

Изучение намагниченности горных пород в естественном залегании по данным измерений в сверхглубоких и глубоких скважинах

Г.В. Иголкина

Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Аннотация. Представлены новые сведения о полной и естественной остаточной намагниченности неоднородно намагниченных сред на больших глубинах в естественном залегании. Определение величины и знака намагниченности, а также использование корреляционных зависимостей между магнитным полем и магнитной восприимчивостью для разных типов пород позволило оценить виды магнитной минерализации. Показана возможность применения скважинной магнитометрии для уточнения литолого-стратиграфических характеристик разрезов Кольской СГ-3, Криворожской СГ-8, Уральской СГ-4, Мурунтауской СГ-10, Саатлинской СГ-1, Тимано-Печорской СГ-5, Колвинской параметрической, Воротиловской сверхглубоких и глубоких скважин. Изучена взаимосвязь магнитных характеристик пород с литологическим составом и глубиной залегания.

Abstract. New data on full and natural remanent magnetization of heterogeneously magnetized media at great depths in natural occurrence are presented. Determination of the value and sign of magnetization and the use of correlations between a magnetic field and magnetic susceptibility for various rocks allowed evaluating the types of magnetic mineralization. We have shown a possibility to apply borehole magnetometry for refining lithological-stratigraphic characteristics of the borehole sections: Kola SG-3, Krivoy Rog SG-8, Ural SG-4, Muruntau SG-10, Saatly SG-1, Timan-Pechora SG-5, Kolvin, Vorotilov etc. The correlation between magnetic characteristics, lithological composition and depth of occurrence has been studied.

1. Введение

Сверхглубокие и глубокие скважины являются единственным способом изучения магнитного поля, магнитной восприимчивости и намагниченности пород глубинных горизонтов земной коры в естественном залегании в реальных термодинамических условиях. Намагниченность вскрытых скважинами пород основана на закономерной связи магнитных аномалий с геологическими факторами: литологическим составом пород, степенью их изменения и структурно-текстурными особенностями, типом и концентрацией магнитных минералов и т.д. Обобщение магнитометрических данных по сверхглубоким скважинам дает уникальную информацию о строении континентальной коры планеты (Иголкина, 2002).

Для определения намагниченности пород по измерениям трех составляющих индукции магнитного поля Z , H_x , H_y и магнитной восприимчивости χ среды предложено несколько способов (Бахвалов, Иголкина, 1988; 1992; Иголкина, Белоглазова, 1996): решение интегрального уравнения Винера – Хопфа; использование корреляционной зависимости между намагниченностью неоднородных сред и вычисленными значениями внутреннего магнитного поля цилиндрической модели скважины и той же модели, но при разложении измеренных параметров в спектры Фурье; аппроксимация неоднородно намагниченных пород тонкими призмами и т.д.

2. Методика

Методика определения намагниченности пород основана на двухэтапном подходе: вычислении составляющих индукции внутреннего магнитного поля от элементарных объемов, аппроксимирующих изучаемое магнитное поле, и их намагниченности. Общим недостатком этих способов является несоответствие моделей реальному строению и физическим характеристикам геологической среды, а также различия в погрешностях при расчетах и реальных измерениях в скважинах.

Скважинная магнитометрия, включающая комплексные измерения магнитной восприимчивости, трех составляющих индукции магнитного поля пород, азимута и угла наклона скважины, позволяет эффективно решать ряд геологических задач. Создание новых способов интерпретации магнитных полей дает возможность перейти от качественного истолкования измеренных магнитных параметров к их количественному анализу. При этом разнообразие пород и морфологии магнитных тел (дайки, пласты, линзы, столбы, трубки и т.д.) обуславливает необходимость особого подхода к выбору методики исследования для скважин. Каждая порода и отдельный пласт характеризуются своей магнитной восприимчивостью и магнитным полем околоскважинного пространства, поэтому в основу количественного анализа положено представление о геомагнитной среде как наборе неоднородно намагниченных пород.

