

Опыт применения оверхаузеровских магнитометров при поисках коренных и рассыпных месторождений золота и алмазов

Л.А. Муравьев* (Институт геофизики УрО РАН, Уральский федеральный университет), В.А. Сапунов (Уральский федеральный университет), Е.Д. Нархов (Уральский федеральный университет, ООО «Квантум Магнетик Пайп тест»), И.М. Хасанов (Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН)

Введение

Чувствительность и разрешающая способность современной геофизической аппаратуры в настоящее время напрямую определяет эффективность применения геофизических методов. Прирост запасов полезных ископаемых сейчас зачастую связан с выявлением месторождений, которые ранее не были обнаружены из-за слабой дифференциации поисковых признаков. Следуя терминологии А.А. Никитина, объектом производственных геофизических исследований в настоящее время все чаще являются геологические слабоконтрастные объекты – неоднородности строения геосреды, слабо проявляющиеся в измеряемых приборами полях. Сложность изучения таких объектов связана с тем, что измерения происходят на фоне помех различной природы.

Магнитометрия является одним из наиболее оперативных и экономичных геофизических методов. Примерами объектов, доступных для исследования высокочувствительными скалярными магнитометрами, могут быть: пространственные неоднородности в верхней части геологического разреза; глубоко залегающие протяжённые геологические тела рудного типа; культурный слой археологических памятников; искусственные магнитные объекты. Мы приводим результаты применения современных ядерно-прецессионных магнитометров на базе процессорного оверхаузеровского датчика POS (Processor Overhauser Sensor) для исследования коренных и рассыпных месторождений золота и алмазов в различных регионах России, а также в республике Ангола.

Оверхаузеровский ядерно-прецессионный магнитометр MMPOS

Магнитометр разработан и изготавливается серийно с 1997 года (Denisov at al., 1999, Sapunov at al., 2001) лабораторией квантовой магнитометрии Уральского федерального университета, претерпевая модернизации. Принцип действия датчика основан на регистрации сигнала свободной прецессии протонов, поляризация которых усилена методом динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера по иностранной терминологии). Отличительные особенности датчика: стабильность рабочего вещества, работоспособность в ураганных градиентах магнитного поля (до 10000, отдельные модели до 20000 нТл/м), отсчетная величина поля 0,001 нТл. Обработка сигнала осуществляется оптимизированным методом наименьших квадратов с применением адаптивных алгоритмов повышения чувствительности, градиентоустойчивости. Одна из отличительных особенностей – применение алгоритма количественного контроля чувствительности по дисперсии периодов сигнала прецессии (параметр качества измерения QMC) (Denisov at al., 2006, Denisov at al., 2014, Sapunov at al., 2015a) [2-5]. Имеются варианты: градиентометр (POS-2), измеритель вертикальной компоненты и модуля поля POS-3, трехкомпонентная векторная модификация POS-4 (Sapunov at al., 2016) и уникальный, не имеющий аналогов, скважинный магнитометр LOM-2 (Sapunov at al., 2015b). Магнитометр LOM-2 нашёл применение в ряде отечественных (например, АЛРОСА) и зарубежных организациях (Китай) на месторождениях слабomagнитных руд (кимберлиты, бокситы, золото). Специальная облегченная версия стандартного датчика POS (модификация POS-1aero) изготовлена для применения при аэромагниторазведке с борта беспилотного летательного аппарата (разработка совместно с ИРНТУ [13], г. Иркутск, Parshin at al., 2018).

Магнитометры серии POS имеют только цифровой порт RS-232 для управления и выдачи результатов с открытым протоколом, позволяющим подключать различные регистраторы, начиная от стандартных ПК, укомплектованных специализированным ПО POSManager – такая модификация обычно используется на магнитных обсерваториях, вариационных станциях и в пользовательских системах. Полевой наземный вариант (мобильный магнитометр) MMPOS-1GPS включает в состав специализированный регистратор (Data Logger) DLPOS, комплектующийся GPS-приёмником Garmin 78 или пользовательскими более высокоточными системами навигации.

