

Фундаментальные недостатки аэроэлектромагнитных систем с двойным моментом (dual-moment), на примере SkyTEM

Введение:

На примере аэроэлектромагнитной системы SkyTEM продемонстрировано, что данные, получаемые системами с так называемым «двойным моментом» (dual moment) имеют существенные недостатки. Работу электромагнитной системы с «двойным моментом» можно представить, как последовательную работу двух независимых систем, одна из которых с низким питающим током, другая с высоким, и которые включаются и выключаются последовательно – когда одна система включена, другая выключена, и наоборот. Принцип последовательного включения-выключения двух систем приводит к серьезным недостаткам получаемых данных – периодическое отсутствие измеренных данных, низкое пространственное разрешение, наличие «слепых зон» в кривых спада интенсивности вторичного поля, что ведет к неполноте получаемых характеристик геоэлектрического разреза. Приведены примеры прямых сравнений данных системы «двойного момента» (SkyTEM) с системой с единым питающим импульсом (VTEM).

Двойной момент: недостатки в пространственном разрешении

В системе с двойным моментом (dual moment) используется последовательное включение и выключение питающего тока высокой интенсивности и низкой интенсивности, т.е. фактически измерения при высоком дипольном моменте системы (НМ) и при низком (ЛМ) производятся в разные, последовательные интервалы времени (рис.1).

“Типичная длительность измерений НМ равен 96 кривых спада, и для ЛМ 160 или 320. Это соответствует 1.92 сек для НМ и 0.64 или 1.28 сек для ЛМ” (Auken et al., 2009). Таким образом, при скорости полета 90 км/час, на протяжении 50 м измеряются только данные НМ (с измерениями магнитного поля), и на протяжении 16 м измеряются только данные ЛМ.

Затем эти данные объединяются (Auken et al., 2009) и, согласно техническим отчетам о съемках SkyTEM (например, SkyTEM Survey: Colorado, 2012) интерполируются в базах данных в соответствии с требуемой частотой измерений (обычно 10 Гц) при помощи B-Spline фильтра с коэффициентом сглаживания 0.55.



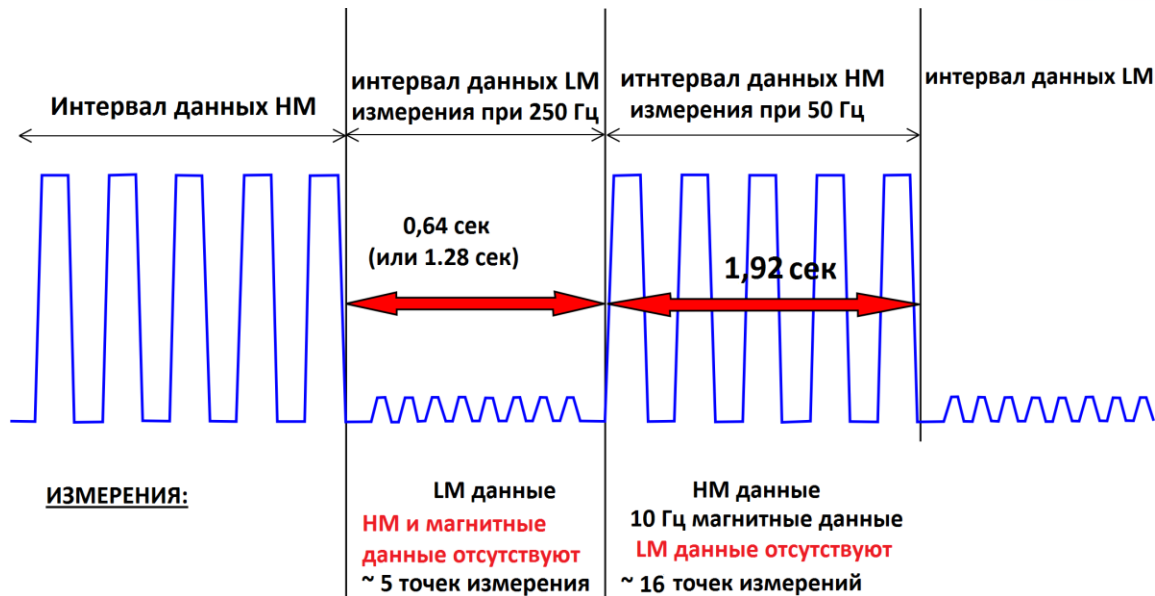


Рис.1 Схема измерений принципа dual-moment (на примере системы SkyTEM). (Auken et al., 2009)

Такой режим измерений, с интерполяцией этих измерений, вероятно приемлем только для приложений, не выходящих за рамки изучения одномерных разрезов, когда параметры разреза по латерали не меняются. То есть, правомочность применения таких систем для решения задач локализации ограниченных по размерам аномалиеобразующих объектов, как предлагается в (Sorensen, et al., 2013), вызывает сомнения.