3. Характеристики намагниченности пород разных скважин

Было определено изменение с глубиной полной J , индуцированной J_i , естественной остаточной J_n намагниченностей пород, а также фактора Q_z в естественном залегании в следующих сверхглубоких и глубоких скважинах: Кольской СГ-3, Криворожской СГ-8, Уральской СГ-4, Мурунтауской СГ-10, Саатлинской СГ-1, Тимано-Печорской СГ-5, Колвинской (параметрической), Воротиловской.

Изучение особенностей распределения величины и знака намагниченности, а также использование корреляционных зависимостей между магнитным полем и магнитной восприимчивостью для разных типов пород позволило оценить виды магнитной минерализации пород в этих скважинах. Для пород с магнетитовой и титаномagnetитовой минерализацией, представленных интрузиями долеритов, дайками микродиоритов, андезибазальтов, базальтов (Уральская, Тимано-Печорская, Кольская, Саатлинская, Криворожская, Колвинская параметрическая скважины), отмечается как прямая, так и обратная намагниченность. Эффузивные породы, вскрытые Саатлинской, Воротиловской и Уральской сверхглубокими скважинами, имеют примерно те же значения χ , что и их интрузивные аналоги. Однако для этих пород чаще наблюдается высокая остаточная намагниченность, которая в несколько раз превышает индуцированную намагниченность.

На глубинах с магнетитовой минерализацией пород Уральской скважины, представленных дайками микродиоритов, андезибазальтов и базальтов, преобладает прямая намагниченность. Например, в интервале 920-940 м магнитная восприимчивость χ диоритовых порфиритов достигает $6000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, величина аномалии магнитного поля Z_a изменяется в диапазоне -1000 - $+300$ нТл. Значения полной вертикальной составляющей намагниченности J_z у положительно намагниченных диоритовых порфиритов варьируются в пределах -0.7 - 0.23 А/м. Величина индуцированной намагниченности J_{iz} изменяется в диапазоне 0.3 - 2 А/м. Породы характеризуются отрицательной естественной остаточной намагниченностью J_{nz} , а ее величина не превышает -2.6 А/м (рис. 1). Наиболее вероятные значения Q_z составляют 0.78 - 1.56 , что свидетельствует о достаточной сохранности остаточной намагниченности пород.

На глубине 4620-4638 м скважина подсекла базальтовую дайку (рис. 2), величина J_{nz} которой достигает ± 1.0 А/м, а фактор Q_z находится в пределах 0.5 - 0.8 . Кривые J_z , J_{iz} , J_{nz} сильно дифференцированы, что свидетельствует о неоднородности распределения магнитных минералов и изменённости породы. Геологические данные об эпидотизации подтверждают этот вывод.

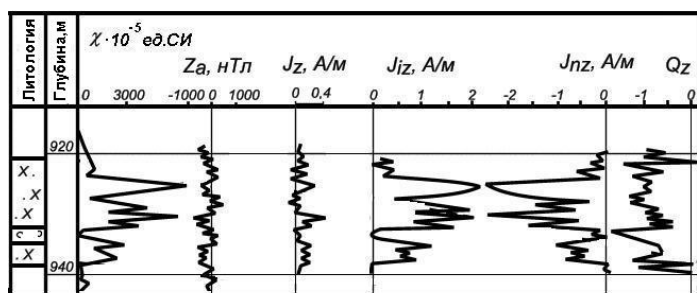


Рис. 1. Результаты определения намагниченности диоритовых порфиритов в естественном залегании по данным скважинной магнитометрии (Уральская СГ-4, интервал 920-940 м):
1 – диоритовые порфириты; 2 – туффиты