Эксперименты, проведенные в лаборатории и обсерваториях, подтверждают абсолютную точность магнитометра POS-1 до 0,1-0,5 нТл, чувствительность 0,02 нТл. Метрологическое обеспечение магнитометров POS выполняется со сличением относительно Государственного Эталона единиц магнитной индукции ГЭТ 12-2011 (ВНИИ Метрологии им. Д.И. Менделеева) в отличие от иностранных магнитометров, которые поверяются за редким исключением. Полевые экспериментальные исследования метрологических характеристик магнитометров POS по сравнению с аналогичными лидирующими иностранными магнитометрами подтвердили высокую стабильность измерений при длительных наблюдениях, что является важным при изучении векового хода магнитного поля и геодинамических процессов.

Общая характеристика магнитометрической съемки с применением магнитометров POS

С помощью комплекта магнитометров, один из которых является пешеходным – перемещается по исследуемой площади, а другой используется в качестве вариационной станции, создан комплекс, позволяющий качественно и оперативно проводить геомагнитные съемки местности. В качестве пешеходного магнитометра может быть использован градиентометр с двумя датчиками, расположенными на различной высоте. В этот комплекс входит также и программное обеспечение SURV для учета вариации геомагнитного поля за время наблюдения, пересчета координат (из геодезических в прямоугольные), оценки качества и точности съемки, построения графиков и карт изолиний магнитного поля.

Предполагается два режима выполнения магнитометрической съемки: съемка по заранее подготовленным пикетам или без пикетов с применением спутниковой топопривязки (непрерывный режим). Также может применяться смешанная методика: перемещение между пикетами с измерениями в непрерывном режиме и отдельное измерение на пикете с записью его номера и координат. В таком случае в ходе камеральной обработки из файла результатов можно выделить координаты пикетов и значения магнитного поля, измеренные на них.

При выполнении съемок повышенной точности для гарантии исключения указанной помехи можно рекомендовать проводить съемку двумя операторами, один из которых позиционирует датчики, второй – держит устройство накопления данных на удалении не менее 5 м от них, управляя процессом измерения. Такая технология опробована нами при высокоточных съемках на археологических объектах (Martyshko et al., 2010).

Спутниковая технология определения координат точек измерения обеспечивает высокую точность и производительность, всепогодность, возможность работы в темное время суток. При этом каждое измерение магнитного поля сопровождается топопривязкой точки наблюдения. Обработка результатов включает в себя сохранение данных на компьютере (при помощи программы DLLink, входящей в комплект магнитометра), учет вариации, и построение карты, и может быть проведена в камеральных условиях, непосредственно на объекте. Эти действия выполняются с помощью программы Surv, результат работы которой – текстовый файл со значениями измеренного поля, исправленными за вариацию и координатами в прямоугольной системе. Его можно использовать для построения карт изолиний и графиков магнитного поля.

Нами накоплен значительный опыт применения магнитометров POS для решения различных геофизических задач, среди которых: поиск и разведка полезных ископаемых (россыпное и рудное золото, углеводороды, кимберлиты); поиск и обнаружение ферромагнитных объектов в укрывающих средах – техногенные объекты, газопроводы (Narkhov at al., 2010), а также внеземное вещество – метеориты, (Narkhov at al., 2016); картирование археологических памятников, на примере укрепленных поселений эпохи Бронзы на Южном Урале.

Исследование коренного месторождения золота на Курильских островах

Высокоточная пешеходная магнитная съемка показала свою эффективность в комплексе геофизических работ (совместно с электроразведочными методами) с целью изучения на золото и серебро одного из перспективных участков на Курильских островах. Магнитометрической съемкой двух высот (2 и 2,5 м) с детальностью по профилю 3-5 м и расстоянием между профилями 50-100 м была покрыта площадь 2,5 кв.км. Определение координат точек съемки осуществлялось приемником GPS, сопряженным с магнитометром. По результатам анализа результатов был определен поисковый признак, позволяющий дифференцировать перспективные на золото кварциты от вмещающих незолотоносных пород: выявляемая по разрезу ВЭЗ толща пород с низкой проводимостью, область относительно однородного магнитного поля, отрицательная аномалия естественного поля.

