

УДК 550.838.3

**ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ РАЗРЕЗА НЕФТЕГАЗОВЫХ
И СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИН ПО МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ**

**LITHOLOGY OIL AND GAS AND SUPERDEEP WELL ON
THE MAGNETIC PROPERTIES**

Иголкина Г.В.

**Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация**

G.V. Igolkina

**Institute of Geophysics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, the Russian Federation**

e-mail: galinaigolkina@yandex.ru

Аннотация. Литологическое расчленение разреза скважины основано на различиях в величине и характере кривых магнитной восприимчивости, магнитного поля и намагниченности пород. Магнитные свойства пород являются надежным критерием для литологического расчленения тонкослоистых, неоднородных разрезов глубоких, сверхглубоких и нефтегазовых скважин, а также ведения контроля геологической документации разрезов скважин.

В статье обсуждается проблема особенностей намагниченности пород для каждой скважины, а также было проведено их сопоставление, что дало основание использовать эти параметры для геологического истолкования наблюдаемого как внутреннего, так и внешнего магнитного поля. Анализ результатов изучения подсечений магнетитовых руд Среднего Урала позволил выделить 4 типа пород с различными типами магнитной минерализации по комплексу признаков магнитной корреляции.

Интерпретация результатов скважинной магнитометрии позволяет установить наличие двух типов магнитной минерализации: пирротиновой, связанной с зонами развития сульфидной (пиритовой) минерализации, и магнетитовой (титаномагнетитовой), что подтвердилось результатами палеомагнитного исследования керна.

Комплексирование метода скважинной магнитометрии с методом электродных потенциалов МЭП по Мурунтауской СГ-10 дало возможность выделить из общей зоны сульфидной минерализации зоны с моноклинным пирротинном и, таким образом, уточнить литологическое расчленение неоднородного тонкослоистого разреза скважины.

Abstract. Lithology of the well section is based on differences in the size and character of the curves of magnetic susceptibility, the magnetic field and the magnetization of rocks. The magnetic properties of the rocks are a reliable criterion for thin-lithological, heterogeneous cuts deep, and ultra-deep oil and gas wells, as well as for monitoring the geological documentation of well sections.

The article discusses the problem of singularities of the magnetization of rocks for each well, and it was also their comparison, then what was the basis for use of these parameters for the geological interpretation of the observed, both internal and external magnetic field. Analysis of the results of the study undercut magnetite ore Middle Urals possible to distinguish four types of rocks with different types of magnetic mineralization on the complex features of the magnetic correlations.

Interpretation of the results of the borehole magnetometry allows establish the existence of two types of magnetic mineralization pyrrhotite associated with zones of sulphide (pyrite) mineralization and magnetite (titanomagnetite), which was confirmed by the results of the paleomagnetic studies of core samples.

Integration of borehole magnetometry method with the method of electrode potentials MEP for Muruntau SD-10 made it possible to distinguish from the

common area of sulphide mineralization zones with monoclinic pyrrhotite and thus clarify the lithological inhomogeneous thin-layer section of the well.

Ключевые слова: магнитные свойства, скважинная магнитометрия, скважина, керн, палеомагнитные исследования, сверхглубокие скважины, нефтяные месторождения.

Key words: magnetic properties, borehole magnetometry, well, core, paleomagnetic studies, superdeep wells, oil fields.

Введение

Результаты исследований в сверхглубоких, глубоких и нефтегазовых скважинах показали, что по диаграммам магнитной восприимчивости и магнитного поля в комплексе с данными других методов ГИС и петрофизической информацией, можно определить и выделить интервалы магнитных пород, оценить их магнитные свойства, литологию разреза, оценить неоднородность пород и т. д.

Связующим звеном между геологическими объектами и геофизическими методами исследования разрезов скважин является петрофизика. Некоторые вопросы геологической интерпретации данных уже могут решаться на основе визуального анализа диаграмм магнитной восприимчивости и составляющих магнитного поля. По данным скважинной магнитометрии хорошо выделяются разные типы как интрузивных, так и эффузивных пород, вскрытых Уральской, Тимано-Печорской, Колвинской, Саатлинской, Кольской, Ново - Елховской, Воротиловской, Криворожской и нефтегазовыми скважинами на фоне слабомагнитных туфов, алевролитов и практически немагнитных известняков и доломитов[2,7,8,16].