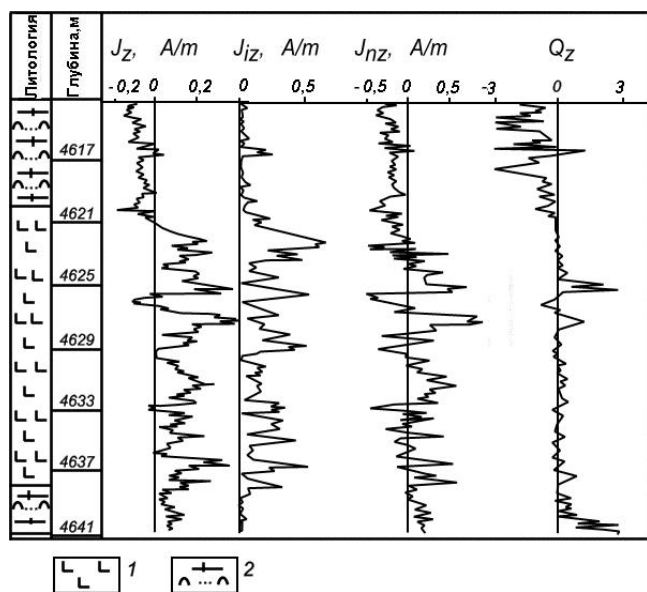


Рис. 2. Результаты определения намагниченности базальтовой дайки в естественном залегании по данным скважинной магнитометрии в разрезе Уральской СГ-4:
1 – базальты; 2 – туффиты

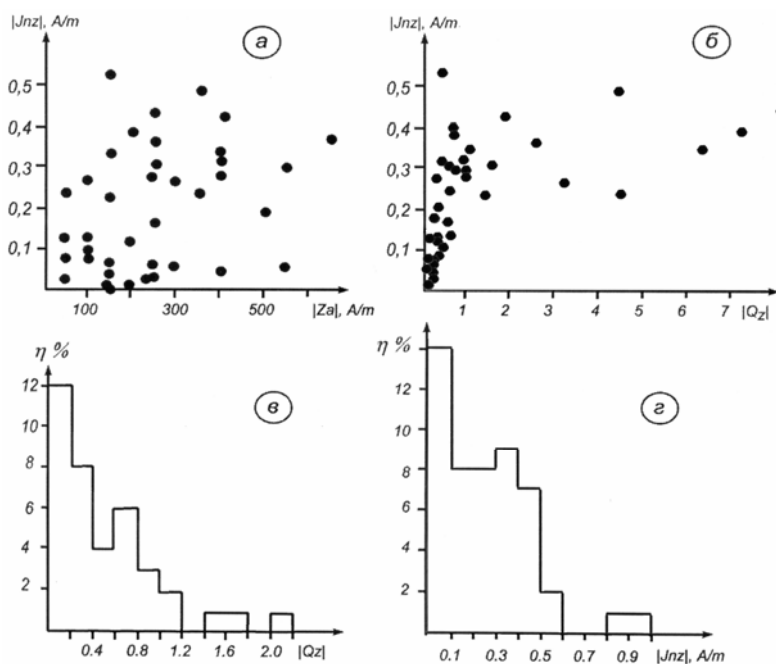


Рис. 3. Зависимость естественной остаточной намагниченности J_{nz} туффов Уральской СГ-4 от аномалии вертикальной составляющей магнитного поля Z_a (а) и фактора Q_z (б); гистограммы распределения Q_z (в) и J_{nz} (г) в интервале глубин 2481.2-2491.2 м

Результаты расчета намагниченности, их статистический анализ и корреляционные зависимости подтверждают структурно-текстурную неоднородность туффов, вскрытых Уральской СГ-4 (рис. 3). На гистограмме распределения естественной остаточной намагниченности J_{nz} и фактора Q_z , четко видны группы пород с различными петрографическими свойствами.

Как у крупнопсефитовых, так и у агломератовых туфов, вскрытых Уральской скважиной в интервале 2500-3000 м, полная намагниченность J_z имеет прямую полярность, и ее величина не превышает 0.2 А/м. Естественная остаточная намагниченность J_{nz} у туфов крупнопсефитовых имеет обратную полярность и составляет -0.25 А/м, в то же время у агломератовых туфов полярность J_{nz} в основном прямая, и ее значения изменяются в пределах 0.2-0.33 А/м. Для пород с прямой намагниченностью величина $Q_z \geq 1$, а для пород с обратной намагниченностью значения Q_z не превышают 0.8. Известно, что чем более крупнозернистыми являются ферромагнитные минералы, тем ниже их магнитная жесткость и меньше сохранность первичной остаточной намагниченности. Вероятно, причиной различия магнитных свойств пород является не только изменение размера зерен, но и условия осадконакопления.