Режим измерений непрерывно движущейся подвесной системой, которая работает в двух режимах, включающихся и выключающихся последовательно, неизбежно ведет к снижению пространственного разрешения исследований. Из Рис.2 видно относительное соотношение участков покрытых только данными низкого момента (LM) и только данными высокого момента (HM), что при скорости полета 90 км/час соответствует приблизительно 16 метров LM и 50 метров HM. То есть, фактически, 25% протяженности линий съемки не имеют ЭМ измерений, выполненных при высоком дипольном моменте (HM) и измерений магнитного поля, и на 75% протяженности профилей наблюдения не производится измерений при низком дипольном моменте (LM), то есть на ранних временах переходного процесса, отвечающих за верхнюю часть разреза. Недостающие данные заполняются B-Spline фильтрацией. На рис. 3 представлены графики теоретических данных (низкого момента LM, высокого момента HM и магнитные данные), измеряемые при таком режиме работы ЭМ системы.

Отсюда следует, что ни одна точка зондирования систем с последовательным двойным моментом не имеет полного цикла фактических измерений переходного процесса от ранних до поздних времен.



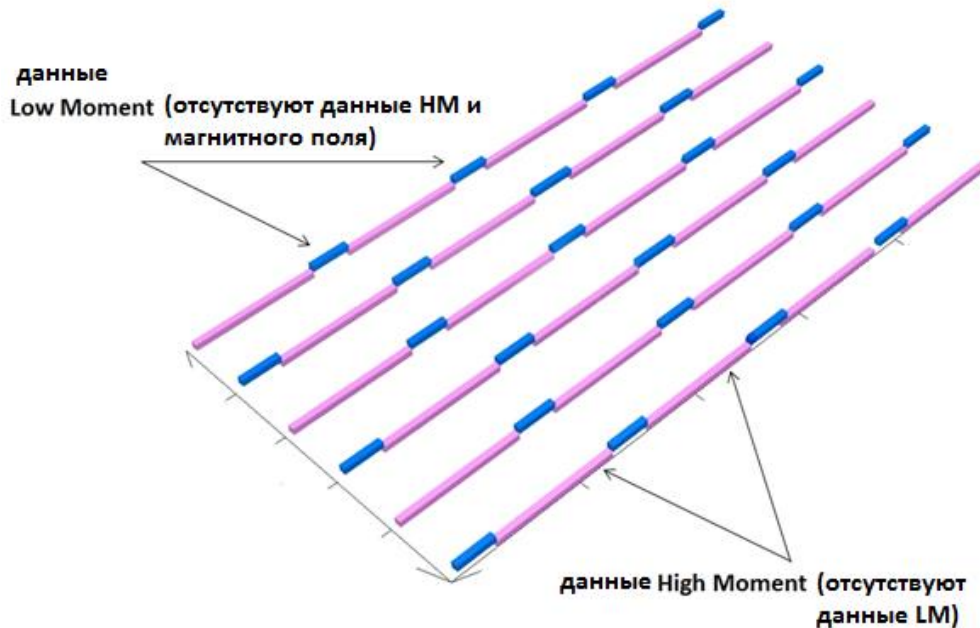


Рис.2 Распределение разнородных измеренных данных системы с двойным моментом (для системы SkyTEM) по линиям наблюдений.

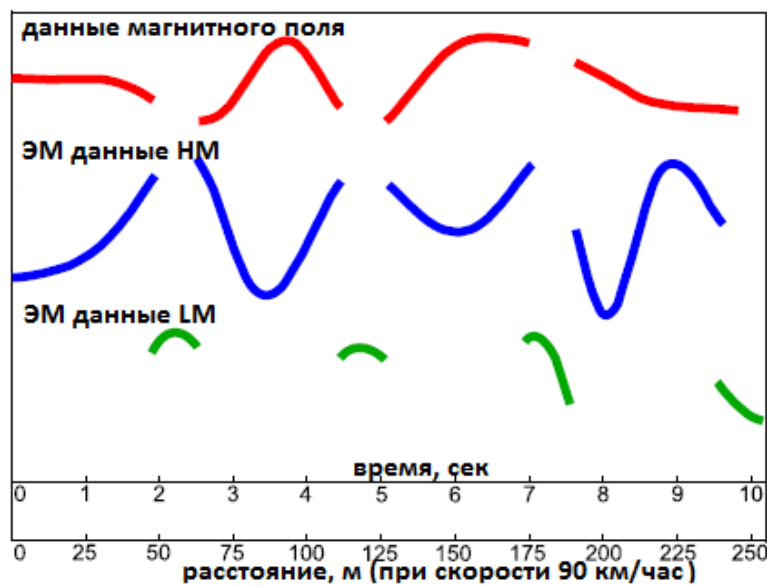


Рис.3 Распределение (на графиках) разнородных измеренных данных системы с двойным моментом (для системы SkyTEM) по линии наблюдений.

