

## Технологии геологической разведки

УДК 550.838

### ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ГРАДИЕНТОМЕТРИИ ПРИ ПОИСКАХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

И.Г. Татьков<sup>1</sup>, П.А. Предеин<sup>2</sup>, А.Г. Дмитриев<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2</sup>Геологический институт СО РАН, 670047, Россия, респ. Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

Развитие аппаратно-технической базы привело к появлению новых возможностей применения широко известных методов, одним из которых является модификация магниторазведки – магнитная градиентометрия. Применение данной методики повышает эффективность выполнения магниторазведочных работ без увеличения их стоимости за счет измерения вертикального градиента полного вектора магнитного поля, применения записи с высокой дискретизацией, а также привязкой точки записи с помощью GPS. В ходе работы удалось решить проблему искажений привязки точки записи, связанных с погрешностями измерения GPS, важную при создании сети площадных наблюдений, при построении планов графиков за счет использования модуля интерполяции из библиотеки SciPy, позволяющего интерполировать данные в неструктурированном  $N$ -мерном массиве. Применение этого алгоритма обеспечивает нормализацию и привязку данных вдоль профиля геофизических исследований, тем самым нормализуя привязку полученных аномальных объектов для применения их в профильной и площадной интерпретации без потери качества. В работе показаны возможности метода при изучении строения золоторудных месторождений. Успешно выделяются такие аномальные объекты, как зоны контакта между породами с различными литологическими разностями, тектонические нарушения, зоны гидротермальной проработки, что в сочетании с высокой степенью дискретизации позволяет оперативно решать основные структурные задачи. Выделенные аномальные объекты имеют высокую степень корреляции с результатами горно-буровых и детальных геофизических работ, рассмотренных на примере месторождения Харанур. Таким образом, применение методики становится целесообразным для детальной регистрации изменений магнитного поля с минимальной погрешностью в условиях площадных и профильных геофизических исследований в составе комплекса детализационных методов.

*Ключевые слова:* магниторазведка; магнитная градиентометрия; профильные геофизические работы; Восточный Саян; Харанур; Хохюрта.

### MAGNETIC GRADIOMETRY APPLICATION FEASIBILITY IN SEARCHING GOLD ORE DEPOSITS

I.G. Tatkov, P.A. Predein, A.G. Dmitriev

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Geological Institute SB RAS, 6a Sakhyanova St., Ulan-Ude, Buryat Republic, 670047, Russia.

Development of hardware and technical base led to the emergence of new application options for widely known methods. One of them is magnetic gradiometry that is a modification of magnetic exploration. Application of this technique increases the efficiency of magnetoprospecting without increase in its cost due to the measurement of the vertical gradient of the magnetic field full vector, application of record with high sampling and GPS-binding of the record point. In the course of works the authors succeeded to solve the problem of distortions in record point

<sup>1</sup>Татьков Иван Геннадьевич, аспирант кафедры технологий геологической разведки, e-mail: tatkovgeo@gmail.com

Tatkov Ivan, Postgraduate of the Department of the Technologies of Geological Exploration, e-mail: tatkovgeo@gmail.com

<sup>2</sup>Предеин Петр Алексеевич, аспирант, e-mail: crmpeter@gmail.com

Predein Petr, Postgraduate, e-mail: crmpeter@gmail.com

<sup>3</sup>Дмитриев Александр Георгиевич, профессор кафедры технологий геологической разведки, e-mail: dmitriev@istu.edu

Dmitriev Aleksandr, Professor of the Department of the Technologies of Geological Exploration, e-mail: dmitriev@istu.edu

binding associated with the errors in GPS measurements. It is important in the creation of the network of areal measurements, when building scheduled plans through the use of the Scipy library interpolation module that allows to interpolate data in the unstructured N-dimensional massif. Application of this algorithm provides normalization and data binding along the profile of geophysical surveys enabling normalization of the binding of the obtained abnormal objects for their application in profile and area interpretation without quality loss. The work demonstrates the potential of the method when studying the structural configuration of gold fields. It enables successful identification of such abnormal objects as contact zones between rocks of various petrotypes, faulting, zones of hydrothermal impact that in combination with high degree of sampling allows to solve the main structural tasks immediately. Identified abnormal objects have a high degree of correlation with the results of drilling and detailed geophysical works considered on the example of the Haranur field. Thus, the application of the method becomes feasible for the detailed registration of magnetic field changes with the minimum error under conditions of area and profile geophysical surveys as a part of the complex of detailed methods.

