

УДК 519.63

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОЙ СИСТЕМЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Третьякова Е.А., аспирант,
e-mail: ekaterina_tretikova@mail.ru

Хлюстов Д.К., аспирант,
e-mail: hlustov.d@gmail.com

*Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН,
Россия, Москва*

Аннотация. Данная статья посвящена сопоставлению результатов инверсии данных трех конфигураций бортовых электромагнитных систем (АЭМ). Установка ЕМ4Н работает на четырех частотах и имеет в вертолетном варианте буксируемую петлю источника, а в самолетном она закреплена на фюзеляже. Система ЭКВАТОР является буксируемой вертолетной и собирает данные как во временной, так и в частотной области. Результаты обработки данных, полученных при помощи перечисленных конфигураций, рассматриваются и сравниваются на одном профиле в Норильском регионе, снятом Норильским филиалом Института им. А.П. Карпинского в различное время с 2012 по 2023 гг.

Ключевые слова: инверсия данных аэроэлектроразведки, частотная область, временная область

THE IMPACT OF AEM SYSTEM CONFIGURATION ON INVERSION RESULTS

Tretiakova E.A., graduate student
Khliustov D.K., graduate student

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy
of Sciences, Russia, Moscow

Abstract. This paper is devoted to comparison of three system configuration. Namely, EM4N has four frequencies and can be either towed by a helicopter or a fixed wing aircraft, and EQUATOR collects data both in time- and in frequency domain and can only be towed by a helicopter. All three configurations have been tested on one profile, and the comparison of inversion results is given.

Keywords: AEM data inversion, frequency domain, time domain

Введение

Аэроэлектроразведка – метод геофизической съемки, используемый для разведки полезных ископаемых в различных условиях (Telford et al., 1990). Возможные подходы к этой задаче разнятся как в конструкции передатчика и приемника, так и в подборе летательного аппарата. Существует несколько конфигураций бортовых электромагнитных систем (Мойланен, 2022; Legault, 2015). Некоторые из них имеют фиксированные катушки передатчика и приемника, однако в этой конфигурации на приемную катушку сильно влияет первичное поле. Другие системы буксируются, при

этом передатчик и приемник прикреплены к кабелю, либо передатчик закреплен на летательном аппарате. Речь идет, в частности, о системе ЭКВАТОР и различных модификациях системы ЕМ4Н.

Установка ЕМ4Н (Волковицкий и др., 2009) с зафиксированными петлями передатчика на самолете или вертолете, представляет собой систему для определения удельной электропроводности на исследуемых площадях, подходящую для разведки полезных ископаемых, оценки ресурсов подземных вод, геологического картирования, детального изучения потенциальных месторождений полезных ископаемых (рис. 1).

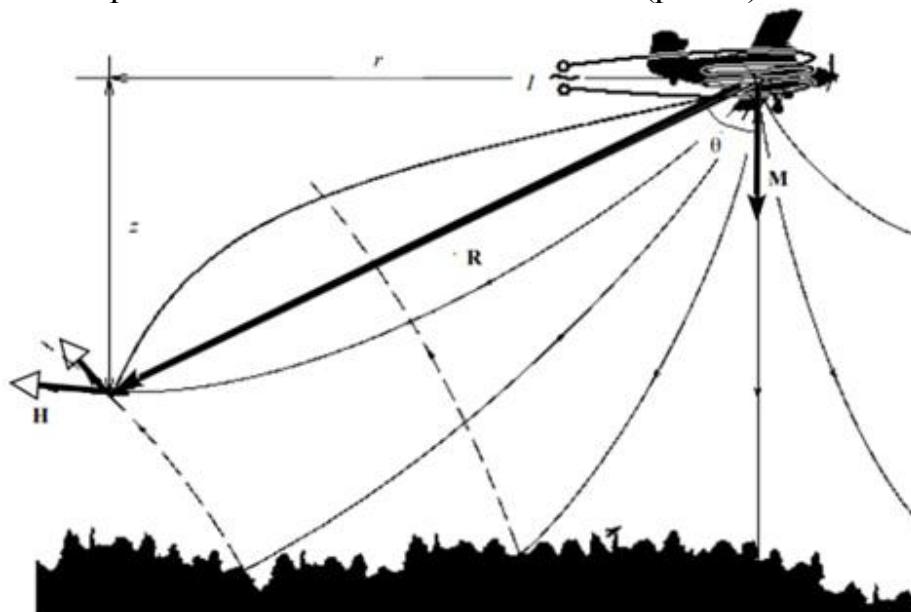


Рисунок 1 – Аэроэлектроразведка ЕМ4Н: R - радиус-вектор передатчик-приемник; M - вектор магнитного момента диполя; H - вектор поля