На рис. 1 показан пример сопоставления результатов трех методов: ЕП, ВЭЗ и магнитная съемка на одном из профилей. Соответствие аномалий указывает на область распространения кварцитов. Как показали исследования магнитных свойств керна пробуренных скважин, относительно однородное магнитное поле над зоной распространения вторичных кварцитов объясняется их низкой магнитной восприимчивостью. Причем карта магнитного поля позволяет ограничить эту область в плане, а результаты ВЭЗ показывают мощность пласта, что дает возможность оценить запасы. Указанный комплекс признаков позволил выявить в пределах исследуемого объекта четыре области, перспективные на золотое оруденение.

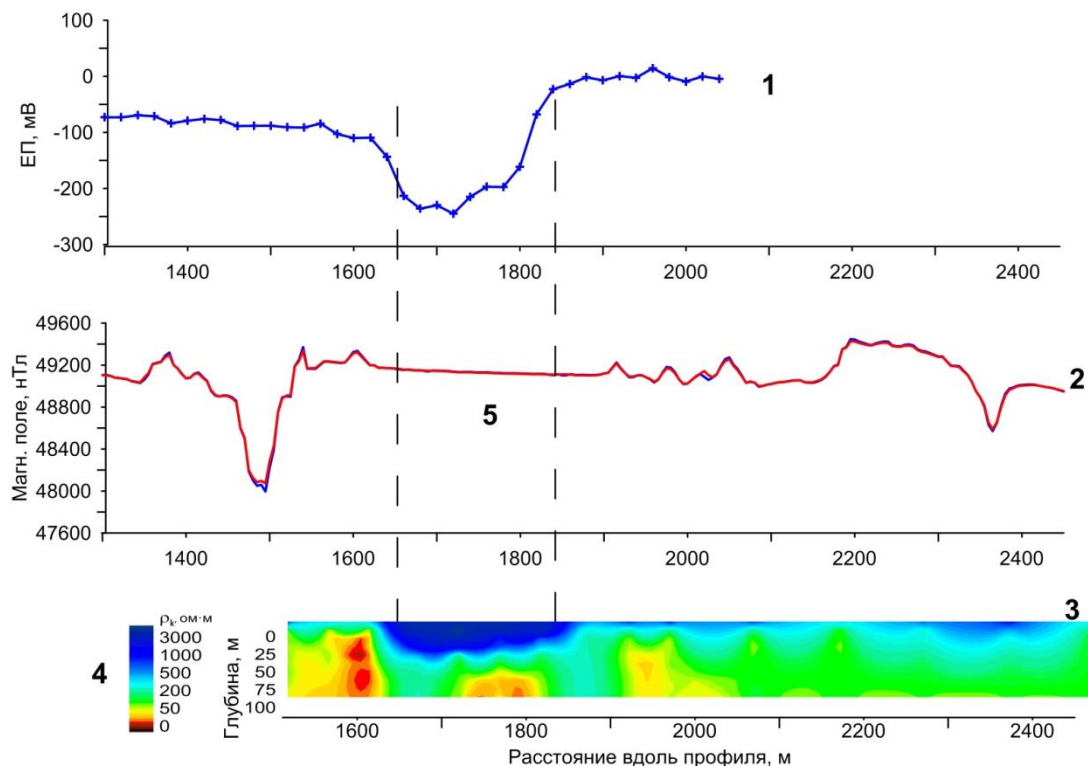


Рисунок 1. Сопоставление результатов геофизических методов по одному из профилей. 1 - ЕП, 2 - магнитное поле, 3 - ВЭЗ, 4 - шкала кажущегося сопротивления ВЭЗ, 5 - область залегания кварцитов.

Поиск рудных месторождений золота в магаданской области

Территория Магаданской области входит в число крупнейших золотосеребряных провинций мира. За 80 лет из ее недр добыто около 3 тысяч тонн золота, в основном из россыпных месторождений (90% от общего количества). С 1975 года добыча золота из россыпей неуклонно уменьшается из-за снижения сырьевой базы этого типа месторождений. Перспективы добычи драгоценных металлов из рудных месторождений значительно выше, несмотря на более сложные технологии их извлечения. Поиск и разведка новых рудных месторождений на этой территории – чрезвычайно актуальная задача.

