

Вертолетная АЭМ съемка во временной области для поиска полезных ископаемых: система записи и интерпретации данных.

A helicopter time-domain EM system applied to mineral exploration: system and data.

David Fountain, Richard Smith, Tom Payne и Jean Lemieux (Fugro Airborne Surveys) рассказывают о последних достижениях систем вертолетной АЭМ съемки во временной области и сравнивают их с самолетными АЭМ съемками в частотной области.

Впервые самолетная аэроэлектромагнитная разведка (АЭМ) была проведена в 1948 году. Вслед за ней последовала первая рабочая вертолетная съемка АЭМ в 1955 (Fountain, 1998; Fountain and Smith, 2003).

С тех пор проводилось параллельное развитие обеих технологий, которые вплоть до начала 60-х годов работали в частотной области. Однако в конце 70-х годов самолетная АЭМ съемка была переведена непосредственно во временную область, в то время как вертолетная осталась в частотной.

В новом тысячелетии и в особенности в 2002/2003 годах получила значительное распространение технология вертолетной АЭМ съемки во временной области (Boyko, et al., 2001; Balch et al., 2003; Eaton et al., 2004; Sorenson and Auker, 2004; Vrbancich and Fullagar, 2004; Witherly et al., 2004). Скорость развития ее такова, что уже сегодня число съемок во временной области равняется числу съемок в частотной области.

Компания Fugro Airborne Surveys и ее предшественники являются лидерами в разработке систем самолетной АЭМ съемки, включая системы GEOT- EM, MEGATEM и (Smith and Annan, 1997; Lane et al., 2000; Smith, Fountain and Allard, 2003). Помимо этого, Fugro непрерывно развивала систему вертолетной АЭМ съемки в частотной области, включая DIGHEM и RESOLVE.

Приобретенный опыт и уверенность в огромных перспективах вертолетной АЭМ съемки сделали возможным появление на свет в 2005 году системы HeliGEOTEM компании Fugro. Она включает в себя испытанную технологию GEOT- EM/MEGATEM в сочетании с необычайной функциональной гибкостью и повышенным горизонтальным разрешением вертолетных систем АЭМ.

Сравнение систем самолетной и вертолетной съемки

Система самолетной съемки GEOTEM размещается на самолете CASA 212: источники на парном двигателе и сенсоры на петле, обмотанной вокруг носа самолета, на концах крыльев и на хвосте (Рисунок 1).

Датчики возбуждают вихревые токи в среде с помощью периодических пульсаций «первичного» магнитного поля. Изменение этих токов измеряется сенсорами, размещенными в зондах спереди и внутри самолета.



Рисунок 1 Самолет CASA 212, оснащенный шестью многожильными проводами системы GEOTEM, размещенными в носовой и хвостовой части самолета, а также на концах крыльев.

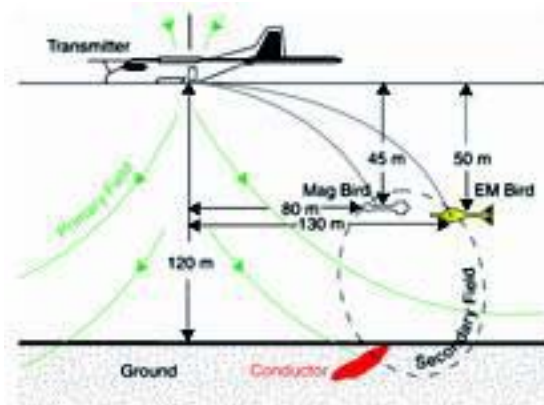


Рисунок 2 Схема АЭМ системы GEOTEM. Сенсоры приема располагаются внутри зонда, буксируемого самолетом на расстоянии 50 м по вертикали и 130 м по горизонтали. Помимо этого, также буксируется магнитный зонд для измерения интенсивности геомагнитного поля Земли. Геометрия системы MEGATEM почти что идентична.