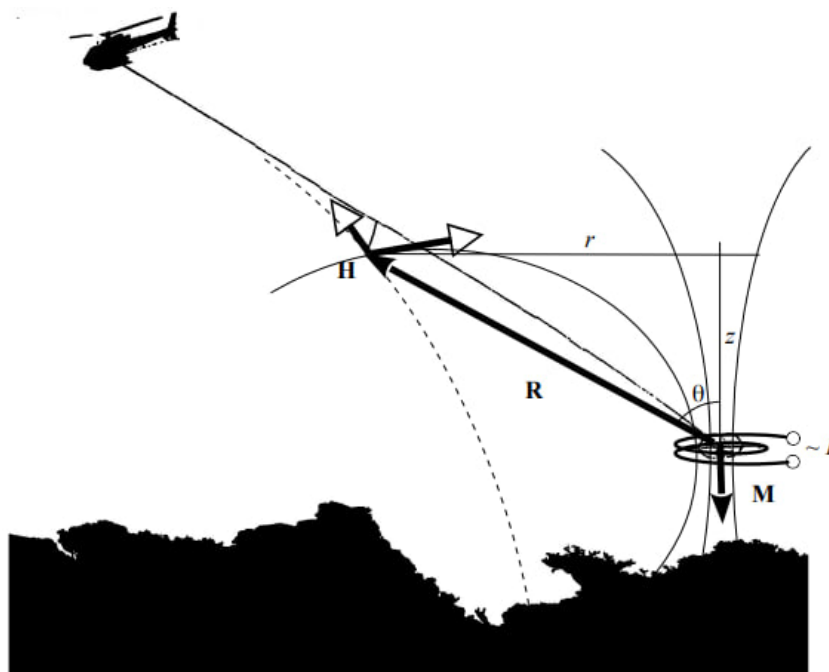


Рисунок 2 – Аэроэлектроразведка ЭКВАТОР

ЭКВАТОР (Волковицкий и др., 2010) представляет собой систему, буксируемую за вертолетом на тросе. Петли передатчика расположены на расстоянии 70 м от вертолета, а приемник крепится посередине кабеля (рис. 2).

Кроме того, немалое значение имеет выбор летательного аппарата для проведения съемок. Самолеты более экономичны, но им приходится летать на большей высоте, что приводит к более низкому пространственному разрешению измерений из-за большей возбуждаемой площади. Вертолет лучше подходит для съемки местности со сложным рельефом, но требует больше топлива и времени. Некоторые системы выполняют измерения только во временной области, другие концентрируются на частотной области, и только ЭКВАТОР может выполнять и то, и другое одновременно. У каждого типа измерений есть свои преимущества (Hodges, 2013), и, вероятно, лучшим подходом было бы анализировать их в комбинированном режиме, как показано в статье Karshakov, Moilanen, 2018.

Данная статья посвящена сравнению результатов обработки данных, полученных тремя конфигурациями систем: четырехчастотная самолетная система ЕМ4Н (рис. 1); буксируемая модификация той же четырехчастотной системы в той же геометрии, что и система ЭКВАТОР (рис. 2); буксируемая система ЭКВАТОР (рис. 2), производящая измерения в обеих областях, для которой произведена временная, частотная и комбинированная инверсия данных. Все три конфигурации прошли испытания в Норильском филиале Института им. А.П. Карпинского по одному профилю, расположенному в Норильском районе.