Целевым назначением работ, проведенных ООО «Золотодобывающая корпорация» в 2012–2014 гг. являлась локализация участков, перспективных на выявление крупнообъемных месторождений золота на Тохтинской перспективной площади в границах лицензии, уточнение геологического строения, определение положения рудоконтролирующих структур, выявление возможной золотой минерализации в межжильном пространстве с последующей оценкой прогнозных ресурсов золота. Основным направлением работ было выявление большеобъемного золотого оруденения, в том числе штокверкового типа, предпосылки к которому были установлены предыдущими исследователями. Для решения этих задач геофизическими методами предусмотрен комплекс, включающий электроразведку методами СГ-ЧД, ВЭЗ-ВП, ЗСБ и магниторазведку (Muravyev et al, 2015).

Магниторазведочные работы проводились для разделения геологических разностей пород по магнитным свойствам, выделения зон тектонических нарушений, оценки элементов залегания магнитовозмущающих объектов, выявления и прослеживания ареалов и зон гидротермально измененных пород, отдельных маломощных тел гидротермалитов и кварцевых жил. Использовались пешеходные оверхаузеровские магнитометры MMPOS-1. Съёмка выполнялась по сети наблюдений 20×100 м на высоте 2 м.

На основе структурно-морфологического анализа магнитного поля и результатов электроразведочных работ составлена интерпретационная схема геофизических аномалий (рис. 2), которая позволила выделить следующие области.

1. Спокойное, ровное слабо отрицательное (от -5 до -35 нТл) магнитное поле, осложненное локальными аномалиями; дифференцированное, но в целом повышенное сопротивление (свыше 5000 Ом·м) соответствует интрузивному телу - гранитоидам Верхнеоротуканского массива.
2. Дифференцированные (от -100 до 150 нТл) магнитное поле, а также дифференцированное, но в целом пониженное (менее 4000 Ом·м) кажущееся удельное сопротивление соответствует контактово измененным осадочным породам в надынтрузивной зоне.
3. Линейные и овальные зоны пониженного сопротивления (2000–4000 Ом·м), расположенные в пределах интрузивного тела соответствуют зонам и областям метасоматической проработки, приуроченным к разрывным нарушениям.
4. Участки концентрации интенсивных положительных локальных магнитных аномалий отражают зоны контактовой гидротермально-метасоматической проработки с привнесом магнитных минералов, зоны пирротиновой минерализации.
5. Участки концентрации локальных отрицательных (от -70 до -220 нТл) магнитных аномалий отождествляются с зонами интенсивных метаморфических изменений и контактовой гидротермально-метасоматической проработки, возможно с привнесом магнитных минералов «обратного» намагничивания.
6. Линейные аномалии пониженного сопротивления (менее 2000 Ом·м) в пределах вмещающих осадочных пород - зоны дробления и трещиноватости.
7. Линии нарушения корреляции геофизических аномалий. Разрывные нарушения.

8. Локальные положительные аномалии коэффициента частотной дисперсии (Кчд) - области и зоны сульфидной минерализации.
9. Локальные отрицательные аномалии Кчд - зоны площадного окварцевания.
10. Кварцевые жилы (1), их развалы (2) и точки минерализации (3)
11. Прогнозируемые золоторудные жилы.