Медленное затухание вихревых токов является индикатором присутствия проводящих слоев под землей. Таким проводящими слоями могут быть полезные ископаемые, связанные с сульфидной минерализацией. На рисунке 2 показана схема расположения системы ЭМ съемки: геометрия приемного зонда и минимально допустимая высота полета.

В съемках АЭМ обычной практикой является одновременное измерение интенсивности геомагнитного поля Земли. Что касается системы GEOTEM, то магнитное поле измеряется

Аэрогеофизика

магнитометром, размещенным во втором зонде, буксируемом немного впереди ЭМ зонда (Рисунок 2). Наличие магнитных данных весьма полезно для поисков полезных ископаемых, так как в этом случае можно разделить потенциальные полезные ископаемые, являющиеся проводниками, и другие объекты такие, как графит или глины, которые не обладают намагниченностью.

Системы вертолетной АЭМ HeliGEOTEM имеют много общих черт с GEOTEM, но значительно различаются геометрией расстановки (Рисунок 3).

В случае HeliGEOTEM две генераторные петли (Рисунок 4) размещены на длинном кабеле приблизительно в 60 м ниже вертолета AS350 (Рисунок 5).

ЭМ датчики и магнитометр находятся внутри зонда (Рисунок 6) и располагаются на расстоянии 20 м ниже вертолета.



Рисунок 3 Система HeliGEOTEM, включающая в себя вертолет (сверху), приемники и магнитометр (в середине) и источник (в самом низу).



Рисунок 4 Вид двух генерирующих петель снизу. Мотор-генератор и пульсатор расположены в центре генераторных петель.

Горизонтальное расстояние между приемником и центром генераторной петли в системе HeliGEOTEM составляет порядка 20 м, по сравнению с таким же расстоянием в системе GEOTEM в 130 м. Это позволяет получить лучшее горизонтальное разрешение умеренно глубоких проводящих объектов (см. более подробное описание ниже). Генераторная петля обычно буксируется на минимально возможной высоте над рельефом местности, составляющей около 40 м. Высота может меняться в зависимости от топографии и покрытия растительностью.

Как видно на рисунке двигатель-генератор энергообеспечения находится в центре генераторной петли. Кроме того, как показано на рисунке 6, магнитометр жестко закреплен на расстоянии около 4 м перед ЭМ датчиком, который соединяется с генераторной петлей буксировочным кабелем.



Рисунок 5 Схема расстановки в системе HeliGEOTEM. Соединительный кабель от вертолета до источника имеет длин 60 м. ЭМ датчики и магнитометр расположены на 20 м ниже вертолета и приблизительно на 20 м спереди от центра возбуждающей петли.



Рисунок 6 Сенсорный зонд. ЭМ датчики находятся в больших желтых гнездах, а магнитометры в маленьких белых гнездах.

Данные, записанные системой HeliGEOTEM, являются идентичными тем, что записывают системами GEOTEM/MEGATEM и состоят из:

- Измерения трех компонентов (X – горизонтальная вдоль линии полета, Y – горизонтальная поперек линии полета и Z – вертикальная) вторичного аномального поля, возникшего в поверхности.

- Одновременного измерения на источнике времени включения и выключения ('On Time' и 'Off Time') для достижения большей чувствительности к очень слабым и очень сильным проводникам (Annan et al., 1996; Smith, 1998).

- Измерения как поля dB/dt , так и поля B (Smith and Annan (2000); Smith and Annan (1998); Wolfgram and Thomson (1998)).

Комбинирование атрибутов этих систем позволяет в конечном итоге проводить более точную интерпретацию данных, чем это делалось ранее с использованием вертолетных систем измерений во временной области. Полный набор испытанных технологий интерпретации и обработки данных в системах MEGATEM/ GEOTEM может быть использован в системе HeliGEOTEM.