Формулировка модели

Данные, используемые для инверсии, содержат действительную (синфазную) и мнимую (квадратурную) части вертикальной компоненты вторичного магнитного поля в частотной области и усредненные в нескольких временных интервалах значения переходного процесса во временной области. Вектор измерений частотной области имеет вид $(\text{Im}\omega_1, \dots, \text{Im}\omega_n, \text{Re}\omega_2 - \text{Re}\omega_3, \dots, \text{Re}\omega_n - \text{Re}\omega_{n-1})$, где $\text{Im}\omega_i$ и $\text{Re}\omega_i$ обозначают квадратурную и синфазную составляющие отклика для частоты ω_i . Соответствующие частоты для системы ЕМ4Н - 130, 521, 2083 и 8333 Гц как в варианте с самолетом, так и в вертолетном варианте, а также диапазон из 25 частот от 77 до 15 046 Гц для системы EQUATOR. Измерения во временной области состоят из значений производной магнитного поля dB/dt , усредненных по фиксированным временным интервалам. Таким образом, вектор измерения равен $(a_1(dB/dt), \dots, a_m(dB/dt))$. Для системы ЭКВАТОР имеется 14 временных интервалов в диапазоне от 5 до 4420 мкс. Для оценки параметров среды используется горизонтально-слоистая модель (Жданов, 1986). Модель состояла из 25 слоев с фиксированной тол-

щиной, заданной $d_i = 4 \cdot 1.1085^{i-1}$. Таким образом, вектор оцениваемых параметров $(\rho_1, \dots, \rho_{25})$.

Подходом к решению обратной задачи, то есть оценки параметров по измерениям, был итерационный расширенный фильтр Калмана (Каршаков, 2018). Этот быстрый и эффективный алгоритм обеспечивает оценку параметров, начиная с заданных начальных условий. В работе для этой цели использовалось однородное полупространство, а удельное сопротивление оценивалось по тому же алгоритму на основе данных для самых низких частот.

Результаты инверсии

Ниже показаны результаты инверсии данных, полученных по одному профилю в Норильском регионе (рис. 3).

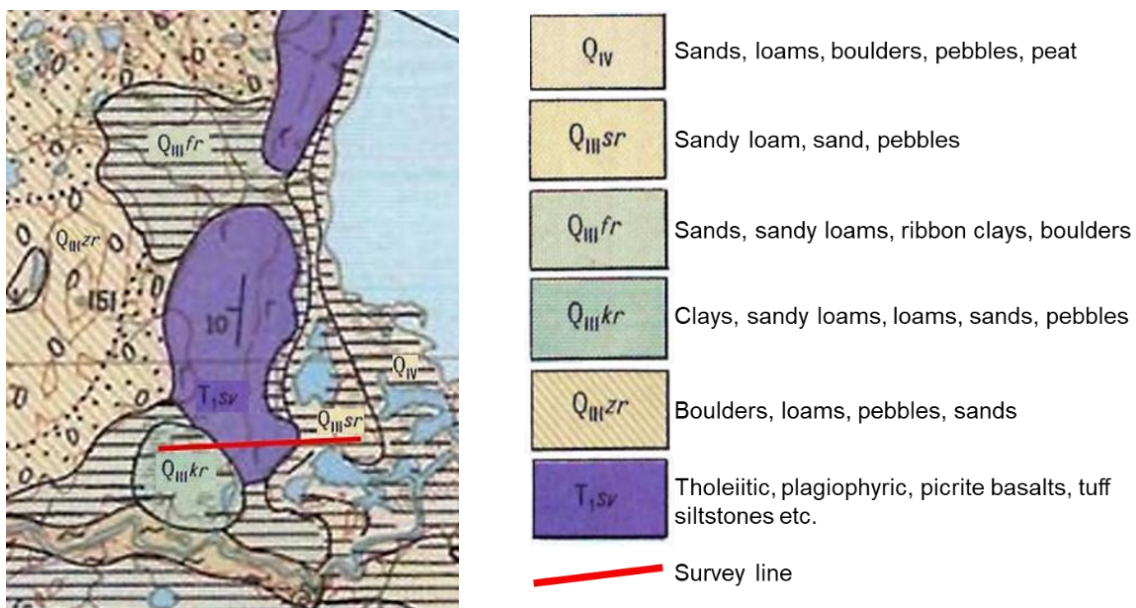


Рисунок 3 – Геологическая карта исследуемого региона и линия съемки (с востока на запад)

На рисунке 4 показаны результаты комбинированной инверсии данных частотной и временной области для системы ЭКВАТОР. На верхнем графике изображена аномалия магнитного поля, выраженная в нТл. На следующем графике показаны невязки, рассчитанные по формуле

$$\left(\sum \omega_i \frac{(response_{estimated}(\omega_i) - response_{true}(\omega_i))^2}{\sigma_{noise}^2(\omega_i)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Последняя часть рисунка содержит фактические данные инверсии. Видно, что магнитная аномалия коррелирует с относительно высокоомным телом на глубине 150 – 200 м.