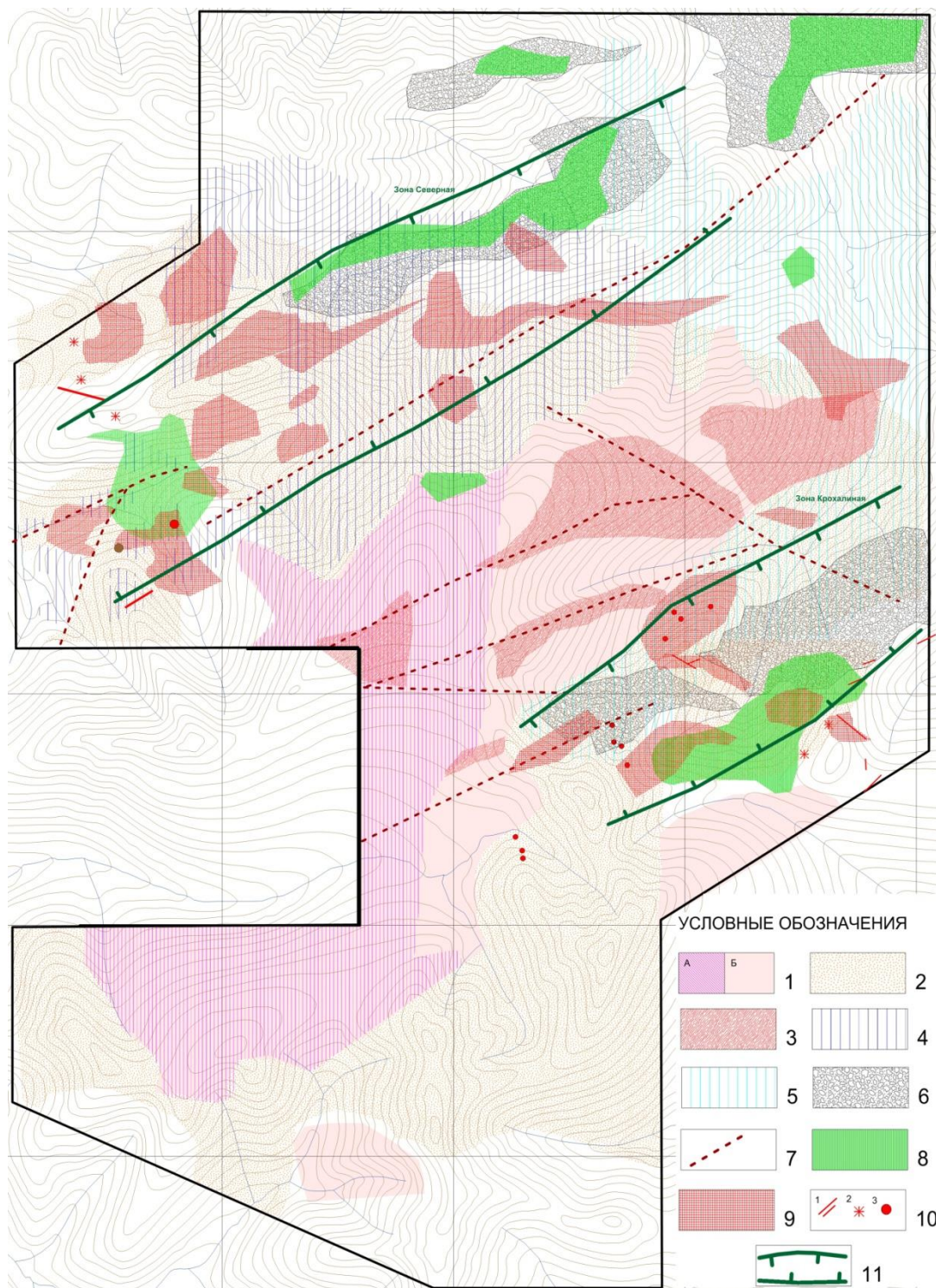


Рисунок 2. Участок Крохалинский. Схема интерпретации геофизических данных. Условные обозначения разъяснены в тексте выше.

Не исключено, что отрицательные аномалии с интенсивностью свыше -300 нТл могут быть связаны с магнитными (пирротинизированными) породами, которые обладают обратным намагничиванием. Пространственное совпадение выявленных проявлений золота и отрицательных магнитных аномалий дает возможность предположить, что формирование оруденения происходило в интервал времени, совпадающий с инверсией магнитного поля Земли. Возможно, интенсивные отрицательные магнитные аномалии могут являться одним из важнейших признаков процессов рудообразования на исследуемой территории.

Известные точки рудной минерализации пространственно совпадают с локальными положительными и отрицательными аномалиями коэффициента частотной дисперсии (Кчд). Участки распространения интенсивных локальных положительных (предположительно определяющих сульфидизацию) и отрицательных (предположительно связанных с площадным окварцеванием) аномалий Кчд можно рассматривать как перспективные. По данным электропрофилеирования, по указанным критериям выделяются зоны площадной (штокверкоподобной) кварц-сульфидной минерализации, которые сопровождаются золоторудными и оловорудными проявлениями, а также точками рудной минерализации.