На рис. 4 приведены результаты определения полной вертикальной составляющей намагниченности J_z , остаточной намагниченности J_{nz} и фактора Q_z метабазитов пирттиярвинской свиты Кольской СГ-3. Породы пирттиярвинской свиты (4884-5642 м), представляющие собой переслаивание метабазитов, метаандезитов, биотит-плагиоклазовых и амфибол-биотит-плагиоклазовых сланцев, полосчатых лав и туфолав среднего состава (*Кольская сверхглубокая*, 1984; *Архейский...*, 1991), по магнитным свойствам выделяются среди пород печенгского комплекса.

Метадиабазы, туфолавы, лавобрекчии основного состава, обогащенные магнетитом (до 6 %, по геологическим данным), характеризуются высокими магнитными показателями: величина χ достигает $20\ 000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ при среднем значении $14\ 000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, верхний предел Z_a составляет - 7500 нТл. Породы имеют обратную остаточную намагниченность (до -4 А/м). Фактор Q_z , равный 0.5, свидетельствует о наличии магнетитовой минерализации нижней подсвиты пирттиярвинской свиты. Палеомагнитные, петромагнитные и минералогические исследования керн подтверждают присутствие в этом интервале магнетита и гематита (*Туруевнов*, 2000; *Глухих и др.*, 1993; *Шерендо*, 2000).

Пирроотиновая минерализация в породах Кольской (интервал 2000-4586 м) и Уральской (интервал 2640-4064 м) скважин влияет на характер кривых магнитного поля и намагниченности: они становятся изрезанными и знакопеременными. Неоднородность намагниченности пород связана, в основном, с изменением естественной остаточной намагниченности J_n ($J_n/J_i > 1$).

В разрезе Саатлинской скважины выделено две толщи эффузивных пород, причем в верхней андезибазальтовой толще, в отличие от нижней дацитовой, распределение магнетитовой минерализации практически непрерывное. Установлено, что залегание двух эффузивных толщ, вскрытых Саатлинской сверхглубокой скважиной до глубины 8267 м, различное. Верхняя толща до глубины 6500 м, представленная, в основном, пироксен-плагиоклазовыми андезибазальтами, имеет средний азимут падения 255° , а нижняя толща, дацитовая, имеет азимут падения 325° .

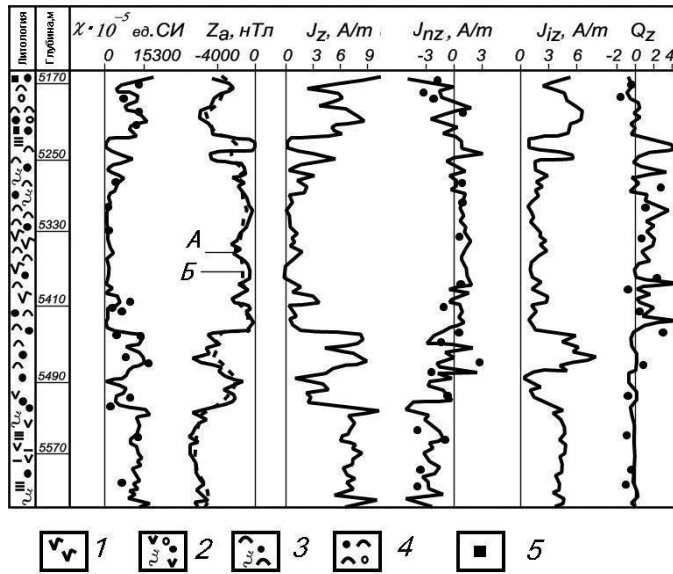


Рис. 4. Результаты определения намагниченности пород пириттярвинской свиты Кольской СГ-3 по данным скважинной магнитометрии и по керну (Igolkina, 2000):

- А – вертикальная составляющая магнитного поля (Z_a), измеренная в скважине;
- Б – вертикальная составляющая магнитного поля (Z_a), смоделированная по рассчитанной намагниченности;
- – результаты измерения керна, по данным НПЦ "Кольская сверхглубокая";
- 1 – метаандезиты;
- 2 – амфибол-биотит-плаггиоклазовые сланцы;
- 3 – магнетитсодержащие альбитофиры;
- 4 – туфолавы;
- 5 – магнетит.