Данные съемки HeliGEOTEM

Для того чтобы продемонстрировать данные, записанные системой HeliGEOTEM, и сравнить их с данными самолетной АЭМ, на рисунках представлены результаты серий линий залетов над сульфидными залежами Исо (Iso) и Нью-Инско (New Insko) в районе Роуйн Норанда (Rouyn Noranda) Квебека (Канада).

Залежи Исо (Iso) и Нью-Инско (New Insko) относятся к зеленокаменному поясу Абитиб, который является одним из крупнейших районов добычи полезных ископаемых в Канаде, включающих месторождения цинка, меди, серебра и золота, которые привязаны к массивным сульфидным залежам. Обе залежи находятся близко к контакту кислых вулканических пород (риолитов) и основных вулканических пород (андезитов). Они залегают на глубине от 10 до 20 м под ледниковыми отложениями. Структура Исо представляет собой плоскость с падением на юг от 45 до 50° (Cheng et al, 2005; Fountain and Fraser, 1973). Эта структура простирается с запада на восток на расстояние более 500 м. Мощность ее достигает 35 м, а максимальная протяженность по падению не меньше 800 м. Структура Нью-Инско простирается с запада на восток и обладает длиной по простиранию 117 м и мощностью от 5 до 38 м с протяженностью по падению 250 м.

План линий залетов для съемки HeliGEOTEM над зонами Исо/Нью-Инско показан на рисунке 7. Данные с указанных профилей будут использоваться для иллюстрации различных характеристик системы HeliGEOTEM.

На рисунке 8 показана запись над структурой Исо, проведенная по восстанию (с юга на север) (Рисунок 8а) и по падению (с севера на юг) (Рисунок 8б). В обоих случаях данные записи поля dB/dt слева, а данные записи поля B справа. Синие линии соответствуют записи Z компоненты, а черные линии соответствуют записи X- компоненты.

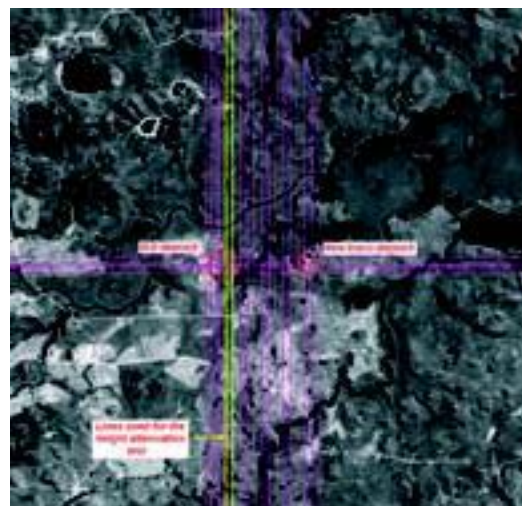


Рисунок 7 Линии залетов над структурами Исо и Нью-Инско. Желтые линии 1004 (слева) и 1005 (справа) рассмотрены на рисунках 8 и 11..

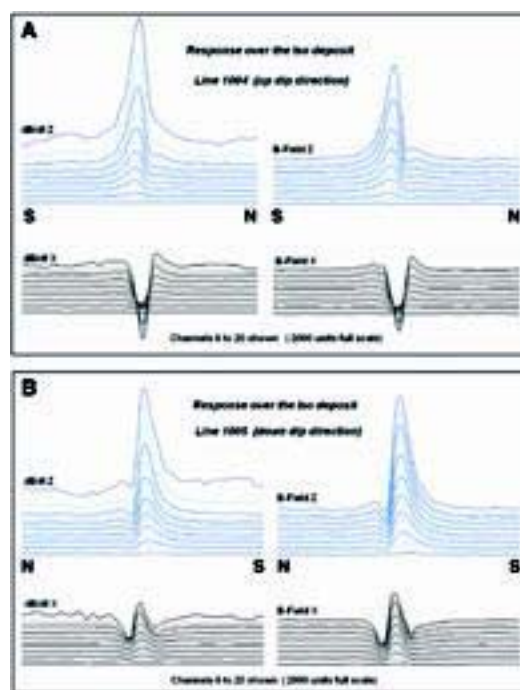


Рисунок 8 Сравнение записей профилей против падения (8а) и по падению (8б) z-компоненты (синий) и x-компоненты (черный). Данные слева отвечают полю dB/dt , а справа полю B. Стрелка указывает направление полета.