В ходе проведения поисковых работ установлено, что вмещающие золотое оруденение зоны характеризуются незначительными размерами. При мощности в первые метры, прослежены на первые сотни метров по простиранию и первые сотни метров на глубину. Оруденение в зонах распределено крайне неравномерно, все установленные прогнозируемые рудные тела, в основном, жильно-прожилкового типа. В пределах изученных участков Тохтинской площади локализованы и оценены прогнозные ресурсы золота категории P2 - 18,3 т. Золотое оруденение Тохтинской площади отнесено к золото-редкометалльной и золото-кварцевой формациям. На основе комплексного анализа выявлено, что добыча рудного золота по данному участку не рентабельна. Это связано с трудной извлекаемостью рудного золота, его достаточно малым содержанием в коренных породах и в кварцевых жилах, что доказано бурением скважин и опробованием коренных пород.

Поиск и разведка коренных и рассыпных месторождений алмазов.

Магниторазведка является одним из основных геофизических методов, применяемых при поисках месторождений алмазов. Методика наземной магнитометрии с применением магнитометров POS была опробована на перспективных площадях горно-рудного общества «Катока» в республике Ангола, для разбраковки выявленных аэромагниторазведкой аномалий.

Проведенная в 2004 году ООО «Аэрогеофизика» детальная аэромагнитная съемка масштаба 1:5000 на территории концессии показала свою высокую эффективность, благодаря которой открыты 13 новых кимберлитовых тел. Вместе с тем, открытие новой кимберлитовой трубки Чиузо, показало, что отдельные кимберлитовые тела не отражаются в магнитном поле. В данном случае, кимберлитовая трубка перекрыта слоем сильномагнитных пород (латеритов) мощностью до 4 метров, аномальное поле которого перекрывает эффект от расположенных ниже кимберлитов. По данным каротажа магнитная восприимчивость кимберлитов в среднем $250 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а магнитного слоя перекрывающих пород до $2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Кроме того, в числе геологических задач актуальными являлись поиски и разведка аллювиальных месторождений алмазов. Предполагается, что продуктивные аллювиальные отложения, обогащенные магнитными минералами спутниками алмазов должны вызвать слабые отражения в магнитном поле.

Наземная магнитометрическая съемка проводилась без разбивки сети с определением координат точек наблюдения с помощью навигационного приемника GPS, конструктивно соединенного с магнитометром. Магнитное поле измерялось в повысотном варианте (градиентометрии) на двух высотах – 0.5 м и 3 м.

Сравнение результатов наземных и аэромагнитных съемок позволяет заключить, что наземная градиентометрическая магнитная съемка позволяет детализировать выявленные аэромагнитометрией аномалии, разделить аэромагнитные аномалии от нескольких объектов выделить вызывающие их источники (рис. 3). Качественная интерпретация выявленных аномалий возможна с применением геологической информации. Карты магнитного поля вблизи поверхности и градиента магнитного поля помогут геологу выделять источники аномального поля и разделять их по глубине. Однако в конкретных условиях участка Чиузо, в связи с наличием сильномагнитного слоя четвертичных отложений количественная интерпретация осложнена, т.к. этот слой экранирует влияние менее магнитных и более глубокозалегающих источников. Один из вариантов интерпретации предложен с применением адаптивного метода решения обратной задачи магнитометрии (Kochnev, et al., 2008).

