

## Рудная геофизика

**История разработки CSIRO высокотемпературных сверхпроводящих rf SQUIDS для изысканий методом становления поля (TEM). A history of the CSIRO's development of high temperature superconducting rf SQUIDS for TEM prospecting**

Catherine P. Foley,<sup>1</sup> Keith E. Leslie,<sup>2</sup> и Rex A. Binks<sup>3</sup> из Научной и промышленной исследовательской организации Австралийского содружества (CSIRO) предлагают нашему вниманию историю, стоящую за разработкой новых сенсорных систем для разведки минералов методом магнитных переходных процессов на основе сверхпроводящих высокотемпературных технологий SQUID (Сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков).\*

За последние 14 лет, CSIRO Industrial Physics разработала высокотемпературные сверхпроводящие сенсорные системы (HTS) SQUID (Сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков) для целей разведки методом становления поля (TEM). Первоначально работа выполнялась в сотрудничестве с BHP, теперь BHP Billiton, и был достигнут некоторый успех. Сотрудничество с BHP прервалось в 1998 после выполнения серии аэро-испытаний. Интерес к rf SQUID датчику возродился в 2000, когда он был успешно использован для оконтуривания целевых зон в Falconbridge's Raglan, Квебек, на руднике. В результате, CSIRO заключила контракт на постройку версии сенсорной системы SQUID повышенной прочности для использования Falconbridge по соглашению об аренде. С сентября 2001, было построено и развернуто несколько систем CSIRO SQUID на трех континентах. Локальная австралийская компания, Outer-Rim Developments, получила лицензию от CSIRO на производство систем rf SQUID, которые теперь называются LANDTEM. Передача технологий от CSIRO к Outer-Rim Developments облегчалась Outer-Rim, которая работала по субподряду с CSIRO в течение нескольких месяцев.

В этой работе представлены и обсуждаются результаты нескольких основополагающих съемок SQUID. В конце работы приводится сравнение шумовых характеристик датчиков CSIRO HTS SQUID и феррозонда Bartington.

**Теоретические основы**

Использование датчиков В-поля для ЭМ методов переходных процессов (TEM) было простимулировано необходимостью разделять отклик TEM от высокопроводящих целевых участков, например, никелевых сульфидных отложений, от проводящих вмещающих или проводящих перекрывающих пород (Spies, 1989).

CSIRO разработала высокотемпературный сверхпроводящий датчик (HTS) на основе SQUID для наземных TEM. Разработки были начаты в 1991; первоначально работа поддерживалась

как CSIRO, так и BHP, а съемки проводились Geotrex (теперь Fugro Ground). Первая съемка 1993 года над месторождением серебра Cannington помогла идентифицировать природу данного месторождения (Foley et al., 1999). Вслед за уходом BHP в 1998 г., CSIRO сконструировала системы совместно с Falconbridge. Falconbridge использовала эти системы по соглашению аренды на три года, проводя съемку на сотнях погонных километров над перспективным участком Raglan (Osmond et al., 2002). После того, как эта система была предложена для коммерческого использования третьими сторонами на четырех последовательных выставках конференции ASEG, Outer-Rim Development обратилась к CSIRO и, после переговоров начала производство системы LANDTEM SQUID для продажи или аренды согласно имеющейся лицензии.

**Первые испытания**

Сообщение об открытии керамического материала в 1986 г., который стал супрелепроводником при температурах жидкого азота, вызвало широкий интерес к этому новому материалу. Из-за обширных теоретических исследований в физике сверхпроводников, CSIRO была хорошо подготовлена для участия в изучении свойств этого нового материала. В 1989, команда CSIRO тестировала двух-переходные HTS SQUID, сконструированные полностью в CSIRO.

В геофизической разведке, датчики В-поля потенциально дают лучшую дифференциацию, чем катушечные датчики для целевых объектов, залегающих либо под проводящими перекрывающими породами или в пределах высокопроводящих вмещающих пород. Таким образом, датчики SQUID могут потенциально применяться для большинства съемок никель-сульфидных объектов, проводимых в Австралии. В 1991, Австралийская рудная компания, тогда называемая BHP, теперь BHP Billiton, после получения двух грантов на исследования совместно с правительством Австралии, вошла в сотрудничество с CSIRO на разработку SQUID в качестве датчиков В-поля для TEM зондирования.