Как по величине магнитных характеристик керна, так и по данным скважинной магнитометрии, породы нижней толщи имеют существенно более низкие магнитные характеристики.

Величина полной намагниченности J_z прямонамагнитных пород колеблется от 0 до 5 А/м при уменьшении процентной доли, при этом почти в 27 % случаях значения J_z варьируют в пределах 0-0.5 А/м. У обратномагнитных пород в 78 % случаях J_z изменяется от -0.5 А/м до 0. Такое распределение подтверждается большим объемом выборки ($n = 671$). Характерно, что величина J_{nz} обратномагнитных пород значительно выше, чем прямонамагнитных, т.е. породы с обратной намагниченностью имеют большую магнитную стабильность.

На рис. 5 представлены результаты определения J_z , J_{nz} и фактора Q_z брекчированных андезибазальтов и базальтов в Саатлинской сверхглубокой скважине в интервале 3995-4275 м. Величина полной намагниченности J_z пород изменяется в пределах 1.6-4.8 А/м, причем наименьшие значения J_z отмечаются в интервалах, где породы представлены андезибазальтами. Естественная остаточная намагниченность J_{nz} пород колеблется в диапазоне -2.7-2.6 А/м, т.е. прямая полярность намагниченности пород сменяется на обратную и наоборот.

На глубинах 5510 и 6000 м Саатлинской скважины выделены слои с аномально высокими магнитными показателями: магнитная восприимчивость достигает $6000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, величина J_n составляет около 18 А/м.

По данным скважинной магнитометрии, магнитные характеристики долеритовых интрузий Тимано-Печорской скважины в интервале глубин 3900-3920 м и 4185-4234 м (рис. 6) изменяются в следующих пределах: $J_z = 6-14$ А/м; $J_{iz} = 0-6$ А/м; $J_{nz} = -7-6$ А/м; фактор $Q_z = -6-5$. Такие параметры намагниченности и фактора Q_z характерны для титаномагнетитовой минерализации.

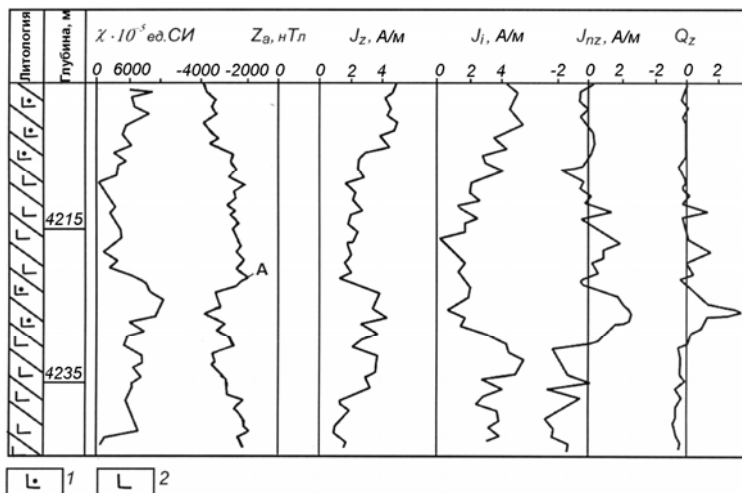
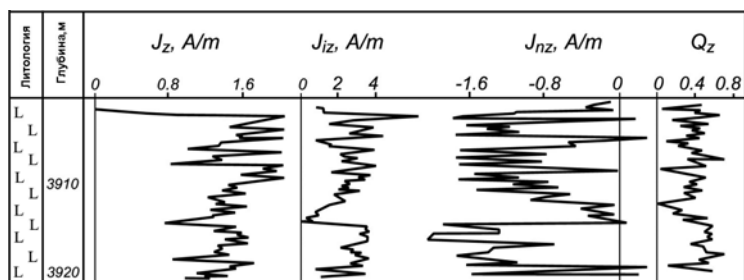
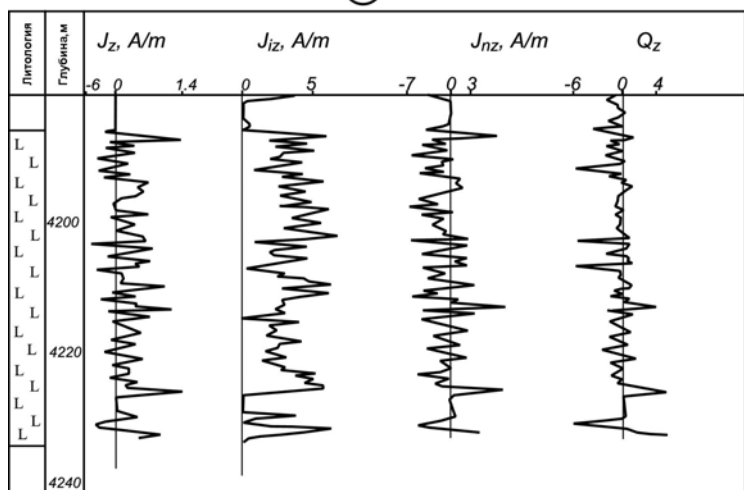