В результате интерполяции с соответствующим «заполнением» недостающих данных измерений в цифровых данных, локальные, ограниченные по размерам аномалиеобразующие объекты не могут быть отражены в аномальном поле (Рис.4)



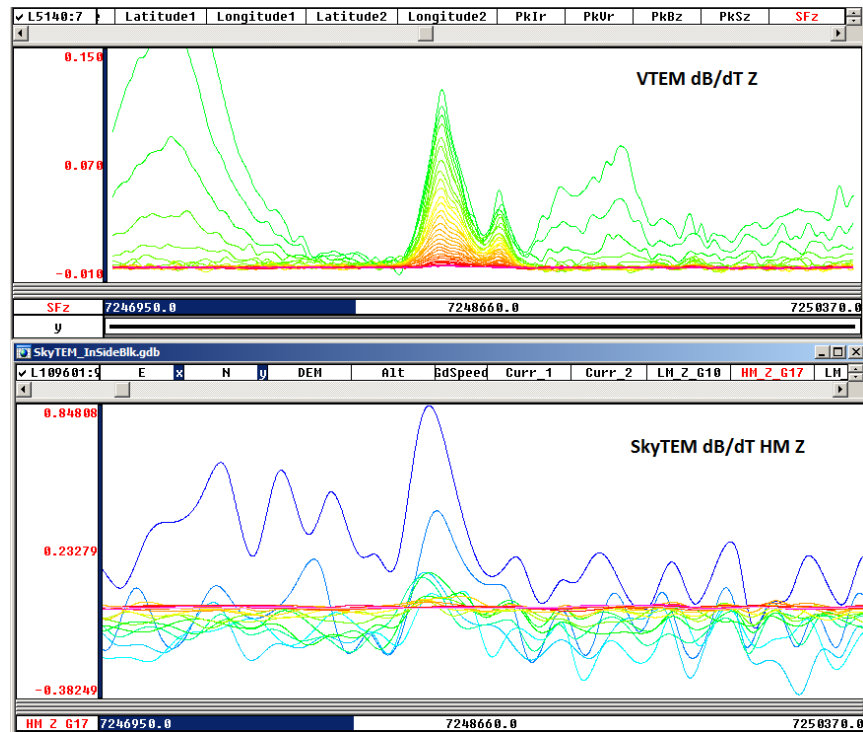


Рис.4 Сравнительные графики ЭМ данных по одному и тому же профилю наблюдений. Гренландия. SkyTEM – 2011, VTEM – 2012 год.

Двойной момент: недостатки в разрешающей способности зондирования

Разработчиками и эксплуатантами систем с двойным моментом предполагается, что данные LM с данными HM могут быть совмещены, так как имеют перекрытие по разрезу (Sørensen, Auken, 2004). На практике, очевидно, этот тезис справедлив только для определенных геоэлектрических условий.

В работе (Guillaume-Alexandre Sab, 2012) приведены измеренные данные и окончательные (после осреднения и отбраковки) системы SkyTEM (Рис.5) по точке зондирования находящейся в районе геоэлектрических условий в диапазоне сопротивлений первых сотен – 500 Ом-м. В строгом смысле, эти данные можно отнести к одной и той же точке зондирования с большой долей условности, но как видно из этого примера, окончательные данные имеют разрыв между LM и HM, что фактически является «слепой зоной» при описании разреза и его количественной интерпретации (инверсиях).