<sup>1</sup> cathy.foley@csiro.au

<sup>2</sup> keith.leslie@csiro.au

<sup>3</sup> rex.binks@csiro.au

\*Эта статья представляет собой слегка обработанную версию расширенных тезисов, представленных на Австралийском конгрессе по наукам о Земле в 2006 г., проводимом в Мельбурне, Австралия.

## Рудная геофизика

Первые совместные испытания CSIRO/BHP в поле были предприняты в Coober Pedy, Австралия, в декабре 1992 (Foley et al., 1999). В 1993, значимость системы была продемонстрирована, когда BHP развернула датчики над перспективным объектом в Cannington, Qld. Превосходство датчика SQUID над системой группы обмоток *Приемника направляющих векторов* (RVR) было очевидным на поздних каналах времени, смотрите Рисунок 1. Также было очевидным 'преимущество на ранних временах' датчиков В-поля над датчиками с катушкой (Lee et al., 2002).

После этого первоначального успеха, CSIRO и BHP преуспели в испытании датчиков SQUID для аэро TEM. Поскольку датчик SQUID работает как векторный вариометр, было важным разработать систему подвеса для уменьшения перемещения датчика SQUID во время работы. Эта работа была успешно предпринята BHP (Lee et al., 2001). CSIRO обнаружила и решила проблемы с системой SQUID при работе в воздухе, такие как необходимость регулировки давления резервуара с двойными стенками SQUID и необходимость проб (Braginski, 2003).

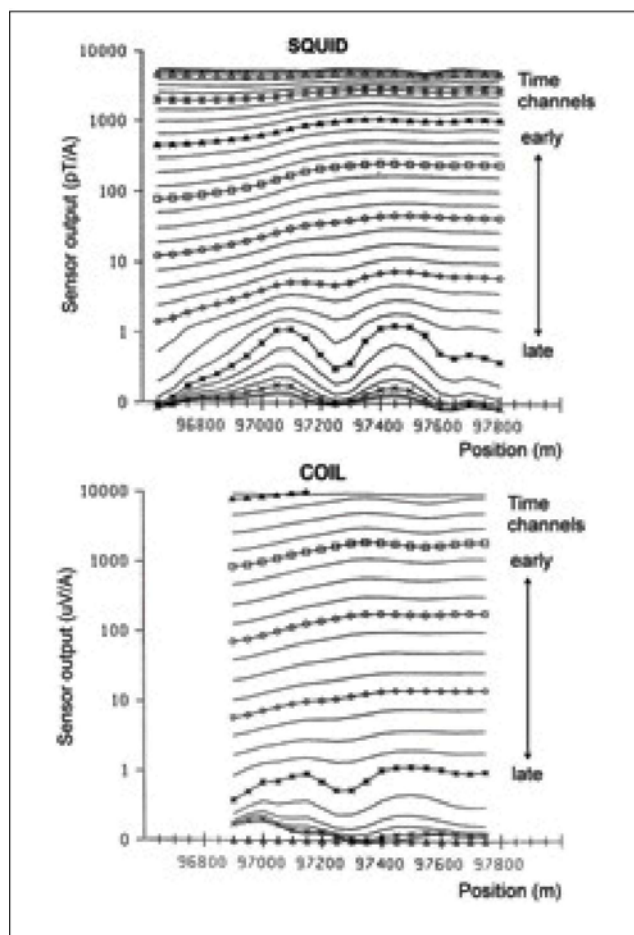


Рисунок 1 Сравнение графиков SQUID по оси z (вверху) и графиков метода TEM с катушкой (снизу) для 23 временных каналов на профиле 1800 м. SQUID, используемая для этой съемки характеризовалась порогом белого шума  $\sim 1.4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

80

Последние несколько лет CSIRO продолжала улучшение порога белого шума rf SQUID от нескольких  $\text{pT}/\sqrt{\text{Гц}}$  до порядка  $300 \text{ fT}/\sqrt{\text{Гц}}$ . После ряда начальных полетных испытаний, BHP доставила систему SQUID в Timmins, Канада, для сравнительных испытаний с применением традиционной катушечной системы (Lee et al., 2002). В результате этих испытаний, BHP пришла к мнению, что хотя датчик SQUID имеет превосходные показания на последних временных каналах, это преимущество было недостаточным для продолжения разработки SQUID для аэро-TEM. Сотрудничество между BHP и CSIRO прекратилось в 1998.