Полученные структуры, представленные на рисунке, соответствуют структурам, выявленным на геологическом профиле скважины в нескольких километрах севернее (рис. 5). Разрезы на рис. 4 и 5 имеют разную длину по горизонтали, но одинаковый коэффициент по вертикали, равный 2.

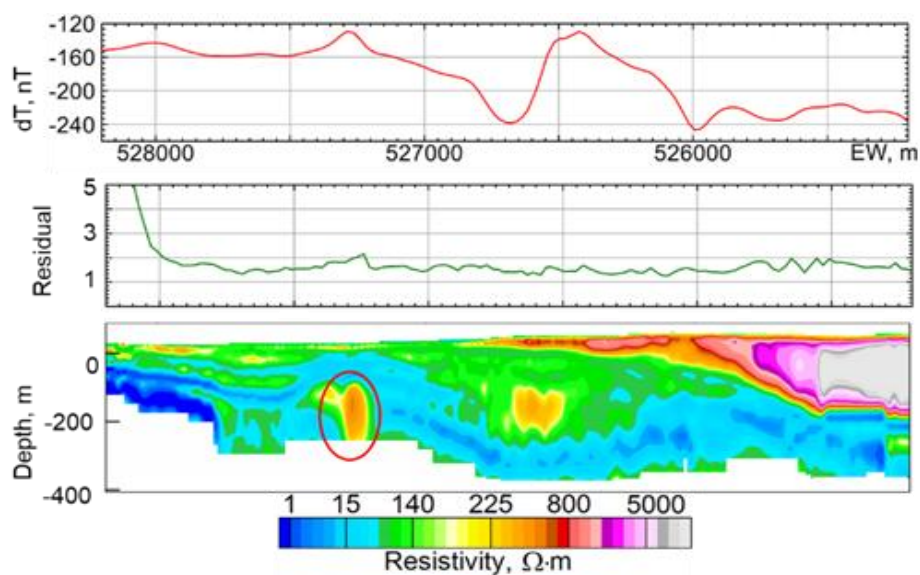


Рисунок 4 – Аномальное магнитное поле и результаты комбинированной (FD&TD) инверсии сопротивлений (Ом·м)