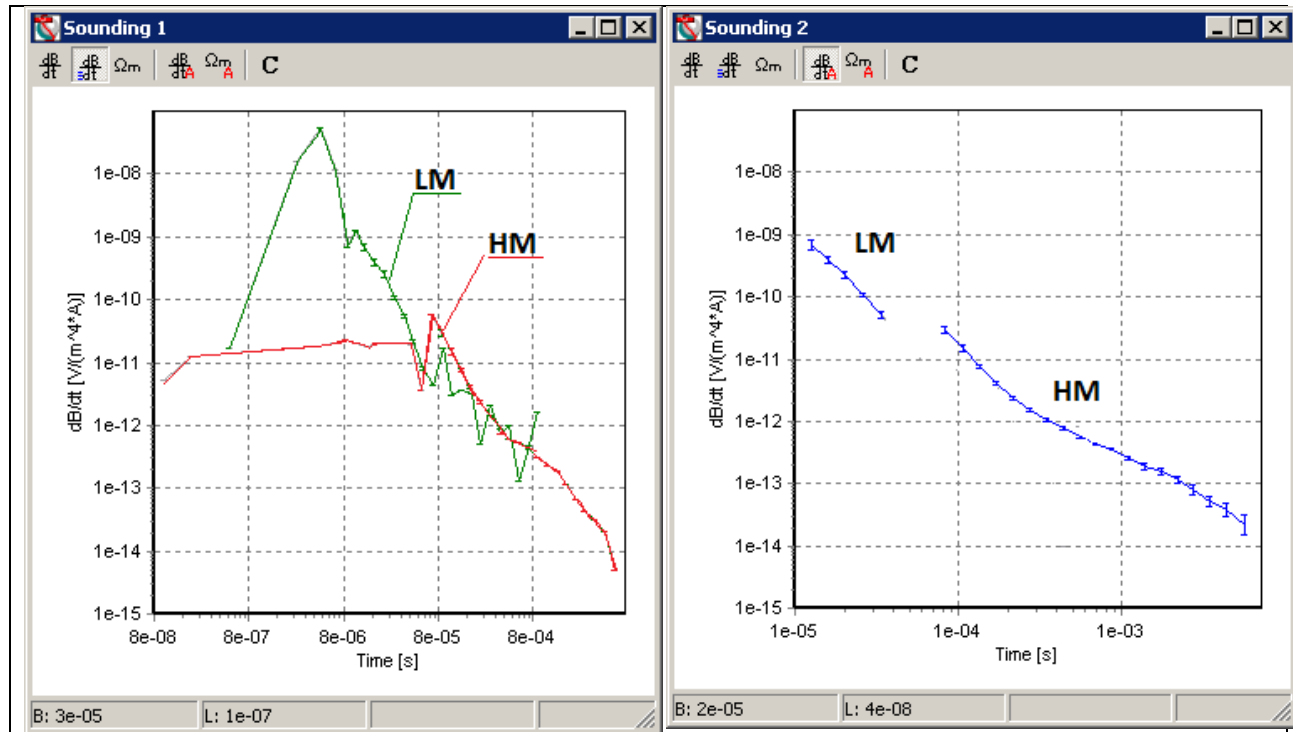


Рис.5 Измеренные SkyTEM данные кривой спада вторичного ЭМ поля (слева) и для той же точки зондирования осредненные и отбракованные данные (справа) (Guillaume-Alexandre Sab, 2012)

Другой практический пример из провинции Квебек, Канада, 2016 год (Рис 6), где сопротивления вмещающей геологической среды достигают первых тысяч Ом-м.

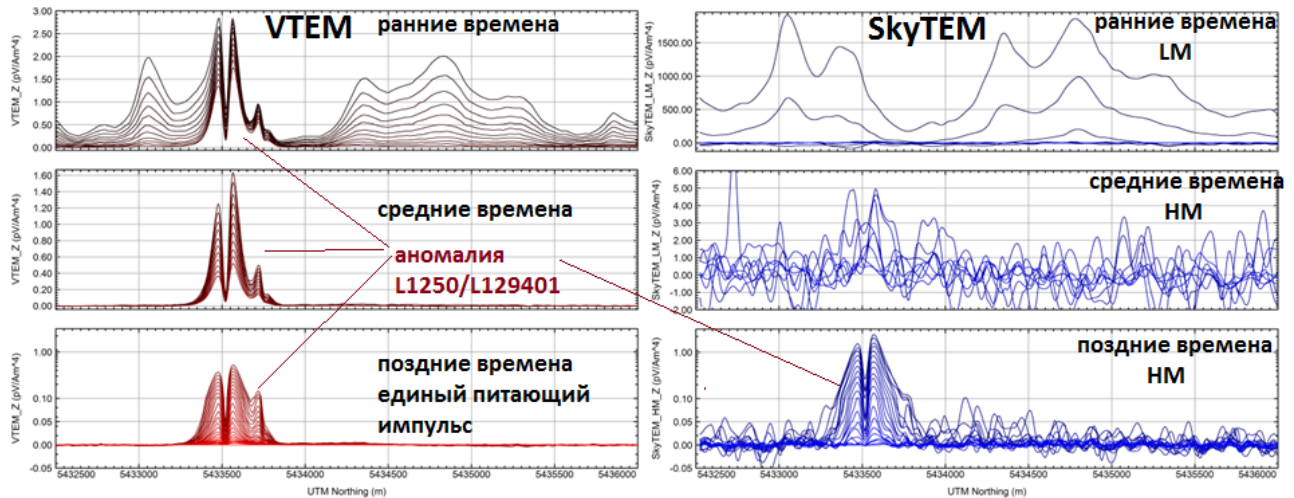


Рис.6 Сравнительные графики ЭМ данных системы с единым питающим импульсом (VTEM) и с двойным (SkyTEM). Квебек, 2016. (ранние времена <100 микросек; средние 100-500 микросек; поздние >500 микросек)