### Испытания в Raglan 2000 - 2001

В 1998, CSIRO продемонстрировала систему HTS SQUID как в Hobart ASEG так и на международном шоу на ярмарке в Ганновере 1998 г. В Raglan, Falconbridge имела трудности при выделении золотых жил, расположенных на глубинах свыше 100 м (Osmond et al., 2002). Интерес к испытаниям SQUID для разведки TEM был подогрев, когда Falconbridge предложила CSIRO испытать систему SQUID в Raglan после рекомендации Ken Witherly из Condor Consulting. Два сотрудника CSIRO поехали в Raglan в мае 2000 г. для проведения этих испытаний с использованием трехосевых систем HTS rf SQUID. На основной частоте 5 Гц, датчики SQUID смогли 'выделить глубокие длинные массивные сульфидные участки линз золота на постоянном времени на глубине 200 м' (Osmond et al., 2002).

В результате этих последовательных испытаний, CSIRO заключила договор на аренду и поставку двух систем SQUID с Falconbridge, с которыми будет работать Crone Exploration, Mississauga. CSIRO имел прототип, готовый к испытаниям в Raglan к маю 2001 г. (Leslie et al., 2003). Потребовалась дальнейшее придание системе износоустойчивости перед окончательным запуском в регулярное использование для съемки в сентябре 2001. С тех пор,



Рисунок 2 Система трехосевых аэродатчиков CSIRO SQUID, развернутая для первоначальных испытаний в Raglan, Квебек, Канада в мае 2000. Датчики SQUID были расположены под снегом для уменьшения шума, вызванного ветром.

© 2007 EAGE

## Рудная геофизика



Рисунок 3 Прототип трехосевой системы LANDTEM,

Связанной с системой приемников Crone, Raglan, май 2001.

Crone выпустила две системы датчиков CSIRO HTS SQUID для скважин за последние пять лет использования. Системы доказали надежность в поле и обслуживались самой компанией Crone при необходимости, что устраняло необходимость возврата систем в Австралию из Канады на обслуживание.

## Испытания в WA 2000 - 2001

CSIRO провела два испытания в Западной Австралии, первое в октябре 2000, второе в мае 2001 г. Эти испытания проводились над никелевыми сульфидными месторождениями, расположенными в 500 км к востоку от Перта и захороненными под покрывкой. Эти целевые породы были обнаружены при проведении более ранних съемках со стандартным катушечным датчиком RVR. В первых сериях испытаний, SQUID помещались ниже уровня грунта в целях уменьшения влияния помех от ветра. Передатчик Zonge и приемник EMIT SMARTem использовались для измерения отклика SQUID как в конфигурации «петля» так и в конфигурации *slingshot*. Погружение датчика SQUID оказалось серьезной ошибкой, поскольку над откликами петли на последних временах доминировали 'отрицательные значения', смотрите Рисунок 4. Во время этого испытания, целевой объект не наблюдался. Была сделана попытка объяснить отрицательные значения влиянием магнитной вязкости на поверхности почв; однако до настоящего времени нет четкого вывода. Во время второго испытания, предпринятого в мае 2001 г., датчик SQUID был помещен на поверхность почвы и отрицательный эффект не наблюдался. Во втором испытании, был ясно идентифицирован никелевый сульфидный объект с помощью датчика SQUID.