*Keywords: magnetometry; magnetic gradiometry; specialized geophysical surveys; Eastern Sayan; Haranur; Hohyurta.*

**Введение.** Магниторазведка по-прежнему остается наиболее массовым и информативным методом геофизических исследований, применяемым для изучения структуры рудных объектов. Тем не менее применение только одной магниторазведки для решения задач картирования отдельно от комплекса геофизических методов ограничивается высокой степенью неоднозначности решения обратной задачи.

Магнитная градиентометрия является дальнейшим развитием магниторазведки путем добавления дополнительного измерительного канала [1]. В результате производится измерение модуля как полного вектора магнитного поля, так и вертикального или горизонтального градиента. Основным достоинством метода является возможность разбраковки глубинных и поверхностных объектов за счет единовременного измерения магнитного поля на разных высотных уровнях и, как следствие, более высокая помехоустойчивость, а также выделение в поле маломощных неоднородных объектов и границ основных структурных комплексов. Развитие технологий позволило добиться повышения эффективности магниторазведки путем применения режимов непрерывной записи, привязки точки записи в пространстве с помощью GPS/GLONASS.

Работы выполняются в пешеходном варианте современными оверхаузевскими магнитометрами – градиентометрами ММПОС-2 – при непрерывной записи магнитного поля или на частотах 0,25–1 Гц с автоматической привязкой

точки записи по GPS/GLONASS. При движении в режиме измерения вертикального градиента датчики располагались на высотах не ниже 50 см для нижнего датчика и не выше 230 см для верхнего. Таким образом, используемая при съемке база градиентометра составляла 180 см. Данные геометрические параметры позволяют получить максимальные значения градиента для пешеходной съемки [1]. В качестве вариационных станций использовались магнитометры ММПОС-1.

Основными задачами метода при поисках является выделение зон приконтактовых изменений, колчеданных тел для геологического картирования границ различных геологических формаций. Метод также применяется для выделения в слабо дифференцированном магнитном поле отложений, обогащенных магнетитом (черный шлик при поисках россыпных объектов), отбраковки близповерхностных аномалий и уточнения поисковых геофизических критериев и признаков. Наибольшую эффективность методика показала при изучении горизонтальных неоднородностей разреза и выделении зон околорудных изменений.

В данной статье рассматриваются результаты измерения вертикального градиента полного вектора магнитного поля как фактора, повышающего эффективность проведения магниторазведочных работ без увеличения их стоимости [2]. Примером могут служить рассматриваемые профильные работы, сопровождавшие другие детальные геофизические