В этом случае соотношение сигнал/шум значительно ниже, чем в первом случае, и разрыв между отбракованными данными НМ и ЛМ значительно шире (рис.7).

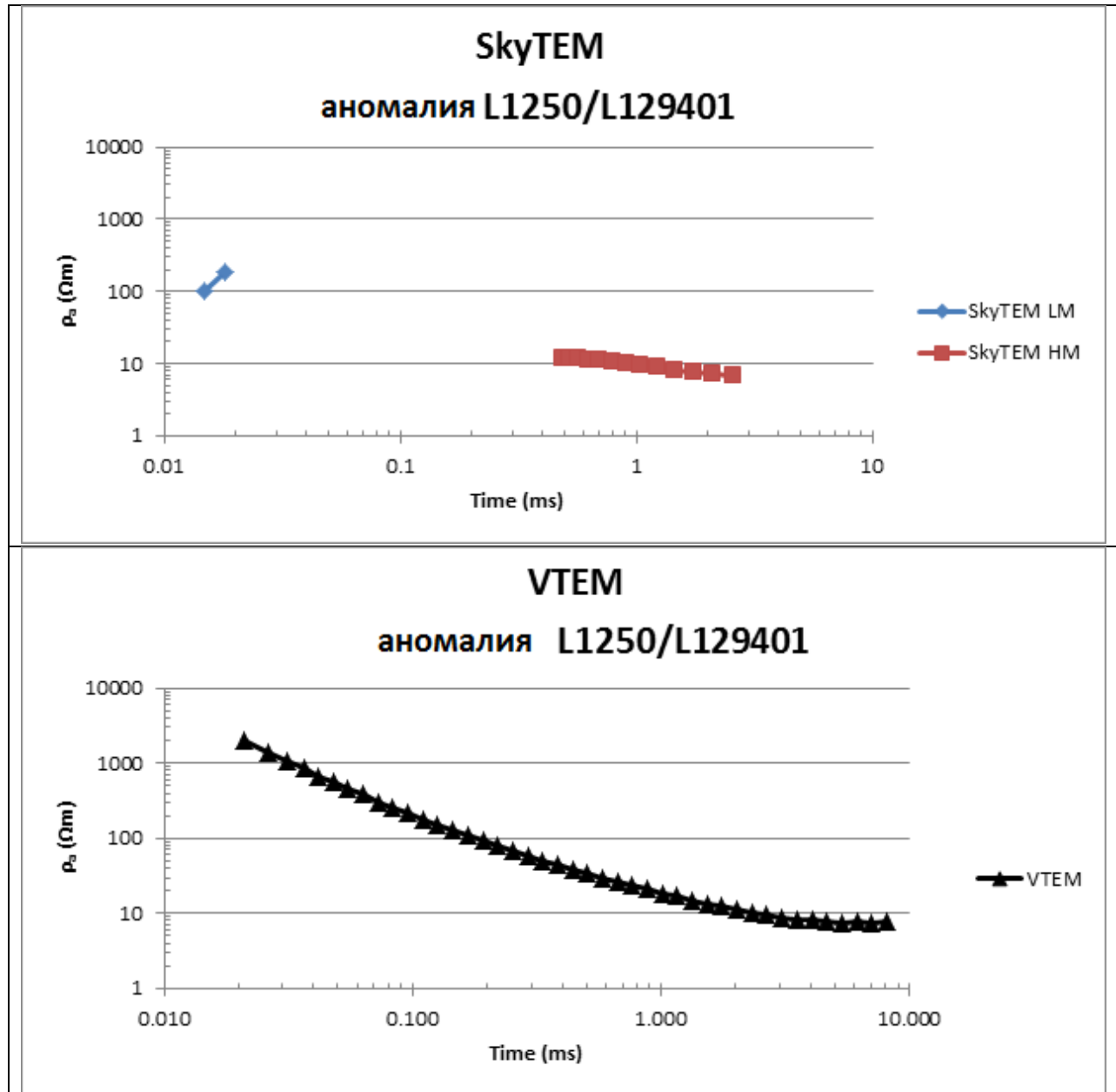


Рис.7 Данные полученные системой с двойным моментом (SkyTEM) и системой с единым моментом (VTEM) на одной и той же точке зондирования (Квебек, 2016 г.).