## Лицензирование производства LANDTEM

Небольшая колонка в разделе новостей промышленности апрельского номера 2002 г. журнала *Preview* надела на мысль компанию Outer-Rim Developments обратиться к CSIRO по поводу лицензирования производства системы наземных датчиков TEM SQUID CSIRO, теперь известных как LANDTEM. Одной из частей предварительного обследования, было небольшое испытание, проведенное над

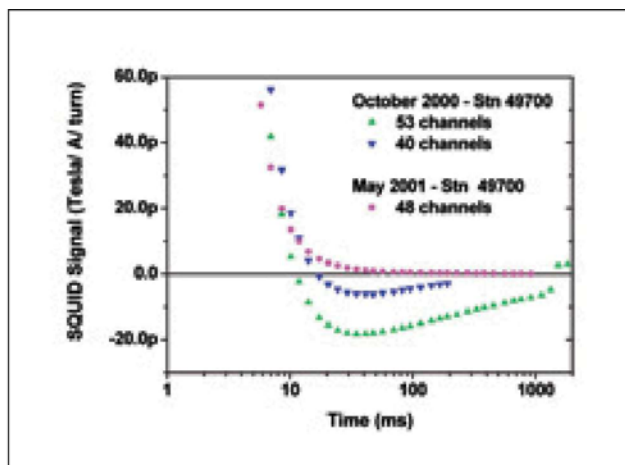


Рисунок 4 Сравнение измерений метода переходных

процессов TEM для одной и той же станции при погруженном SQUID (октябрь 2000 г.) и размещенном на поверхности почвы (май 2001 г.). Отрицательные значения в данных 2000 г. кажутся функцией времени отключения, при этом у времени отключения нет больших отрицательных значений.

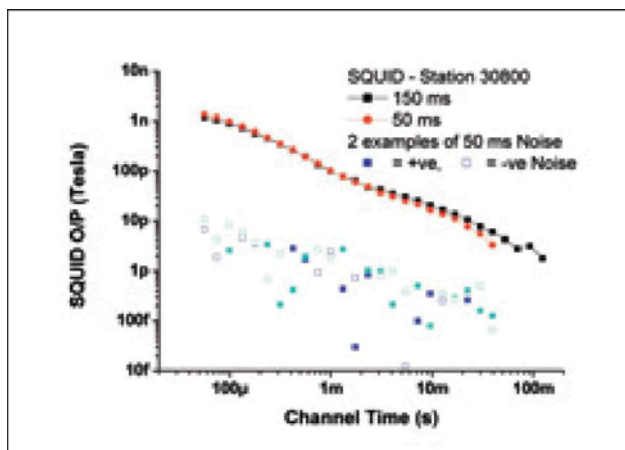


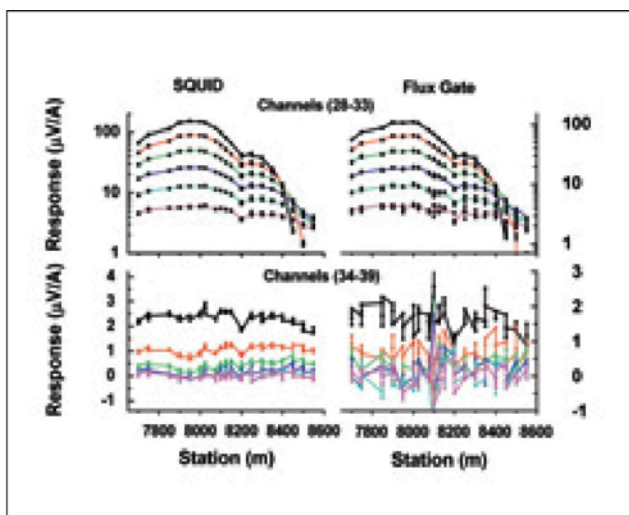
Рисунок 5 Сравнение кривых спада 50 мс и 150 мс спада на времени паузы для одной станции, расположенной над целевым объектом 'Tritton'. Отклик в 150 мс имеет слегка большие значения времени спада, чем отклик 50 мс. Порог шума датчика SQUID показан как функция Времени канала.