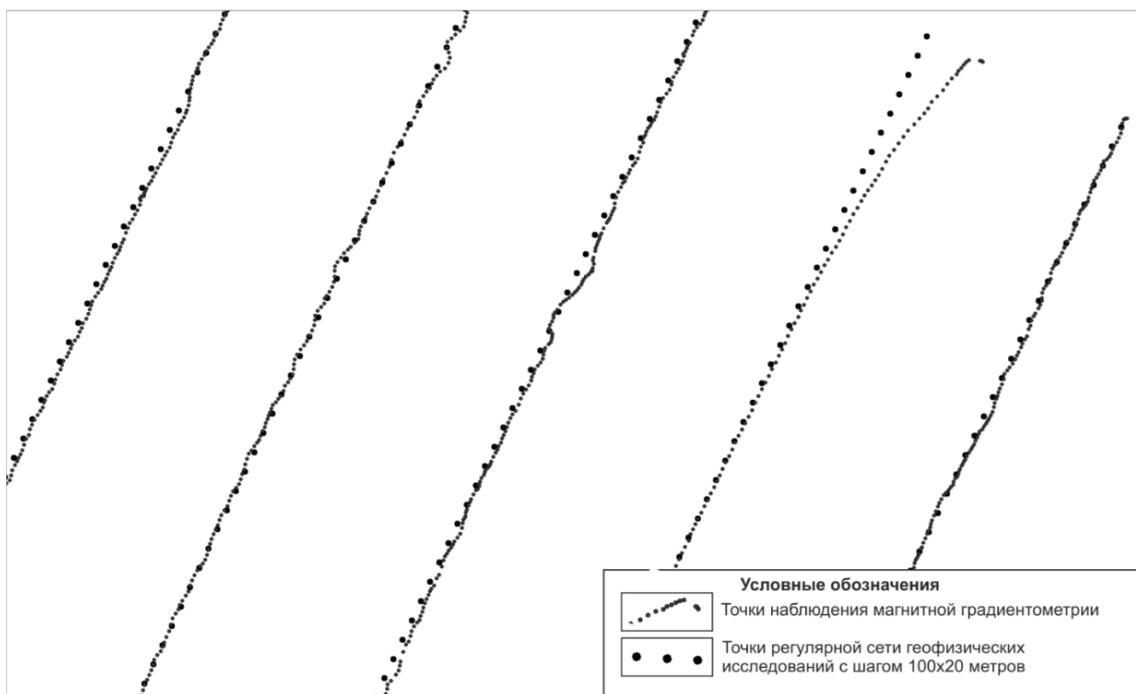
методы, такие как электротомография и гамма-спектрометрия.

**Математическое обеспечение визуализации результатов магнитной градиентометрии.** При проведении полевых работ методом магнитной градиентометрии регистрация данных производится в режиме непрерывной записи с частотой 0,2–1 Гц, что обеспечивает необходимую детальность для выявления объектов с малой мощностью. Тем не менее применение этого типа регистрации требует приведения полученных данных в удобный для визуализации формат. Данная особенность связана с погрешностью измерения координат GPS в пределах 10 метров, что создает отклонения точек наблюдений от исходной сетки (рис. 1). При этом решение указанной задачи сводится к привязке к регулярной сетке исходных данных наблюденных значений, имеющих как минимум три параметра (широта и долгота в определенной системе координат и значение наблюдаемого параметра).

Вычислительная сложность алго-

ритма решения задачи поиска ближайшего или среднего значения координатной привязки путем прямого перебора параметров в матрице  $M \times N$  возрастает экспоненциально с увеличением ее размерности, т.е. эта задача относится к классу NP-полных. Поэтому для решения требуется предварительно определить границы геофизических профилей с учетом исходной регулярной сетки, относительно которой будет проводиться интерполяция. Процедура состоит из следующих этапов:

1. Определение исходного массива координат и значений наблюдаемых данных, координат профилей и пикетов регулярной сетки.
2. Получение исходных координат каждого профиля регулярной сетки.
3. Выделение наблюдаемых значений для соответствующего профиля из массива данных.
4. Интерполяция значений наблюдаемых данных для регулярной сетки координат профиля.
5. Сохранение полученных данных.



*Рис. 1. Пример погрешности измерений, связанной с ошибками привязки координат в пространстве*

Реализация данного алгоритма выполнена на языке программирования Python, имеющем большое количество разработанных математических библиотек линейной алгебры, решений задач оптимизации и средств графического представления результатов и использующимся для создания скриптов как для коммерческих геоинформационных программных продуктов, например ArcGIS, так и для свободно распространяемого QGIS (QuantumGIS).

В реализации алгоритма используется модуль интерполяции из библиотеки Scipy, позволяющий интерполировать данные в неструктурированном  $N$ -мерном массиве [4]. На входе функции передаются координаты исходных точек и значения геофизического поля в них  $T$ , а также новые координаты, для которых требуется получить значения поля. Функция может использовать метод линейной интерполяции, интерполяцию кубическим сплайном и поиска значения в ближайшей точке данных (рис. 2). Применение этого алгоритма обеспечивает нормализацию и привязку данных вдоль

профиля геофизических исследований, тем самым обеспечивая привязку полученных аномальных объектов для использования их в профильной и площадной интерпретации без потери качества.