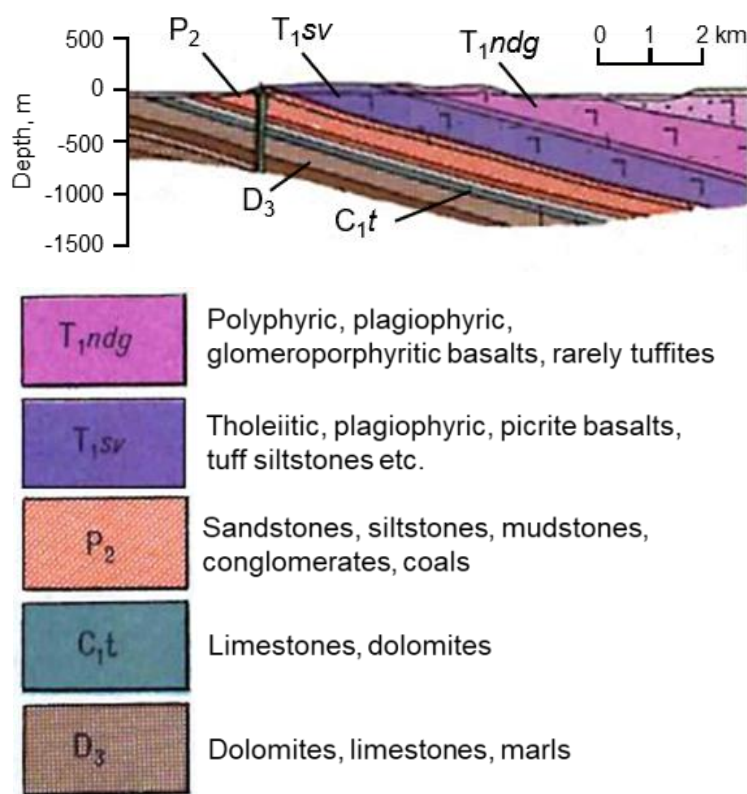


Рисунок 5 – Геологический профиль скважины на соседней территории

Рис. 6 – 9 представляют различные варианты инверсии, где сверху показаны отклики, в середине — невязки полученной инверсии, а внизу — разрез сопротивлений. Рисунок 10 содержит легенды ко всем кривым и разрезам.

Верхняя часть рис. 6 содержит вторичное поле (dB_z/dt). В средней части отображаются невязки для инверсии данных во временной области.

те же геологические структуры, но верхняя часть разреза содержит меньше деталей.

На рис. 7 представлены результаты инверсии данных в частотной области. Разрешение нижней части профиля ниже, чем во временной области, а детализация верхней части выше.