На картинках можно заметить лишь легкую асимметрию z- компоненты в двух направлениях профиля по сравнению данными самолетной съемки. Это соответствует смещению примерно в 20 м по горизонтали генератора и приемника в системе HeliGEOTEM по сравнению с 130 м горизонтального смещения в системе GEOTEM. Небольшая асимметрия данных HeliGEOTEM не столь значительна, чтобы как-то повлиять на общую картину. Более сильная асимметрия в x- компоненте позволяет проводить оценку информации.

Аэрогеофизика

Результаты съемки над Нью-Инско показаны на рисунке 9. Точно также поле dB/dt показано слева, а поле B справа. Единственный максимум z -компоненты говорит более об изометричном строении сульфидного тела. Единственный минимум x -компоненты означает либо горизонтальное залегание объекта, либо наличие мощного проводника.

На рисунке 10 для сравнения показана запись самолетной съемки системы MEGATEM над структурой Исо и отвечающая ей запись системы HeliGEOTEM в случае линии залета по востанию. На рисунке 10a изображены данные dB/dt , а на 10b - данные поля B .

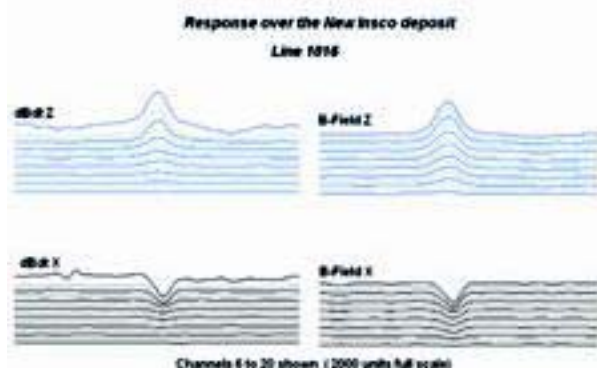


Рисунок 9 Запись над структурой Нью-Инско. Синие кривые – Z – компонента, черные – X – компонента. Слева – запись поля dB/dt , а справа поле B .

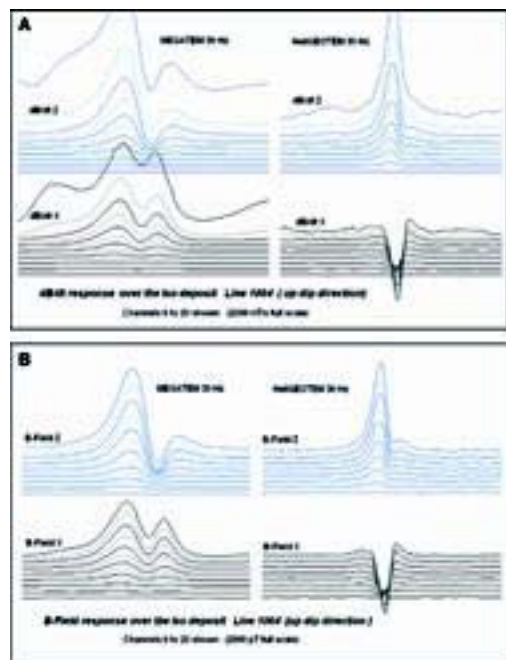


Рисунок 10 Сравнение самолетной съемки системы MEGATEM (слева) и системы HeliGEOTEM (справа) по линии 1004. Рисунок 10a (верхний) показывает данные dB/dt , 10b (нижний) данные поля B . Черные и синие линии отвечают x - и z -компонентам соответственно.