медной сульфидной залежью, известной под именем Tritton и расположенной вблизи Cobar, NSW (Collins, 2001). Были испытаны значения времен паузы как для 50 мс, так и 150 мс, и в обоих случаях был записан график спада для целевого объекта Tritton. На рисунке 5 показано сравнение между кривыми спада, полученными для одной и той же станции для двух разных значений времени паузы. Кривая спада для 150 мс характеризуется слегка более длительной постоянной времени, чем для графика 50 мс. Panaitov et al. (2002) относят этот эффект к суммированию влияния всех ранних переходных процессов TEM. Этот эффект может также объяснить уменьшение отрицательного отклика, наблюдаемого для спада 40 каналов по сравнению с тем, что наблюдается на 53 каналах в первом испытании WA, смотрите Рисунок 4.

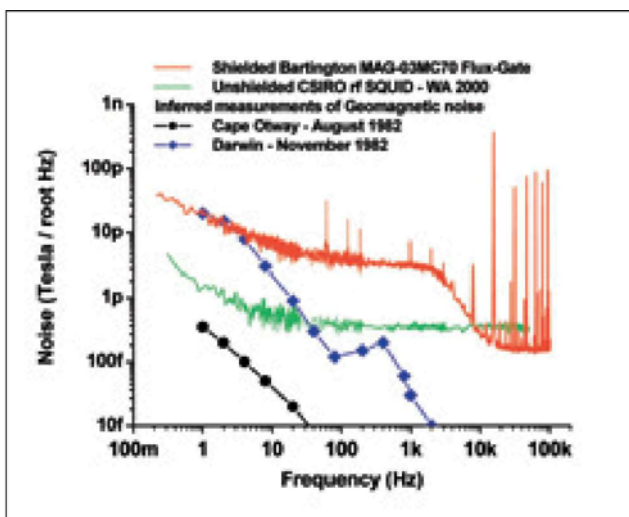


## Рудная геофизика

Outer-Rim Developments начала производство трех блоков LANDTEM в 2003 г. Передача технологий от CSIRO к субподрядчику Outer-Rim, Process Control, облегчалось тем, что генеральный директор Process Control, работал в CSIRO несколько месяцев. Таким образом, подробности работы электроники SQUID, конструкции аппаратуры LANDTEM и понимание работы rf SQUID были переданы CSIRO компании



**Рисунок 6** Сравнение графиков спада на поздних временах датчика CSIRO SQUID и ферромагнитного датчика Bartington. Измерения датчиками выполнялись одновременно для обеспечения лучшего сравнения двух датчиков. (Данные ферромагнитного датчика использовались согласно разрешению компании Anglo-American).



**Рисунок 7** Измеренные характеристики шума для неэкранированного датчика CSIRO rf SQUID по сравнению с экранированным ферромагнитным датчиком Bartington. Прогнозные предельные значения геомагнитного шума, основываясь на работе McCracken et al., показаны для демонстрации потенциальных ограничений датчиков В-поля при работе в условиях естественного поля Земли.

Process Control. В настоящий момент были изготовлены три дополнительных блока LANDTEM компанией Process Control. Эти блоки расширенно применяются как в Канаде, так и в Западной Австралии.

### Сравнение с другими датчиками В-поля

HTS SQUID являются одним из многочисленных датчиков В-поля, применяемых для разведки TEM. Другими используемыми датчиками являются ферромагнитные датчики и датчики на основе низкотемпературных сверхпроводников (LTS) SQUID. При сравнении этих датчиков важно сравнивать графики, получаемые в идентичных условиях. Одним из таких испытаний было испытание в Западной Австралии в 2004 г. (Le Roux, 2005). На рисунке 6 приведено сравнение между графиками на поздних временах, полученными с помощью низкошумного ферромагнитного датчика и датчика CSIRO HTS SQUID. Ясно, что отклик HTS SQUID менее шумный, чем у ферромагнитного датчика. На рисунке 7 показаны измеренные характеристики шума датчика CSIRO SQUID и малошумного ферромагнитного датчика. Поскольку порог шума ферромагнитного датчика приблизительно в 10 раз выше, чем порог шума для датчика CSIRO SQUID, отклик на поздних временах ферромагнитного датчика будет более шумным, чем отклик SQUID.