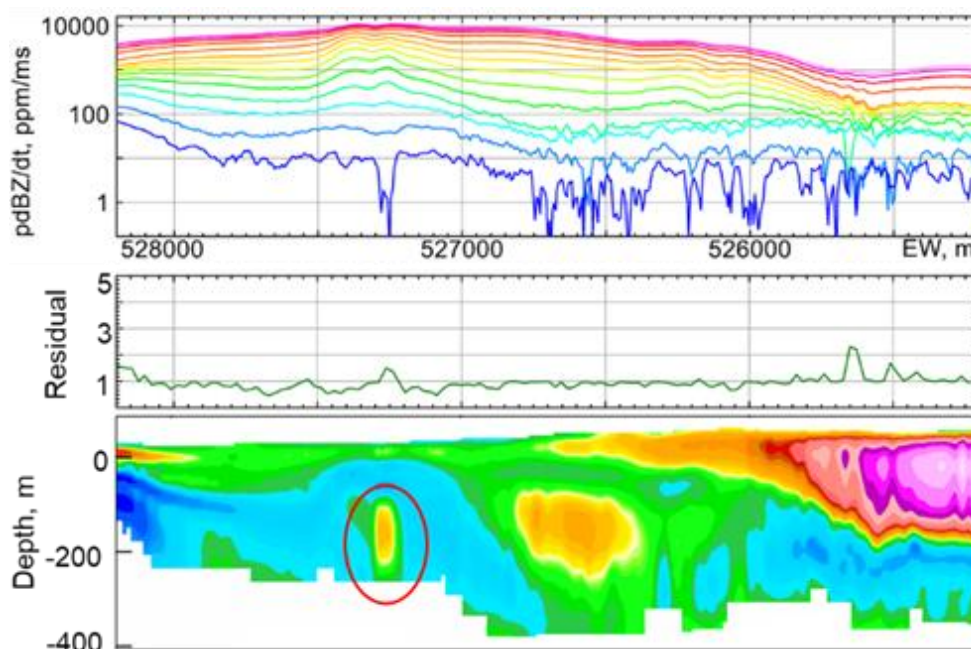


Рисунок 6 - Результат инверсии данных во временной области

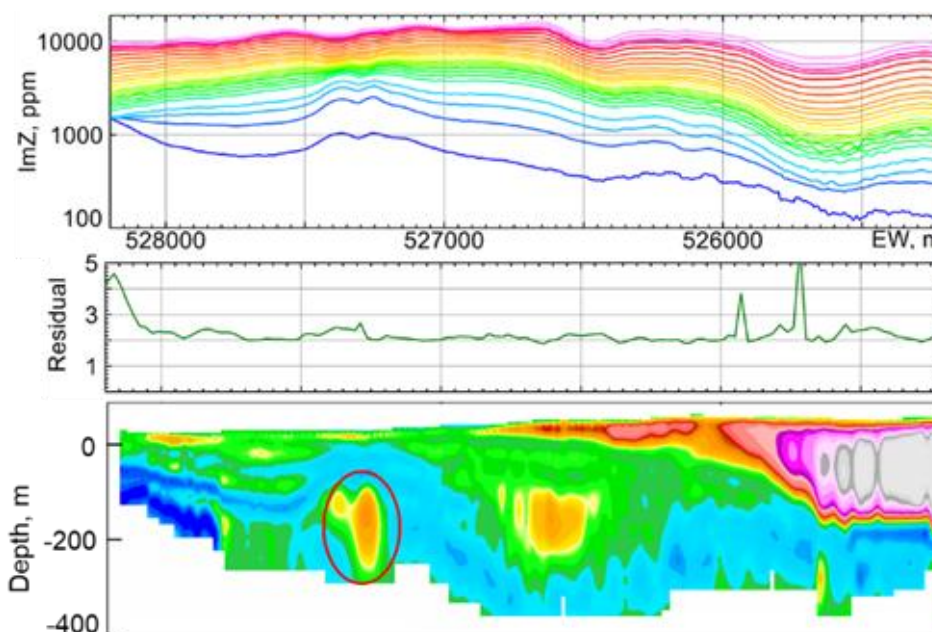


Рисунок 7 – Результат инверсии данных в частотной области

На рис. 8 показаны результаты инверсии для самолетной конфигурации системы ЕМ4Н, справа показаны частоты в Гц. Резистивное тело, изображенное на рис. 4, не видно. Глубокие части профиля практически полностью скрыты, а общее разрешение значительно ниже. Верхняя часть ме-

нее детализирована. Глубина исследования ниже из-за более высокой базовой частоты – 130 Гц, в то время как у ЭКВАТОРа она 77 Гц.

Наконец, на рис. 9 показаны результаты инверсии, полученные для вертолетной конфигурации ЕМ4Н. Пространственное разрешение сравнимо с разрешением ЭКВАТОРа, видно даже очерченное резистивное тело. Но глубина исследования ниже из-за более высокой базовой частоты.