**Основные типы аномальных объектов, выделяемых при профильной съемке магнитной градиентометрии на золоторудных объектах.** По итогам опытно-методических работ на территории рудопроявления Харанур в Восточном Саяне, Черная Бирюса и Хохюрта в Закаменском золоторудном узле установлена зависимость амплитудно-частотных характеристик поля значений магнитного градиента. Анализ полученных данных, результаты горно-буровых работ показали возможность выделения в разрезе незначительных неоднородностей в виде локальных интенсивных аномальных объектов. Например, локальный пик в районе скважин 19, 20 объясняется резкой сменой состава вмещающей среды с углеродистых сланцев на доломиты с выраженной зоной дробления (рис. 3).

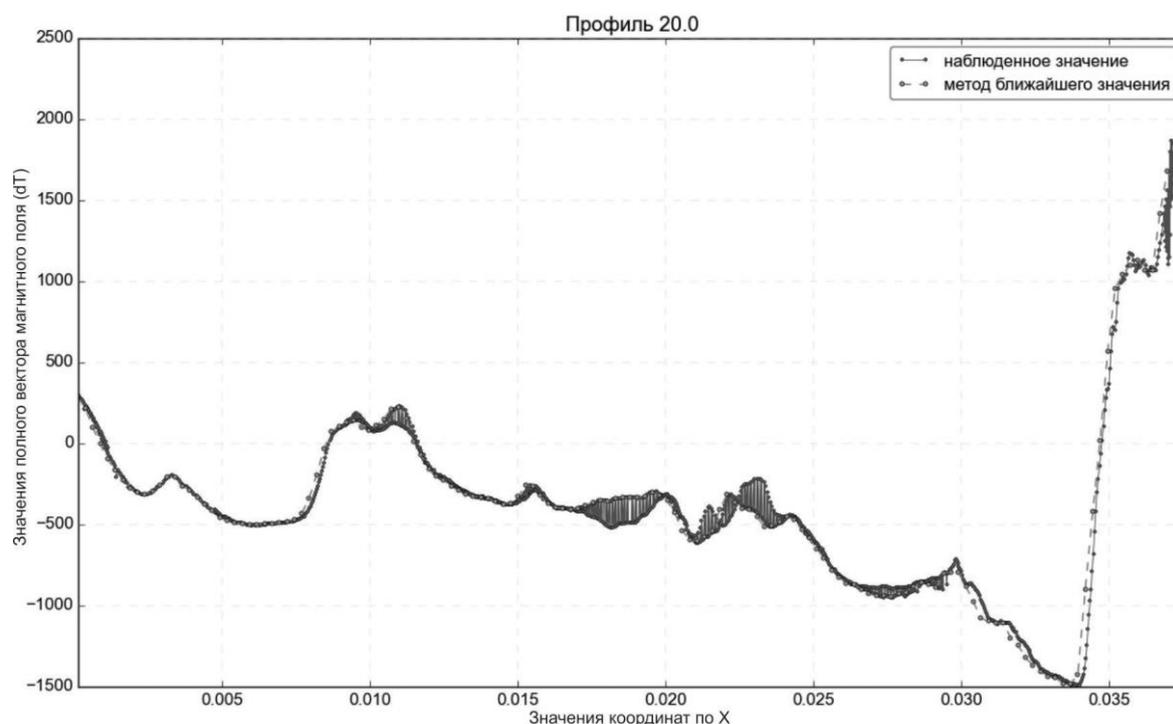


Рис. 2. Сравнение исходных данных магнитного поля  $dT$  с результатами интерполяции