Рис. 5. Результаты определения намагниченности базальтов в Саатлинской сверхглубокой скважине в интервале 3995-4275 м:

- А – измеренные значения вертикальной аномальной составляющей магнитного поля Z_a ;
- 1 – андезибазальты;
- 2 – базальты.



а



б

Рис. 6. Результаты определения намагниченности долеритов в Тимано-Печорской скважине в интервале 3900-3920 м (а) и 4185-4234 м (б) по данным скважинной магнитометрии

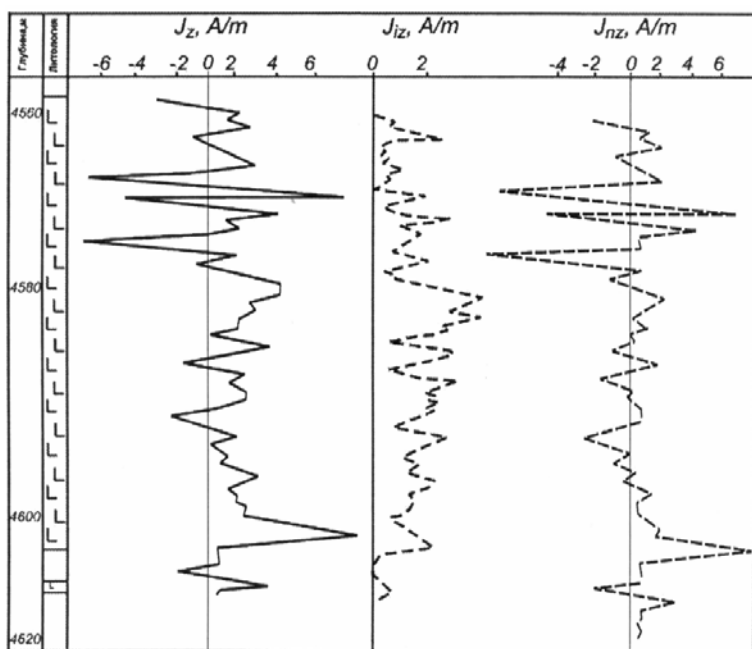


Рис. 7. Результаты определения намагниченности долеритов в Колвинской параметрической скважине в интервале 4560-4620 м по данным скважинной магнитометрии

У вскрытых Колвинской глубокой параметрической скважиной долеритовых интрузий на глубине 4560-4620 м полная намагниченность J_z изменяется в диапазоне $-6-6$ А/м, индуцированная намагниченность J_{iz} варьируется в пределах $0.5-2.5$ А/м, а естественная остаточная намагниченность J_{nz} составляет $-6.5-6.5$ А/м (рис. 7), т.е. основной в этом случае является остаточная намагниченность.

Дифференцированность магнитных характеристик пород связана с процессом становления интрузии, что подтверждается геологическими данными, согласно которым в центральной части интрузии порода становится значительно более крупнозернистой, практически полностью кристаллически-зернистой, но включает небольшое количество замещенного стекла (толеитовая структура).