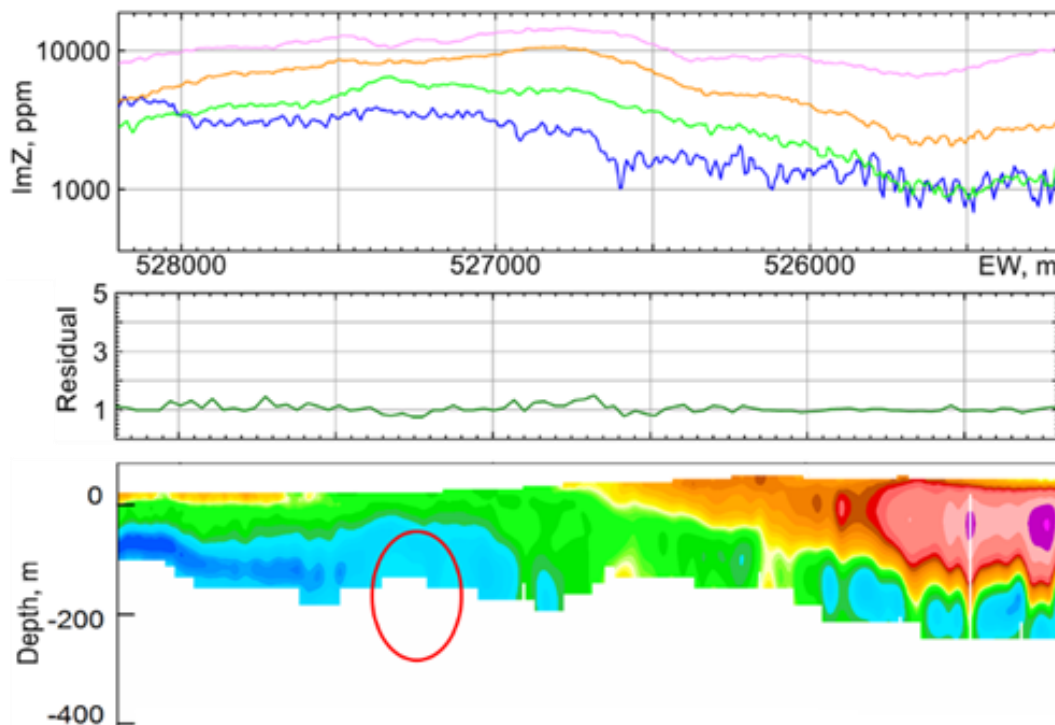


Рисунок 8 – Результаты инверсии самолетной системы ЕМ4Н

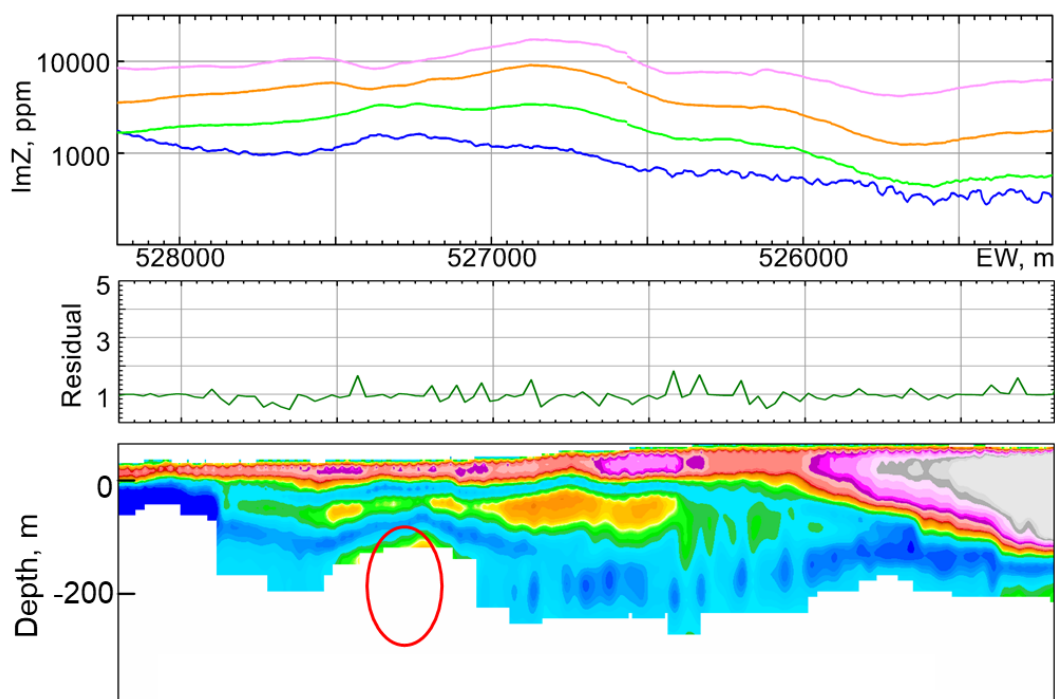


Рисунок 9 – Результаты инверсии вертолета ЕМ4Н

Также можно увидеть резкие резистивные контрасты между верхними слоями – тонкий проводящий слой поверх сильного изолятора. Вероятно, это можно объяснить эффектом наведенной поляризации, причиной которой является таяние льда. Опытный геофизик может увидеть это в правой части откликов во временной области (рис. 6). Это приводит к появлению более высоких сопротивлений в соответствующей части разреза.