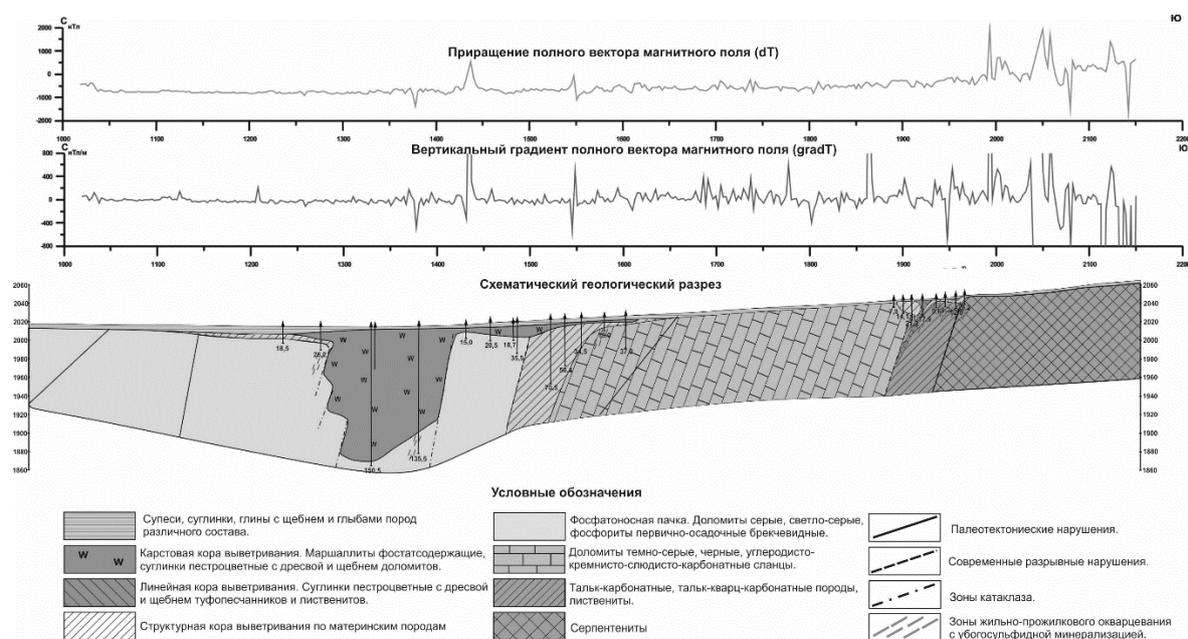


Рис. 3. Сравнение результатов магнитной градиентометрии с данными буровых работ на участке Харанур (использован геологический разрез А.А. Миронова)

В целом были определены следующие геологические объекты, выделяемые при съемке магнитной градиентометрии полем вертикального градиента:

1. С зонами контакта, осложненными тектоническими нарушениями, связаны сгущения изолиний приращения полного вектора магнитного поля  $dT$ , резкие скачки глубины залегания магнитных пород, смещение осей аномалии  $dT$ . В поле значений вертикального градиента магнитного поля  $gradT_v$  границы «древней» зоны дробления выделяются локальными аномалиями небольшой мощности амплитудой 100–200 нТл/м в зависимости от типа вмещающей среды и процессов метасоматоза. Пример данного объекта можно наблюдать на рис. 5 в виде интенсивной аномалии  $dT$  в центральной части профиля в районе пикетов 30550–30750, связанной с зоной контакта на границе тальк-карбонатной и углисто-сланцевой толщи, также выделяемой и в поле вызванной поляризуемости. Интересной особенностью данного объекта является четкое выделение его границ интенсивными знакопеременными аномалиями, пространственно совпадающими с границами аномалий вызванной поляризуемости.