Магнитные свойства гнейсов, брекчированных гнейсов, чередующихся с брекчиями кристаллосланцев, амфиболитов, вскрытых Воротиловской скважиной, сильно дифференцированы, что характерно для метаморфических пород, и особенно для тех, которые подвержены процессам грейзенизации, аргиллитизации, серицитизации и хлоритизации. Например, породы в интервале 882-918 м (рис. 8а) обладают высокой полной J_z и естественной остаточной J_{nz} намагненностью, значения которых изменяются в диапазоне 2-12 А/м. Величина J_z не превышает 1.5 А/м, а значения фактора Q_z варьируют в пределах 1-12. В интервале 960-1010 м (рис. 8б) у вскрытых Воротиловской скважиной пород магнитные характеристики менее дифференцированы: J_z изменяется в диапазоне 2-6 А/м, J_{nz} составляет 0.5-5 А/м, индуцированная намагненность J_{iz} не превышает 3 А/м, а фактор $Q_z \geq 1$. Результаты определения намагненности пород и анализ корреляционных зависимостей между магнитной восприимчивостью χ и аномальным магнитным полем Z_a подтвердили наличие двух разновидностей гнейсов, их блочную структуру в разрезе Воротиловской скважины.

Изучение намагненности пород, вскрытых Мурунтауской СГ-10, позволило оценить сложный характер их магнитной минерализации и дать качественную оценку распределения типов пирротина, а комплексное применение метода скважинной магнитометрии и метода электродных потенциалов МЭП дало возможность выделить из общей зоны сульфидной минерализации пород зоны с моноклинным пирротинном. Результаты определения намагненности пород подтвердили, что с увеличением глубины содержание промежуточного пирротина в них возрастает (Igolkina, Syvazhina, 1995). Высокая дифференцированность кривых J_z , J_{iz} и Q_z и в этом случае свидетельствует о неравномерном распределении магнитных минералов.

Установленные особенности распределения с глубиной величины и знака полной J и естественной остаточной J_n намагненности пород, вскрытых сверхглубокими скважинами в естественном залегании, дают основание использовать эти параметры для геологического истолкования как внутреннего, так и внешнего магнитного поля. Принципиальное значение имеет возможность оценки по данным скважинной магнитометрии остаточной намагненности пород, несущей основную информацию о древнем магнитном поле, что позволяет использовать эти данные в палеомагнетизме. Сопоставление установленных значений естественной остаточной намагненности и фактора Кенигсбергера пород сверхглубоких скважин с данными палеомагнитных исследований керна подтвердило результаты исследований. Наиболее четко преимущество метода скважинной магнитометрии проявляется в тех случаях, когда керн не ориентирован "верх-низ", а, следовательно, полярность остаточной намагненности породы при использовании керна остается неизвестной.

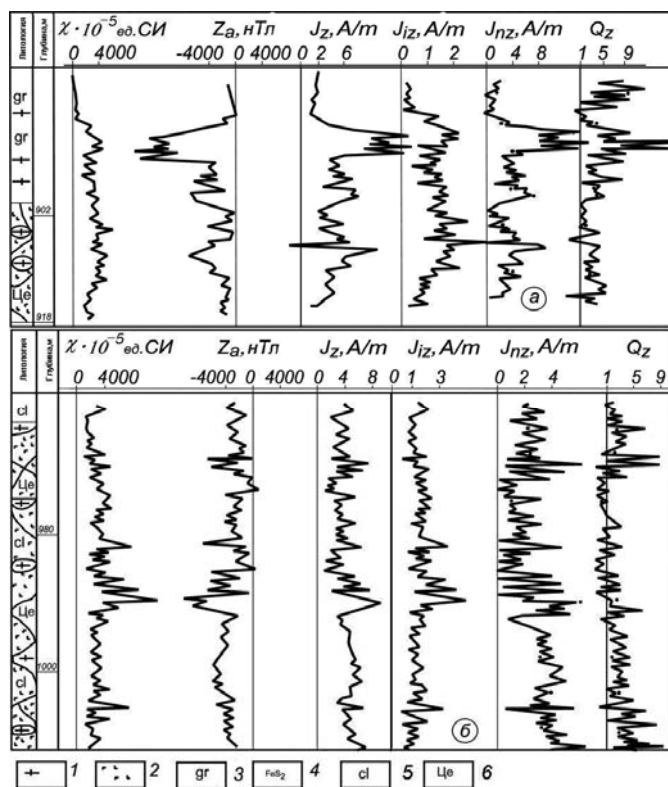


Рис. 8. Результаты определения вертикальных составляющих полной J_z , индуктивной J_{iz} , естественной остаточной J_{nz} намагненности и фактора Q_z пород Воротиловской скважины в интервалах глубин 882-918 м (а), 960-1010 м (б):