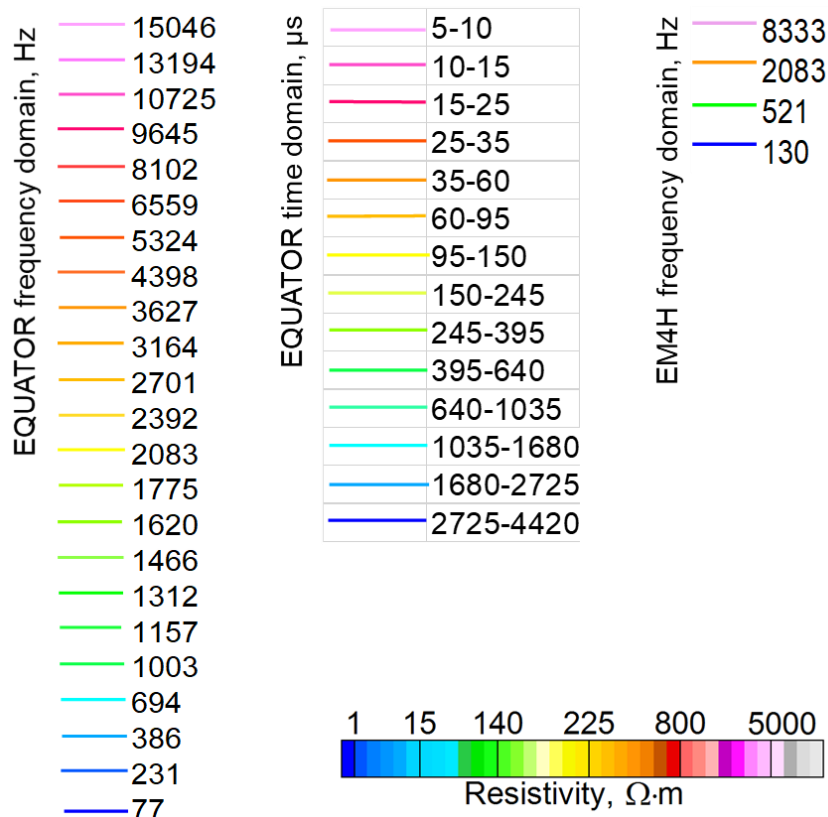


Рисунок 10 – Легенда сигналов и удельных сопротивлений

Вертолетная система EM4H совершила полет в октябре 2023, при отрицательных температурах, система ЭКВАТОР – в сентябре 2015, а самолетная система EM4H – в августе 2012, обе при положительных температурах. Можно предположить, что в разное время года разная степень протайки.

Выводы

В данной работе мы представили результаты инверсии электромагнитных данных для нескольких конфигураций системы АЭМ. Было продемонстрировано, что:

- самое высокое пространственное разрешение и наибольшая глубина исследования соответствуют инверсии в комбинированном режиме;
- инверсия только во временной области обеспечила детализацию более глубокой части профиля, тогда как инверсия в частотной области оказалась лучше для приповерхностных исследований;

– результаты для самолетной системы ЕМ4Н хорошо соответствуют геологическому строению профиля, но имеют низкую детализацию;

– результаты инверсии для вертолетной системы ЕМ4Н показывают сильный контраст между сопротивлениями соседних слоев. Это может быть связано с тем, что территория расположена в районе вечной мерзлоты, а сезонные различия в сборе данных привели к разному состоянию в верхней части разреза, что исказило результаты измерений.

Данные показали небольшое присутствие наведенной поляризации, которая более заметна на данных EQUATOR из-за детального частотного спектра.

Требуется дальнейшее исследование причин количественных отличий в оценке сопротивлений верхней части разреза, полученных сопротивлений для буксируемого варианта системы ЕМ4Н.

Список источников

1. Волковицкий, А.К. Новая вертолетная электроразведочная система ЭКВАТОР для метода АМПП / А.К. Волковицкий, Е.В. Каршаков, Е.В. Мойланен // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 02(32). – С.27-29.
2. Волковицкий, А.К. Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система ЕМ-4Н / А.К.Волковицкий, Е.В. Каршаков, В.В. Попович // Записки Горного института. 2009. Т. 183. – С. 224-227.
3. Жданов, М.С. Электроразведка: учебник для вузов / М.С. Жданов. – М.: Недра, 1986. – 316 с.
4. Каршаков, Е.В. Применение фильтра Калмана для решения обратных задач в аэроэлектроразведке / Е.В. Каршаков // EAGE Инженерная и рудная геофизика, 2018.
5. Мойланен, Е.В. Современные методы аэроэлектроразведки/ Е.В. Мойланен // Физика Земли. 2022. № 5. – С. 171-180.
6. Hodges, G., 2013, The power of frequency domain: When you should be using it: Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference & Exhibition, 5 pp.
7. Karshakov, E., Moilanen, E., 2018. Combined interpretation of time domain and frequency domain data. Proceedings of 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics, 2018.
8. Legault, J.M., 2015. Airborne Electromagnetic Systems - State of the Art and Future Directions. CSEG Recorder 40, no. 6: 38-49.
9. Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., 1990. Applied geophysics. Cambridge university press.