Аномалии обоих типов съемок довольно схожи с той лишь разницей, что запись горизонтальной компоненты системы HeliGEOTEM более сглажена. Кроме того, амплитуда основной аномалии при съемке HeliGEOTEM слабее, что является результатом меньшего расстояния между приемником и источником, равном 20 по сравнению со 130 м у другого типа съемки.

На рисунке 11 показаны данные, полученные при измерениях над структурой Исо при возрастающем среднем значении минимально допустимой высоты полета. В случае возрастания сопротивления геологической среды, как это происходит в районе структур Исо и Нью-Инско, значение минимальной высоты полета может быть использовано как приблизительная мера глубины проникновения поля в землю. В действительности увеличение высоты можно приблизительно сопоставить с увеличением геологической глубины.

Номинальная высота полета вертолета составляет 100 м (320 футов), а средняя мощность покрывающей толщи около 10 м. На рисунке 11a показаны результаты для глубин 10, 20, 34 и 64 м. Во всех примерах величина целевой аномалии значительно выше регулярного и геологического шума. На глубинах 94, 125, 140 и 156 м (Рисунок 11b) величина аномалии уже сопоставима с уровнем шума. По этим данным мы можем сделать вывод о том, что для структур типа Исо эффективная мощность исследования для систем HeliGEOTEM составляет около 150 м.

Сравнение с модельными результатами

На рисунке 12 сравнивается реальная запись над структурами Исо и Нью-Инско и рассчитанная модельная аномалия. Для моделирования поля над структурой Исо (Рисунок 12a и b) в качестве модели используется наклонный слой.

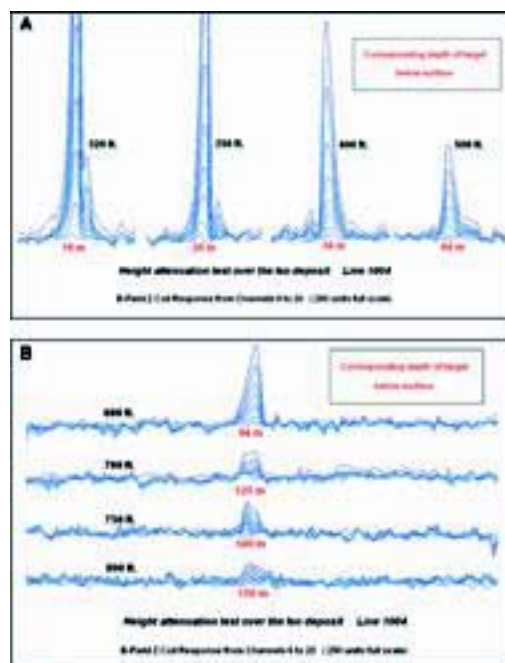


Рисунок 11 Запись, сделанная при различных высотах полета вертолета (черные цифры в футах). Измерение на большей высоте эквивалентно более глубокому проникновению записываемого ЭМ поля в среду (красные цифры в метрах). Аномалия более отчетливо проявляется при небольших высотах полета, но слабо заметна на общем уровне шума при высоте в 156 м.

Моделирование выполнено с помощью программы PLATE, разработанной в университете Торонто Пьером Китингом (Pierre Keating). Поле структуры Нью-Инско лучшим образом моделируется полем сферы, что было сделано с помощью собственных программ Fugro (Рисунок 12c).

Во всех случаях можно констатировать хорошее соответствие между реальной съемкой и модельными данными. Это означает, что данные по компонентам z- и x могут быть моделированы и интерпретированы с большой достоверностью.

Выводы

Разработка и внедрение вертолетных АЭМ съемок во временной области, включая HeliGEOTEM, является стратегическим направлением в поисках полезных ископаемых. Использование технологий АЭМ съемки во временной области позволяет достичь

больших глубин исследования по сравнению с системами, работающими в частотной области

Основные преимущества вертолетных систем таковы:

- 1) более экономная съемка на очень маленьких или удаленных площадях (те места, где тяжело разместить взлетную полосу для самолета, но возможно построить вертолетную площадку),
- 2) лучшая латеральная разрешенность неглубоких проводников (для глубоких проводников латеральная разрешенность эквивалентна получаемой при самолетной съемке, так как она определяется лишь глубиной залегания объекта, а не геометрией съемки)
- 3) лучшие результаты при съемке над неровным рельефом.