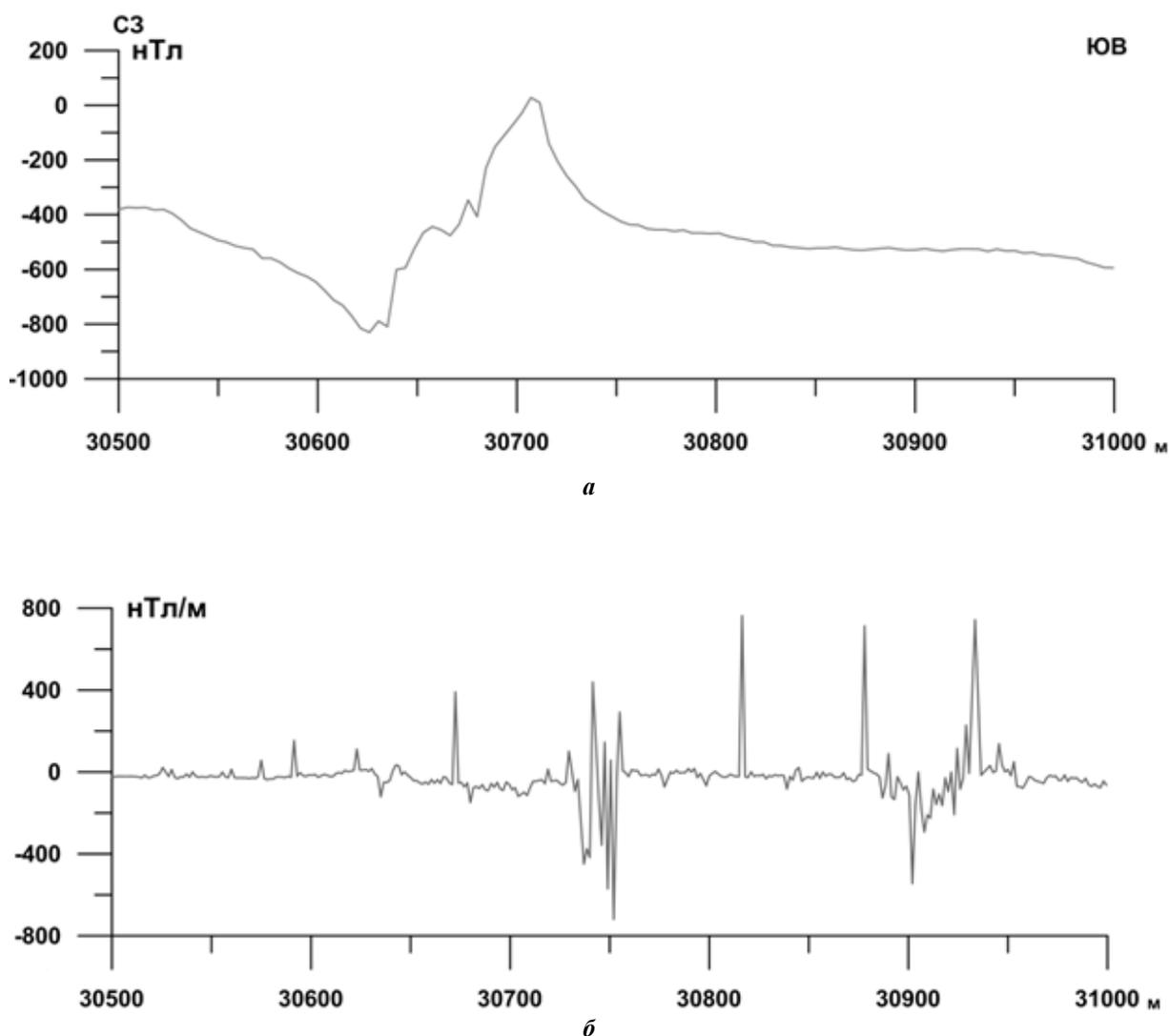
2. В магнитном поле тектонические нарушения отражаются в виде линейных аномальных объектов приращения полного вектора магнитного поля, имеющих большую протяженность в узких полосах или цепочках положительных аномалий  $dT$ , а также в изменении простирания осей магнитных аномалий (рис. 3, 4). Тектонические нарушения также выделяются, но в виде малоамплитудных аномалий  $gradT_v$  (до 100 нТл/м), что позволяет выделить данные объекты только в условиях однородного геологического разреза и с использованием дополнительной информации, полученной комплексом геофизических методов [3]. Пример приведен на рис. 4 и 5, где отмечаются интенсивные знакопеременные аномалии  $gradT_v$ , не выделяющиеся в поле  $dT$ ; это подтверждается электроразведочными данными, фиксирующими тектонические нарушения, сложенные преимущественно глинисто-дресвяным материалом.

