГИС.

Для проведения скоростного анализа в электромагнитных зондированиях необходимо применение специальной аппаратуры, позволяющей производить высокоскоростную линейную регистрацию волновых форм отраженных электромагнитных сигналов с необходимой длительностью записи волновой картины.

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

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН при финансировании и организационной поддержке ООО «Таймер».

Список литературы

- Альпин Л. М., Даев Д. С., Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. — Москва : Недра, 1985. — 407 с.
- Волкомирская Л. Б., Гулевич О. А. Способ глубинной георадиолокации и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №RU2816128C1 от 26.03.2024 г. — Москва : ООО «Таймер», 2024.
- Волкомирская Л. Б., Гулевич О. А., Ляхов Г. А. и др. Георадиолокация больших глубин // Журнал радиоэлектроники. — 2019. — Т. 2019, № 4. — DOI: [10.30898/1684-1719.2019.4.6](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.6).
- Кильпио Е. Ю., Щербаков И. А. О научных результатах в области физических наук, полученных в 2020–2021 гг. // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. — 2022. — Т. 506, № 2. — С. 3–33. — DOI: [10.31857/S2686740022070069](https://doi.org/10.31857/S2686740022070069).
- Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. В. К. Хмелевского, И. Н. Модина, А. Г. Яковлева. — М. : ГЕРС, 2005. — 311 с.
- Christensen N. B. Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations // Geophysical Prospecting. — 2000. — Vol. 48, no. 1. — P. 1–19. — DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00174.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00174.x).
- Doyoro Y. G., Chang P.-Y., Puntu J. M., et al. A review of open software resources in python for electrical resistivity modelling // Geoscience Letters. — 2022. — Vol. 9, no. 1. — DOI: [10.1186/s40562-022-00214-1](https://doi.org/10.1186/s40562-022-00214-1).
- Gautier M., Gautier S., Cattin R. PyMERRY: A Python solution for an improved interpretation of electrical resistivity tomography images // GEOPHYSICS. — 2023. — Vol. 89, no. 1. — F23–F39. — DOI: [10.1190/geo2023-0105.1](https://doi.org/10.1190/geo2023-0105.1).
- Hou D., Wang X., Zou J. Inversion of soil resistivity by using CSAMT method // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). — IEEE, 2020. — P. 1–4. — DOI: [10.1109/ICHVE49031.2020.9279948](https://doi.org/10.1109/ICHVE49031.2020.9279948).
- Olayinka A. I., Yaramanci U. Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data // Geophysical Prospecting. — 2000. — Vol. 48, no. 2. — P. 293–316. — DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00173.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00173.x).
- Volkomirskaya L. B., Gulevich O. A., Reznikov A. E., et al. Impact of Signal Registration Technology on GPR Data // Engineering and Mining Geophysics 2021. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. — P. 1–9. — DOI: [10.3997/2214-4609.202152005](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152005).

ASSESSMENT OF ELECTRICAL PROPERTIES OF ROCKS BASED ON VELOCITY ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC CDP DATA

O. A. Gulevich^{**1,2}, L. B. Volkomirskaya¹, and E. P. Kaygorodov³

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Russia

²Timer LLC, Moscow, Russia

³Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia

****Correspondence to:** Oxana Gulevich, o.a.gulevich@gmail.com

An algorithm for estimating the specific electrical resistance of rocks has been developed based on the velocity analysis of data obtained using the method of reflected electromagnetic waves with various offset distance between the receiver and transmitter – electromagnetic CDP (ECDP). Assessment of the interval electrical resistivity at a point (“virtual well”) based on ECDP data, in contrast to the algorithms of electrical exploration methods, does not require a priori information; measurement data are sufficient. An example of a virtual well 500 meters deep is given, describing the dependence of electrical resistance on depth, obtained during an experimental study in the cryolithozone.

Keywords: Electromagnetic CDP, deep GPR, electrical resistivity, virtual well.

Citation: Gulevich, O. A., L. B. Volkomirskaya, and E. P. Kaygorodov (2025), Assessment of Electrical Properties of Rocks Based on Velocity Analysis of Electromagnetic CDP Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES1003, <https://doi.org/10.2205/2025ES000933>, EDN: FEVYKC

Received: 29 July 2024

Accepted: 29 August 2024

Published: 19 January 2025



© 2025. The Authors.

References

- Alpin L. M., Daev D. S., Karinsky A. D. Theory of fields applied in exploration geophysics. — Moscow : Nedra, 1985. — 407 p. — (In Russian).
- Christensen N. B. Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations // *Geophysical Prospecting*. — 2000. — Vol. 48, no. 1. — P. 1–19. — DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00174.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00174.x).
- Doyoro Y. G., Chang P.-Y., Puntu J. M., et al. A review of open software resources in python for electrical resistivity modelling // *Geoscience Letters*. — 2022. — Vol. 9, no. 1. — P. 3. — DOI: [10.1186/s40562-022-00214-1](https://doi.org/10.1186/s40562-022-00214-1).
- Electrical Methods: a Guide for Electric Survey Practice for Students majoring in Geophysics / ed. by V. K. Khmelevsky, I. N. Modin, A. G. Yakovlev. — Moscow : GERS, 2005. — 311 p. — (In Russian).
- Gautier M., Gautier S., Cattin R. PyMERRY: A Python solution for an improved interpretation of electrical resistivity tomography images // *GEOPHYSICS*. — 2023. — Vol. 89, no. 1. — F23–F39. — DOI: [10.1190/geo2023-0105.1](https://doi.org/10.1190/geo2023-0105.1).
- Hou D., Wang X., Zou J. Inversion of soil resistivity by using CSAMT method // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). — IEEE, 2020. — P. 1–4. — DOI: [10.1109/ICHVE49031.2020.9279948](https://doi.org/10.1109/ICHVE49031.2020.9279948).
- Kilpio E. Yu., Shcherbakov I. A. On the results in physics obtained in 2020–2021 // *Doklady Rossijskoj Akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*. — 2022. — Vol. 506, no. 2. — P. 3–33. — DOI: [10.31857/S2686740022070069](https://doi.org/10.31857/S2686740022070069). — (In Russian).
- Olayinka A. I., Yaramanci U. Assessment of the reliability of 2D inversion of apparent resistivity data // *Geophysical Prospecting*. — 2000. — Vol. 48, no. 2. — P. 293–316. — DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00173.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00173.x).
- Volkomirskaya L. B., Gulevich O. A. Method for deep georadar and device for implementation thereof. Russian patent published in 2024 №RU2816128C1. — Moscow : LLC “Taymer”, 2024. — (In Russian).
- Volkomirskaya L. B., Gulevich O. A., Lyakhov G. A., et al. Deep georadiolocation // *Journal of Radio Electronics*. — 2019. — Vol. 2019, no. 4. — DOI: [10.30898/1684-1719.2019.4.6](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.6). — (In Russian).
- Volkomirskaya L. B., Gulevich O. A., Reznikov A. E., et al. Impact of Signal Registration Technology on GPR Data // *Engineering and Mining Geophysics 2021*. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. — P. 1–9. — DOI: [10.3997/2214-4609.202152005](https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152005).