Система HeliGEOTEM позволяет использовать комплексирование испытанных технологий GEOTEM/MEGATEM с более высоким горизонтальным разрешением и гибкостью в проведении измерений при вертолетной АЭМ съемке во временной области. Измерение сразу трех компонент X, Y и Z вторичного ЭМ поля, возникающего в земле, очень эффективно при проведении интерпретации геометрии целевых объектов. Измерение «времени включения» (так же как и «времени выключения») совместно с полем В позволяет работать в широком диапазоне значений: от очень плохих до очень хороших проводников.

Благодарности

Использовавшаяся геологическая информация и данные MEGATEM, относящиеся к структурам Исо и Нью-Инско, были получены в рамках проекта: Переоценка технологии MEGATEM. Это проект осуществляется в Университете Квебека в Абитит-Темискаминг (Abitibi-Temiscamingue (UQAT)) совместно с партнерами: Noranda Exploration, Fugro Airborne Surveys и Ecole Polytechnique de Montreal. Проект Переоценки осуществлялся при финансовом участии фонда Канадского Экономического Развития региона Квебек и министерства экономики Квебека. Геологические данные и данные MEGATEM о структурах Исо и Нью-Инско доступны при согласовании с UQAT любой компании или индивидуальному лицу, которые желают проводить исследования в этом регионе.

Мы бы хотели выразить благодарность за сотрудничество Джорджу Надеру (George Nader), который являлся руководителем проекта HeliGEOTEM, и тем людям, без которых не возможно было бы добиться успеха, Питеру Аннани (Peter Annan), Двейну Битти (Dwayne Beattie) и Филу Майлсу (Phil Miles) из компании Fugro Airborne Surveys.

Мы благодарим Fugro Airborne Surveys за содействие работе и разрешение на публикацию материалов. Также хотим выразить благодарность Кристине Фаркухарсон (Christine Farquharson) за иллюстрации, выполненные для этой статьи.

Ссылки

Annan, A.P., Smith, R.S., Lemieux, J., O'Connell, M.D., and Pedersen, R.N. [1996] Resistive-limit time-domain AEM apparent conductivity. *Geophysics*, 61, 93-99.