3. Массивы гипербазитов и габбро выделяются интенсивными аномалиями  $dT$  до 4000–6000 нТл. Поле  $gradT_v$  внутри массива, как правило, однородное с небольшим отклонением до 100 нТл/м, с локальными выбросами, связанными с неоднородностями внутреннего

строения (зоны серпентинизации и тектонические нарушения). Объекты также фиксируются как изменение амплитудно-частотного состава полного вектора магнитного поля в пределах  $\pm 300$  нТл. Данная особенность выявлена на территории рудопроявлений Харанур и Хохюрта (рис. 3, 5).

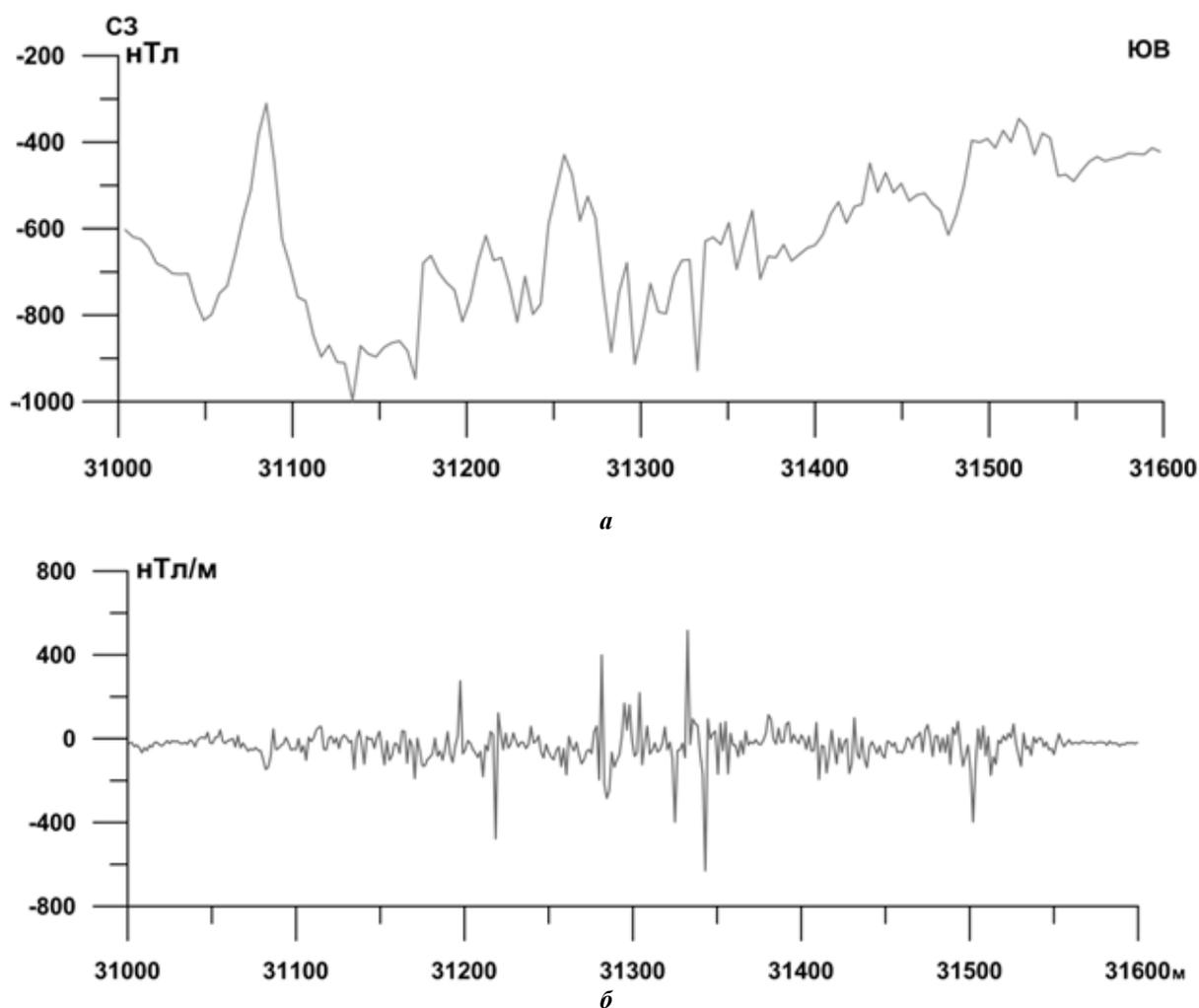
4. Зоны измененных пород (серпентинизации и лиственитизации) выделяются в основном в окраинах гипербазитовых массивов и характеризуется значительным полем с амплитудой до