- – результаты измерения керна по данным ФГУП "Недра";
- 1 – гнейсы и кристаллосланцы;
- 2 – песчаники;
- 3 – гранат;
- 4 – пирит;
- 5 – хлорит;
- 6 – цеолит.

4. Выводы

Различие в магнитных свойствах пород, вскрытых сверхглубокими и глубокими скважинами, вызвано неоднородным распределением магнитных минералов в толще породы, наличием разных морфологических типов магнетита и присутствием пирротиновой минерализации.

Результаты определения намагниченности горных пород в естественном залегании по данным скважинной магнитометрии подтвердили геологические выводы о различных магнитных характеристиках верхней и нижней толщ, вскрытых Саатлинской сверхглубокой скважиной, а также позволили оценить блочную структуру гнейсов в Воротиловской скважине.

Работа выполнена по проекту МПГК №408 ЮНЕСКО и частично по гранту ИНТАС № 01-0314.

Литература

- Igolkina G.V.** Investigation of the KSDB magnetization in situ. In: *The results of the study of the deep substance and physical processes in Kola superdeep borehole section down to a depth of 12261 m. Project 408. Apatity, Poligraph*, p.101-104, 2000.
- Igolkina G.V., Svyazhina I.A.** Correlation of borehole magnetometry results with paleomagnetic investigation on cores at Muruntau SD-10. *Book of abstracts XXI General Assembly of IUGG. Scientific Program GA 5.19 "Magnetic Petrology and Magnetic Signature of Ore Deposits and Ore Environments". Boulder, Colorado, USA, GAB51K-12*, 1995.
- Tyuremnov V.A.** Substantiation of paleomagnetic reconstruction according to the KSDB section rocks and their homologues. In: *The results of the study of the deep substance and physical processes in Kola superdeep borehole section down to a depth of 12261 m. Project 408. Apatity, Poligraph*, p.101-104, 2000.
- Архейский комплекс в разрезе СГ-3. Под ред. Ф.П. Митрофанова *Anatumy, АН СССР*, 187 с., 1991.
- Бахвалов А.Н., Иголкина Г.В.** Математическое моделирование внутреннего магнитного поля неоднородно намагниченных тел с целью определения их намагниченности. *Прикладная геофизика*, вып. 119, с.88-93, 1988.
- Бахвалов А.Н., Иголкина Г.В., Портнов В.С.** Определение намагниченности пород в скважине по результатам измерения магнитного поля и магнитной восприимчивости. *Геология и разведка*, № 2, с.116-121, 1992.
- Глухих И.И., Кошкина Т.М., Ланев В.С., Смирнов Ю.П., Шерендо Т.А.** Магнетиты из пород пириттиярвинской свиты протерозойского печенского комплекса. *Петрофизические исследования. Екатеринбург, УИФ "Наука"*, с.44-46, 1993.
- Иголкина Г.В.** Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. *Екатеринбург, УрО РАН*, 220 с., 2002.
- Иголкина Г.В., Белоглазова Н.А.** Определение намагниченности пород по измерениям внутреннего магнитного поля и магнитной восприимчивости в сверхглубоких скважинах. Теория и практика геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. *Тез. докладов Международной конференции. Воронеж, "Квадрат"*, с.86-87, 1996.
- Кольская сверхглубокая. Под ред. Е.А. Козловского. *М., Недра*, 490 с., 1984.
- Шерендо Т.А.** Магнитная минерализация в породах глубоких и сверхглубоких скважин. *Уральский геофизический вестник*, № 1, с.120-125, 2000.