Таким образом, системы с двойным моментом (dual moment) во многих случаях обеспечивают измеренной информацией о геоэлектрическом разрезе (по вертикали) только фрагментарно, и во всех случаях фрагментарной информацией по латерали (в плане).



SkyTEM: Уровень шума

В силу конструктивных и технических особенностей система SkyTEM обладает значительно более высоким уровнем шума чем система VTEM, что хорошо видно из Рис. 4, 6, 8. Собственный уровень шума любой аэроЭМ системы является одним из факторов её чувствительности к неоднородностям в геоэлектрическом разрезе и глубинности исследований. На рис.8 представлен случай, когда локальные аномалии практически не проявляются на фоне собственного электромагнитного шума системы (SkyTEM).

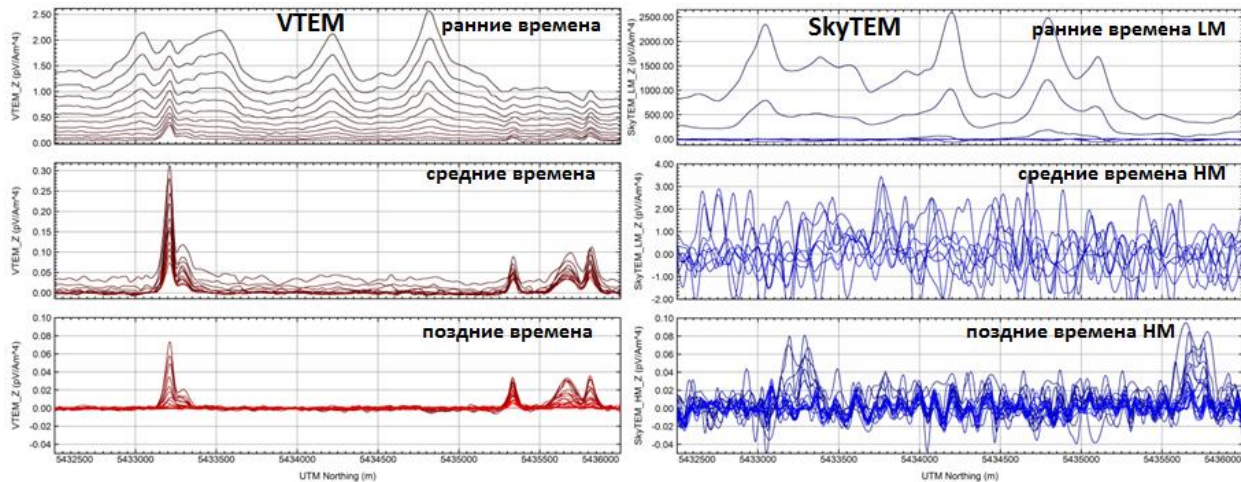


Рис.8 Сравнительные графики ЭМ данных системы с единым питающим импульсом (VTEM) и с двойным (SkyTEM). Квебек, 2016.

Чтобы искусственно снизить уровень шума системы схема обработки данных полученных системой SkyTEM включает осреднение или сглаживание т.н. трапециевидным фильтром (Auken et al., 2009; Guideline and standards for SkyTEM, 2011), ширина которого не менее 300 м для поздних времен (Рис.9).

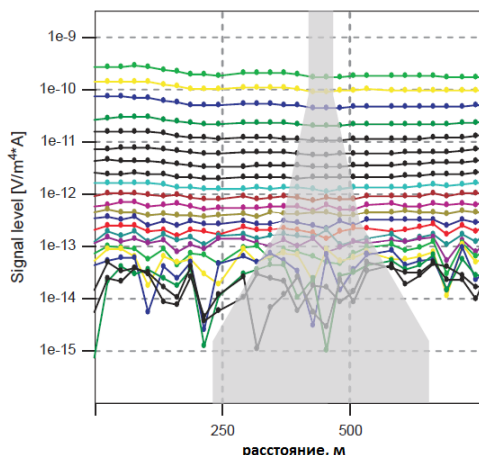


Рис. 9 Иллюстрация окна трапециевидного осредняющего окна, используемого при обработке данных системы SkyTEM (Auken et al., 2009)



Но такая фильтрация и сглаживание неизбежно оставляет следы (осцилляции) в данных, которые не несут никакой геологической информации (рис.10).