$\pm 300$  нТл/м, сходным по амплитудно-частотной характеристике с «белым шумом». Объекты также фиксируются как изменение амплитудно-частотного состава полного вектора магнитного поля в пределах  $\pm 300$  нТл. Данная особенность выявлена на территории рудопроявления Харанур, участков Хоре-Урик и Хохюрта (см. рис. 3, 5). Возможным объяснением является неоднородность строения и состава комплекса хлорит-серпентенизированных пород.



**Рис. 4. Отражение зон тектонических нарушений в магнитном поле на участке Харанур:**

*а* – приращение полного вектора магнитного поля  $dT$ ; *б* – поле значений вертикального градиента магнитного поля  $gradT_e$ .



**Рис. 5. Отражение зон лиственизации тальк-карбонатных пород в магнитном поле в краевых частях гипербазитового массива на участке Хохюрта:**  
*а* – приращение полного вектора магнитного поля  $dT$ ; *б* – поле значений вертикального градиента магнитного поля  $gradT_v$

5. Зоны скарнирования выделяются в основном на окраинах вулканических поясов в зонах контакта их с известняками и представляют собой высоко амплитудные аномалии  $gradT$ , аналогичные по структуре полям зон хлоритизации и серпентинизации. Основным отличием в магнитном поле является амплитуда аномалий градиента, достигающая  $\pm 400$  нТл/м.

6. Регистрация интервалов смены литологического состава, в том числе в осадочных отложениях (см. рис. 3). Характерной чертой данного признака являются аномалии малой интенсивности, приуроченные к зонам смены литологического состава, а также горизонтальных неоднородностей разреза.

Выделяемые предлагаемым методом типы аномальных объектов встречаются на ряде золоторудных месторождений и являются маркерами, позволяющими обнаружить зоны околорудных изменений и горизонтальные неоднородности во вмещающей среде, связанные с особенностями геологического строения. Таким образом, применение данной методики в профильном варианте направлено на повышение качества и детализации проводимого комплекса методов с целью повышения эффективности разбраковки аномальных объектов.

**Выводы.** Представленные результаты показывают возможность применения методики магнитной градиентометрии в профильном варианте для

изучения структуры рудных месторождений, определения границ зон околорудных изменений, изучения зон смены литологического состава в разрезе.

Основные аномальные объекты делятся на два типа: горизонтальные неоднородности, связанные с тектоническими нарушениями, зонами дробления в однородной толще, и сложные объекты, связанные с зонами околорудных изменений. Выделение первой группы объектов характеризуется локальными аномалиями простой формы в относительно спокойном и однородном поле.

К сожалению, на данном этапе возможна лишь качественная интерпретация аномальных объектов второго типа, основанная на амплитудно-частотной характеристике выделяемых объектов, что не позволяет оценить их параметры. Возможно, данная проблема связана со сложным строением выделяемых объектов, представленных во многом зонами измененных пород.

Применение непрерывной регистрации позволяет добиться высокого качества съемки путем выделения в раз-

резе объектов с небольшой горизонтальной мощностью, связанных с зонами околорудных изменений.

### Библиографический список

1. Гершанок Л.А. Малоглубинная магниторазведка в условиях промышленных помех // Вестник Пермского Университета. Геология. 2013. № 1 (18). С. 34–49.
2. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка). Л.: Недра, 1981. 263 с.
3. Комплексная геолого-геофизическая модель верхней части разреза Среднеголготайского золоторудного месторождения / И.Г. Татьков, Б.Б. Дамдинов, Б.Л. Гармаев, А.Е. Будяк // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. С. 77–80.
4. Scipy: документация // SciPy.org [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.scipy.org/doc/scipy-0.14.0/reference/generated/scipy.interpolate.grid-data.html> (01.04.2015 г.).

*Статья поступила 20.04.2015 г.*