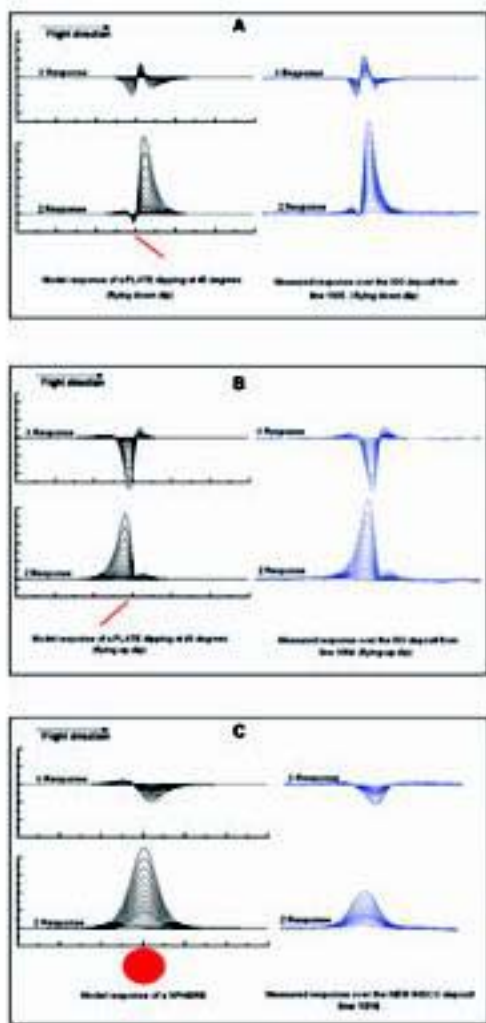


Рисунок 12 Сравнение модельной аномалии, полученной с помощью программы PLATE (черные линии слева) и моделируемых реальных данных (сини линии справа). Рисунок 12a представляет запись, сделанной по падению, рисунок 12b – по восстанию. На рисунке 12c представлено поле моделируемой сферой структуры Нью-Инско.

Аэрогеофизика

- Balch, S. J., Boyko, W., and Paterson, N.R. [2003] The AeroTEM airborne electromagnetic system. *The Leading Edge*, **22**, 562-566.
- Boyko, W., Paterson, N. R., and Kwan, K. [2001] AeroTEM characteristics and field results. *The Leading Edge*, **20**, 1130-1138.
- Cheng, L.Z., Smith, R.S., Allard, M., Keating, P., Chouteau, M., Lemieux, J., Vallee, M.A., Bois, D., and Fountain D.K. [2005] Geophysical case study of the Iso and New Inco deposits, Quebec, Canada: Part I, data comparison and analysis. *Exploration and Mining Geology*, in press.
- Eaton, P., Anderson, B., and Lubbe, B. [2004] NEWTEM - adventures in thin air. *74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys.*, 1213-1216.
- Fountain, D.K. [1998] Airborne electromagnetic systems - 50 years of development. *Exploration Geophysics*, **29**, 1-11.
- Fountain D. K. and Fraser, D.C. [1973] Geophysical analysis of the Magusi River sulphide deposit. *43rd Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys.*, Expanded Abstract.
- Fountain D. K., and Smith, R.S. [2003] 55 years of AEM; 50 years of KEGS. *KEGS 50th Anniversary symposium*, Toronto. (<http://www.fugroairborne.com/download/KEGSSymposiumAEM.pdf>)
- Lane, R., Green, A., Golding, C., Owers, M., Pik, P., Plunkett, C., Sattel, D., and Thorn, B., [2000] An example of 3D conductivity mapping using the TEMPEST airborne electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, **31**, 162-172.
- Smith, R.S. [1998] On the effect of varying the pulse width to detect high conductance bodies. *Exploration Geophysics*, **29**, 42-45.
- Smith, R. and Annan, P. [1998] The use of B-field measurements in an airborne time-domain system: Part I. Benefits of B-field versus dB/dt data. *Exploration Geophysics*, **29**, 24-29.
- Smith, R.S. and Annan, A.P. [1997] Advances in airborne time-domain EM technology. In Gubin, A.G., (Ed.), Proc. of Explor. 97: Fourth Dec. Int. Conf. on Min. Explor., 497-504.
- Smith, R.S. and Annan, A.P. [2000] Using an induction coil sensor to indirectly measure the B-field response in the bandwidth of the transient electromagnetic method. *Geophysics*, **65**, 1489-1494.
- Smith, R., Fountain, D., and Allard, M. [2003] The MEGATEM fixed-wing transient EM system applied to mineral exploration: a discovery case history. *First Break*, **21**, July, 73-77.
- Sorensen, K.I., and Auken, E. [2004] SkyTEM - a new high resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, **35**, 194-202.
- Vrbancich, J. and Fullagar, P.K. [2004] Towards seawater depth determination using the helicopter HoistEM system. *Exploration Geophysics*, **35**, 292-296.
- Witherly, K., Irvine, R., and Morrison, E. [2004] The Geotech VTEM time-domain helicopter EM system. *74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys.*, 1217-1220.
- Wolfgram, P., and Thomson, S. [1998] The use of B-field measurements in an airborne time-domain system - Part II: examples in conductive regimes. *Exploration Geophysics*, **29**, 225-229.