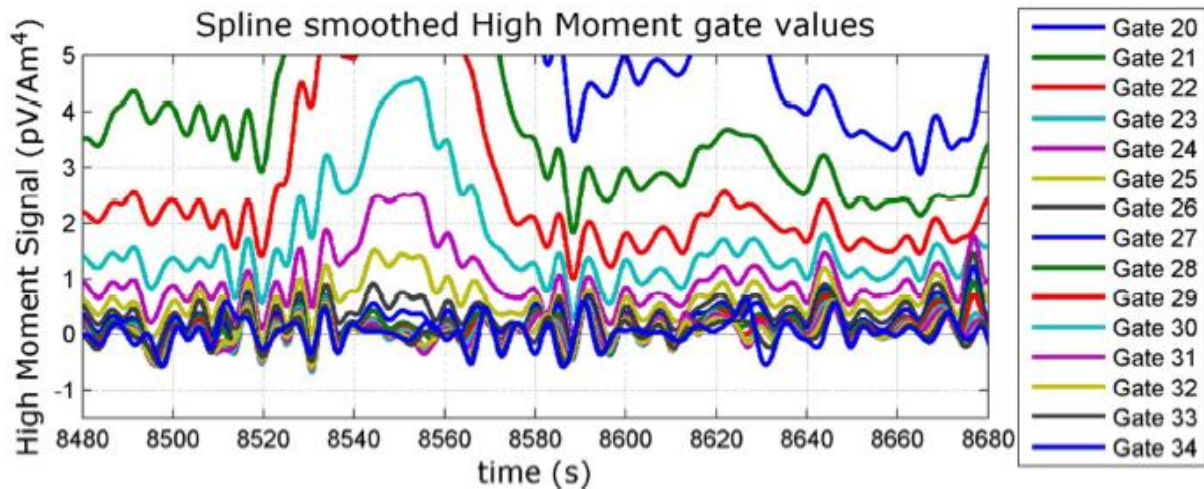


Рис.10 Пример искусственно созданных низкочастотных осцилляций в сглаженных и интерполированных SkyTEM данных (SkyTEM Survey:Colorado, USA. Data report. January 2012.)

Если провести инверсию таких ЭМ данных (вычисление удельного электрического сопротивления в разрезе), то такой электрический разрез насыщен «артефактами» - ложными узкими и локальными зонами низкого и высокого сопротивления, не связанных с реальными особенностями геологического строения (Рис.11).

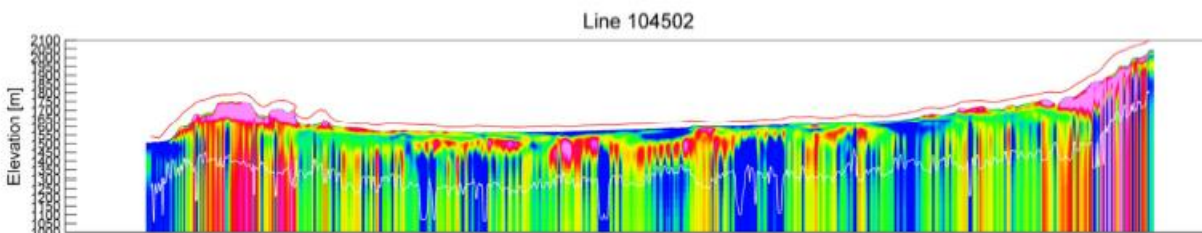


Рис.11 Результаты инверсии интерполированных и сглаженных данных SkyTEM иллюстрирующие наличие ложных зон низкого и высокого сопротивления в разрезе. (SkyTEM Survey:Colorado, USA. Data report. January 2012.)

Другой пример из открытых источников (<http://www.geosciencebc.com/s/Report2012-04.asp>) подтверждает системный характер этой проблемы. Имеет место существенная разница при инверсии оригинальных данных разных систем (VTEM и SkyTEM) без каких-либо дополнительных специальных сглаживающих и фильтрующих процедур до или в течение процесса инверсии (Рис 12).