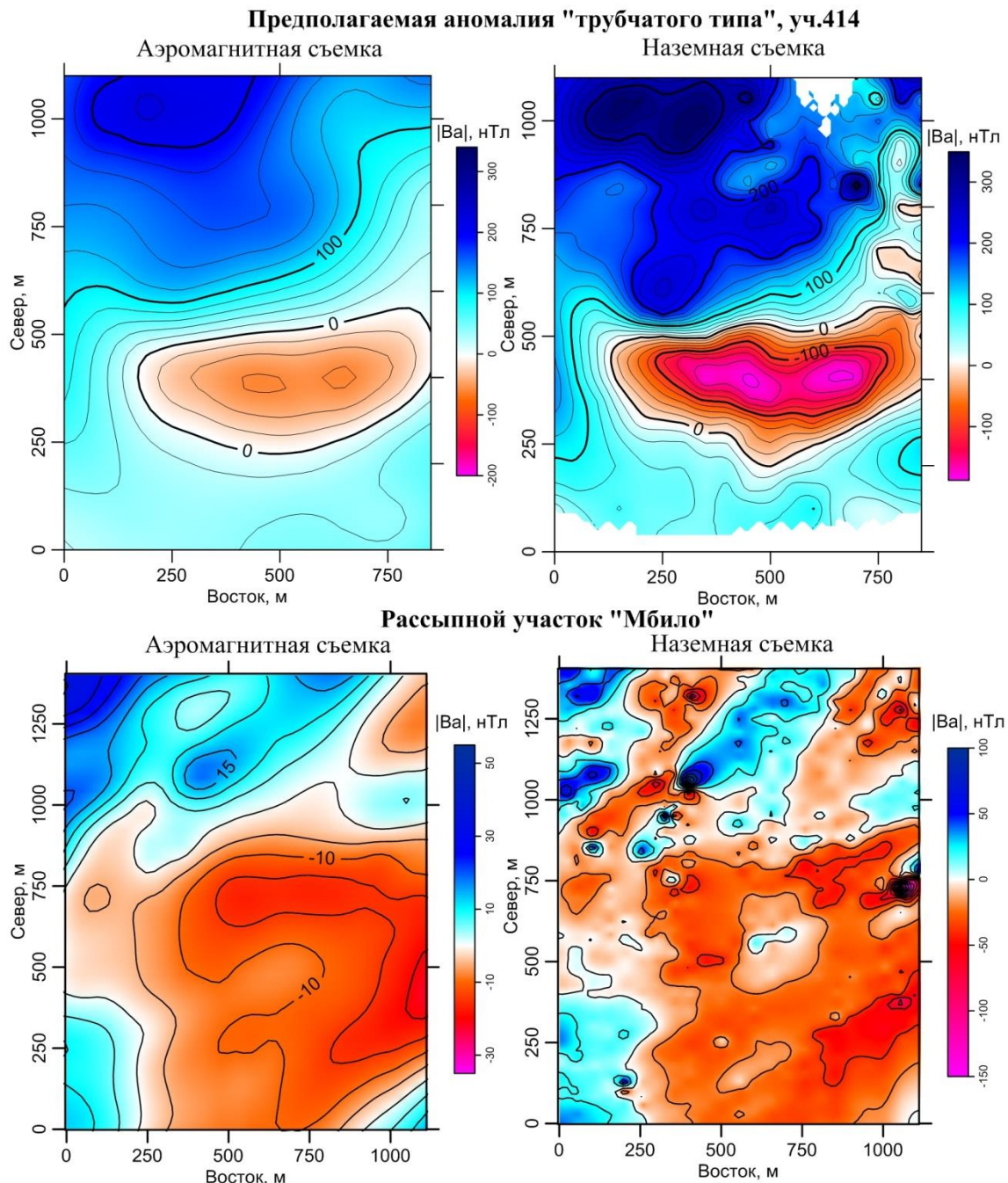


Рисунок 3. *Сопоставление результатов аэромагнитной (высота около 70 м) и наземной (3 м) съемок при разбраковке аномалий «трубчатого типа» и исследовании участка аллювиального месторождения алмазов.*

Выводы

В настоящее время геофизикам доступен готовый комплекс современной высокочувствительной и производительной магнитометрической аппаратуры и методики ее применения, показавший свою эффективность при решении актуальных задач поисков и разведки рудных и рассыпных месторождений золота и алмазов. Разработанная методика пешеходной магнитной съемки с определением координат с помощью навигационного приемника GPS позволяет эффективно выделять поле от слабоконтрастных магнитных объектов на фоне более протяженных и интенсивных аномалий геологической среды. Наземная магнитная съемка эффективна при детализации и разбраковке обнаруженных с помощью аэромагнитной съемки аномалий при поисках коренных и рассыпных месторождений алмаза. Выявляемые в результате детальной съемки в непрерывном режиме микромагнитные аномалии позволяют локализовывать неоднородности геологической структуры в верхней части разреза.