### Выводы

CSIRO разрабатывал датчики HTS SQUID для разведки TEM от лабораторных инструментов, в 1992, до аэросистем, использованных в 1997, и далее к разработке коммерческого продукта в 2003 г.

Успех применения CSIRO HTS SQUID в целях разведки TEM становится очевидным посредством докладов, выпущенных инвестиционными сообществами, как Канады, так и Австралии. Североамериканские компании, выпустили доклады, в которых упоминается успешные результаты съемок PEM-SQUID (в Канаде LANDTEM иногда называется PEM-SQUID) включая Starfields Resources, Nevada Star Resources Corp, и MetalCORP. В Австралии компания Agincourt Resources сообщает об успешной съемке LANDTEM в своем ежеквартальном отчете от 30 июня 2005.

### Благодарности

Мы хотели поблагодарить за сотрудничество и участие следующие компании и людей, которые работали с нами над разработкой системы HTS SQUID для TEM: Falconbridge, Crone Geophysics and Exploration, Outer-Rim Exploration Services, Process Control Engineering, Southern Geoscience Consultants, LionOre Mining International, Condor Consultants, BHP Billiton, и Fugro Ground Geophysics. Также мы хотели бы выразить признательность всем нашим коллегам в CSIRO, прошлым и настоящим, кто сыграл роль в разработке LANDTEM.

## Рудная геофизика

## Ссылки

- Braginski, A. [2003] ISEC 2003 Reflections on the conference, *Supercond. Sci. Technol.*, 16, 1315-1319. Collins, S., 2001, Tritton Copper Deposit, Girilambone NSW. A Geophysical Discovery. *Exploration Geophysics*, 32, 147-151.
- Foley, CP., Leslie, K.E., Binks, R., Lewis, C., Murray, W., Sloggett, G.J., Lam, S., Sankrityan, B., Savvides, N., Kat-zaros, A., Muller, K.-H., Mitchell, E.E., Pollock, J., Lee, J., Dart, D.L., Asten, M., Maddever, A., Panjkovic, G., Downey, M., Hoffman, C. and Turner, R. [1999] Field trials using HTS SQUID magnetometers for ground-based and airborne geophysical applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9, 3786-3792.
- Lee, J.B., Turner, R.J., Downey, M.A., Maddever, A., Dart, D.L., Foley, CP., Binks, R., Lewis, C., Murray, W., Panjkovic, G., and Asten, M. [2001] Experience with SQUID magnetometers in airborne TEM surveying. 32, 009-013.
- Lee, J.B., Dart, D.L., Turner, R.J., Downey, M.A., Maddever, A., Panjkovic, G., Foley, CP., Leslie, K.E., Binks, R., Lewis, C. and Murray, W., [2002] Airborne TEM Surveying with a SQUID Magnetometer Sensor. *Geophysics*, 67, 468-477.
- Le Roux, CL. [2005] The Development of Low Temperature SQUID Systems for Geosciences. *SAGA Monthly talk (July)*, [http://www.sagaonline.co.za/monthiy\\_talks.htm](http://www.sagaonline.co.za/monthiy_talks.htm) Leslie, K.E., Binks, R.A., Foley, CP., Thorn, R.G., Roberts, M.J., Du, J., Mitchell, E.E., Lam, S.K.H., Lewis, C.J., Millar, C. and Osmond R.T. [2003] Operation of a Geophysical HTS SQUID System in Sub-Arctic Environments. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13, 2, 759-762.
- McCracken, K.G., Oristaglio, M.L., and Hohmann, G.W. [1986] Minimisation of noise in electromagnetic exploration. *Geophysics*, 51, 810-8.
- Osmond, R.T, Watts, A.H., Ravenhurst, W.R., Foley, CP., and Leslie, K. E. [2002] Finding nickel from the B-field at Raglan -To B or not to B', *CSEG Recorder*, 27, 9, 45-48. Panaitov, G., Bick, M., Zhang, Y., and Krause, H.-J. [2002] Peculiarities of SQUID magnetometer application in TEM. *Geophysics*, 67, 3, 739-745.
- Spies, B.R. [1999] Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*, 54, 872-888.