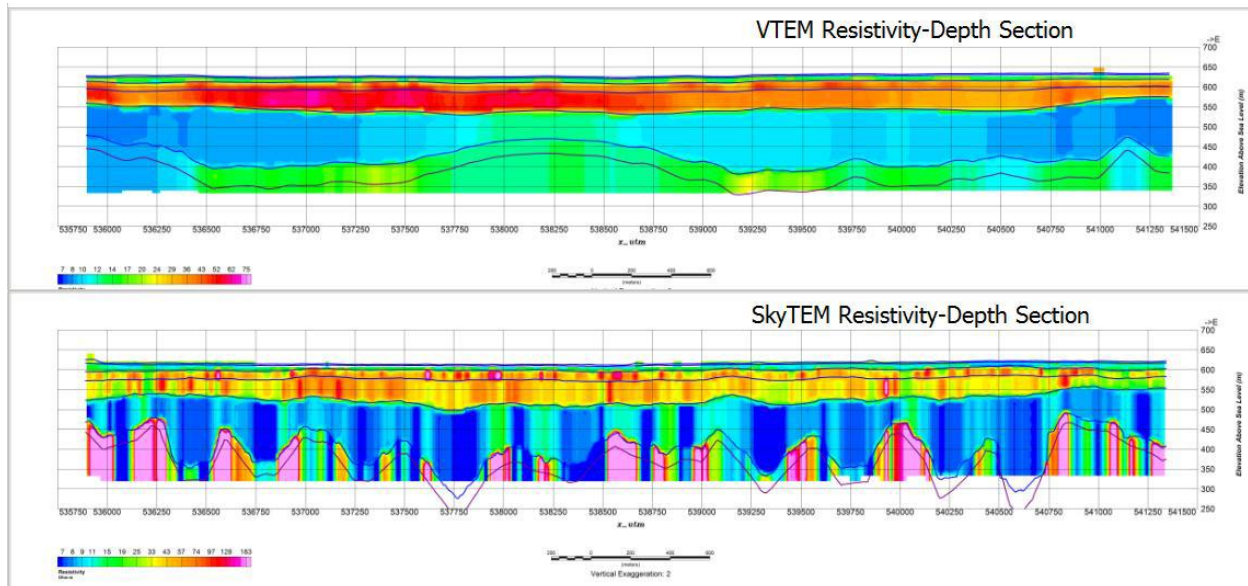


Рис.12 Результаты инверсии оригинальных данных VTEM и SkyTEM (Horn River, Canada, 2012). Разрез, полученный из данных SkyTEM содержит ложные зоны низкого и высокого сопротивления.

Для того чтобы убрать последствия технических недостатков системы SkyTEM и её высокого уровня собственного шума, рекомендуется использовать специальные обрабатывающие алгоритмы (синусоидальная компенсация, **SkyTEM Survey:Colorado, USA. Data report. January 2012**), а также специальный сглаживающий алгоритм инверсии данных - LCI smooth inversion (Guideline and standards for SkyTEM, 2011). Очевидно, что такие подходы дополнительных фильтров и инверсии аэроэлектромагнитных данных не добавят им геологической информативности и, вероятно, приемлемы только для горизонтально-слоистых сред, когда не ставится задача поисков локальных объектов.

Заключение

Режим последовательных измерений с двойным моментом (например, dual-moment, LM и NM для SkyTEM) ведет к значительным потерям в измеряемых данных, как по площади съемки, так и в изучаемом разрезе. Результатом использования этого режима измерений является потеря разрешаемой способности получаемых электромагнитных и магнитных данных. В частности, при съемках системой SkyTEM, 75% электромагнитных данных, отражающих верхнюю часть разреза, 25% данных, соответствующих более глубоким частям разреза, а также 25% магнитных данных, не являются измеренными. Искусственное, математическое заполнение недостающей информации в финальных базах данных и алгоритмические приемы сглаживания и сильной фильтрации данных на любом этапе их обработки и интерпретации, в конечном счете ведут к существенным потерям геологической информативности съемок.



Использованная литература

Auken, E., A. V. Christiansen, J. A. Westergaard, C. Kirkegaard, N. Foged, and A. Viezzoli, 2009, An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system: *Exploration Geophysics*, 40, 184–192, doi: 10.1071/EG08128.

Sørensen, K.I., S. Mai, K.R. Mohr, and N.S. Nyboe, 2013, Development of high dipole TDEM systems, 6th International AEM Conference and Exhibition, Extended abstracts, 2p.

Sørensen K.I., Auken E., SkyTEM – a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics* (2004) 35, p.p. 194-202.

Guillaume-Alexandre Sab, Data processing of an airborne electromagnetic survey in Antarctica. Master Thesis. Polytech Paris-UPMC – HydroGeophysics Group, Aarhus University. 2012. 59 p.

Auken E., Christiansen A.V., Westergaard J.H., Kirkegaard C., Foged N., Viezzoli A., An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system. *Exploration Geophysics*, 2009, 40, 184–192

[SkyTEM Survey: Colorado, USA. Data report.](#) January 2012.

Guideline and standards for SkyTEM measurements, processing and inversion. November, 2011. By the HydroGeophysics Group, Department of Earth Sciences University of Aarhus, Denmark.



WEBSITE
www.geotech.ca

CONTACT
info@geotech.ca

HEAD OFFICE
245 Industrial Parkway N.
Aurora, Ontario, L4G 4C4
Phone +1 905 841 5004