Благодарности

Обсуждаемые результаты полевых геофизических съемок получены при непосредственном участии авторов и получены от заказчиков и/или исполнителей работ. Результаты аэромагнитной съемки, выполненной ООО «Аэрогеофизика» в республике Ангола получены от заказчика работ – ГРО Катока. Автор выражает благодарность В.И.Поносову, руководителю МП «Электра», г.Южно-Сахалинск; коллективу департамента геологии ГРО «Катока», Ангола и Ж.Т.Феликсу.

Работа поддержана по программе повышения конкурентоспособности ТОП 5-100-2020, грант № 02.А03.21.0006, НГ «КОМВА - квантовые оверхаузеровские методы и аппаратура».

References

Denisov A., Sapunov V., Rubinstein B. [2014] Broadband mode in proton-precession magnetometers with signal processing regression methods. *Meas. Sci. Technol.* **25**, 055103 DOI: 10.1088/0957-0233/25/5/055103

Sapunov, V., Denisov, A., Denisova, O., Saveliev, D. [2001] Proton and Overhauser magnetometers metrology. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, **31** (1), 119-124.

Denisov, A.Yu., Sapunov, V.A., Dikumar, O.V. [1999] Calculation of the error in the measurements of a digital-processor nuclear-precession magnetometer. *Geomagnetism and Aeronomy*, **39** (6), 737-742.

Denisov, A.Y., Sapunov, V.A., Khomutov, S.Y. [2006] Measurement quality estimation of proton-precession magnetometers. *Earth, Planets and Space*, **58**(6), 707-710.

Muravyev, L.A, Ternovskiy, V.A, Khasanov, I.M. [2015] Geophysical complex for prospecting of alluvial gold deposits in the Magadan region. *XIVth International Conference – Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. DOI

Martyshko P.S., Noskewich V.V., Fedorova N.V., Muraviev L.A. [2010] Geophysical Researches on Excavations of the Bronze Age Fortified Settlement in Southern Ural Mountains *Near Surface 2010 - 16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* DOI: 10.3997/2214-4609.20144875

Narkhov E.D., Sapunov V.A., Denisov A.Y., Saveliev D.V. [2014] Novel quantum NMR magnetometer non-contact defectoscopy and monitoring technique for the safe exploitation of gas

pipelines. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* **186**, 649-658 DOI: 10.2495/ESUS140571

Parshin, A., Grebenkin, N., Morozov, V., Shikalenko, F., Sapunov V., Rzhetskaya A. [2018] Quasi-terrestrial UAV-based geophysical methods: Efficiency and role in geological prospecting. *Engineering and Mining Geophysics 2018 - 14th Conference and Exhibition* DOI

Narkhov E.D., Sergeev A.V., Milyukov D.N., Sapunov V.A. [2016] Magnetometric survey of LL5 Chelyabinsk meteorite in Lake Chebarkul. *Physics, technologies and innovation (PTI-2016)* DOI: 10.1063/1.4962599

Kochnev V.A., Muravev L.A. Goz I.V. [2008] Multi-level Magnitometry Contact Problem at Kimberlitic Field. *3rd EAGE St.Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences - Geosciences: From New Ideas to New Discoveries*. DOI: 10.3997/2214-4609.20146876

Sapunov, V, Narkhov, E, Fedorov, A, Sergeev, A, Denisov, A. [2015a] Ground overhauser DNP geophysical devices. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM*, 215-222

Sapunov, V., Narkhov, E., Denisov, A., Wu, T., Cao, X. [2015b] A gradient tolerance measurement method of borehole overhauser magnetometer LOM-2 in laboratory condition. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM*, 29-36.

Sapunov, V.A., Denisov, A.Y., Saveliev, D.V., Soloviev, A.A., Khomutov, S.Y., Borodin, P.B., Narkhov, E.D., Sergeev, A.V., Shirokov, A.N. [2016] New vector/scalar overhauser DNP magnetometers POS-4 for magnetic observatories and directional oil drilling support. *Magnetic Resonance in Solids*, **18**(2), 16209