Для слабомагнитных объектов соотношение по магнитной восприимчивости χ между магнитным телом и вмещающей породой не превышает 1-2 порядка. Более однородными по магнитным свойствам

являются осадочные породы, такие как глины, алевролиты, аргиллиты, песчаники, известняки и доломиты. Магнитная восприимчивость их варьирует в сравнительно больших пределах $0-400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, но обычно не меняется очень резко от точки к точке. Последнее обстоятельство является благоприятным фактором для целей магнитной корреляции на нефтегазовых месторождениях [6-8,16]. Для известняков и доломитов Тимано-Печорской и Колвинской глубоких скважин характерны низкие значения магнитной восприимчивости от 0 до $15 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Алевролиты, аргиллиты, песчаники, мергели Тюменской СГ-6 обладают магнитной восприимчивостью от 0 до $200 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, причем в подавляющем большинстве случаев χ не превышает $20-50 \cdot 10^{-5}$ ед.СИ. Повышенные значения χ в этих породах чаще всего связаны с пирротиновой минерализацией, которая отмечается сильной изрезанностью кривой вертикальной составляющей магнитного поля Z_a .

Туфы и роговики обладают повышенной магнитной восприимчивостью, изменяющейся в пределах от $50 \cdot 10^{-5}$ до $200 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Наблюдаются отдельные пики до $2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Для зон ороговикованных осадочных пород, образующихся, как правило, на контактах интрузий с вышелегающими породами (алевролитами, аргиллитами, песчаниками), характерна резкая изрезанность кривой внутреннего магнитного поля Z_a , причем значения могут достигать ± 6500 нТл.

Определение намагниченности пород в естественном залегании, оценка ее величины, знака и изменения с глубиной, а также изучение корреляционных зависимостей между магнитным полем и магнитной восприимчивостью для разных видов пород позволило сделать оценку типов магнитной минерализации по Уральской СГ-4, Кольской СГ-3, Мурунтауской СГ-10, Саатлинской СГ-1, Тимано-Печорской СГ-5, Колвинской, Воротиловской сверхглубоким и нефтегазовым скважинам

[3, 6, 8]. Были изучены особенности намагниченности пород для каждой скважины и проведено их сопоставление, что дало основание использовать эти параметры для геологического истолкования наблюдаемого как внутреннего, так и внешнего магнитного поля.

Результаты исследований

Опытно-методические работы по выбору комплекса геофизических исследований с целью литологического расчленения осадочного чехла и палеозойского фундамента Западной Сибири были выполнены в скважинах Кечимовского месторождения и по скважине Тевлино-Русскинского месторождения [7,8].

Наглядным примером использования метода для уточнения геологического разреза могут служить результаты измерений по Уральской сверхглубокой скважине СГ-4. Двупироксен–плагиоклазовые базальты, темно-серые, массивные, магнитная восприимчивость которых достигает $2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ вскрыты с глубины 1487 м и до глубины 1493.8 м (рисунок 1). Ниже, на глубине 1500 – 1524 м, через узкий немагнитный пропласток, скважина подсекла массивные микродиориты, равнозернистые, местами слабо порфиоровые, в краевых частях катаклазированные. Величина магнитных характеристик микродиоритов превышает аналогичные параметры базальтов. С глубины 1524 м и до глубины 1640 м скважина прошла через туфобрекчии базальтов от крупнопсефитовых до агломератовых. В обломках преобладают базальты крупносерицит-порфиоровые массивные, гематизированные. Породы неоднородны по составу и по магнитным свойствам, что обусловлено неравномерным распределением магнитных минералов в процессе осадконакопления и цементации вулканических продуктов.

Туфы крупнопсефитовые в интервале глубин 1575-1604 м характеризуются величиной χ до $1400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и значениями Z_a до – 400 нТл, в то время как магнитные свойства агломератовых туфов,

встреченных на глубине 1557-1575 м значительно слабее (рисунок 1). Величина магнитной восприимчивости последних не превышает $720 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и Z_a составляет -150 нТл. Значения вертикальной составляющей намагниченности как для крупнопсефитовых, так и для агломератовых туфов не превышают $0,2$ А/м.

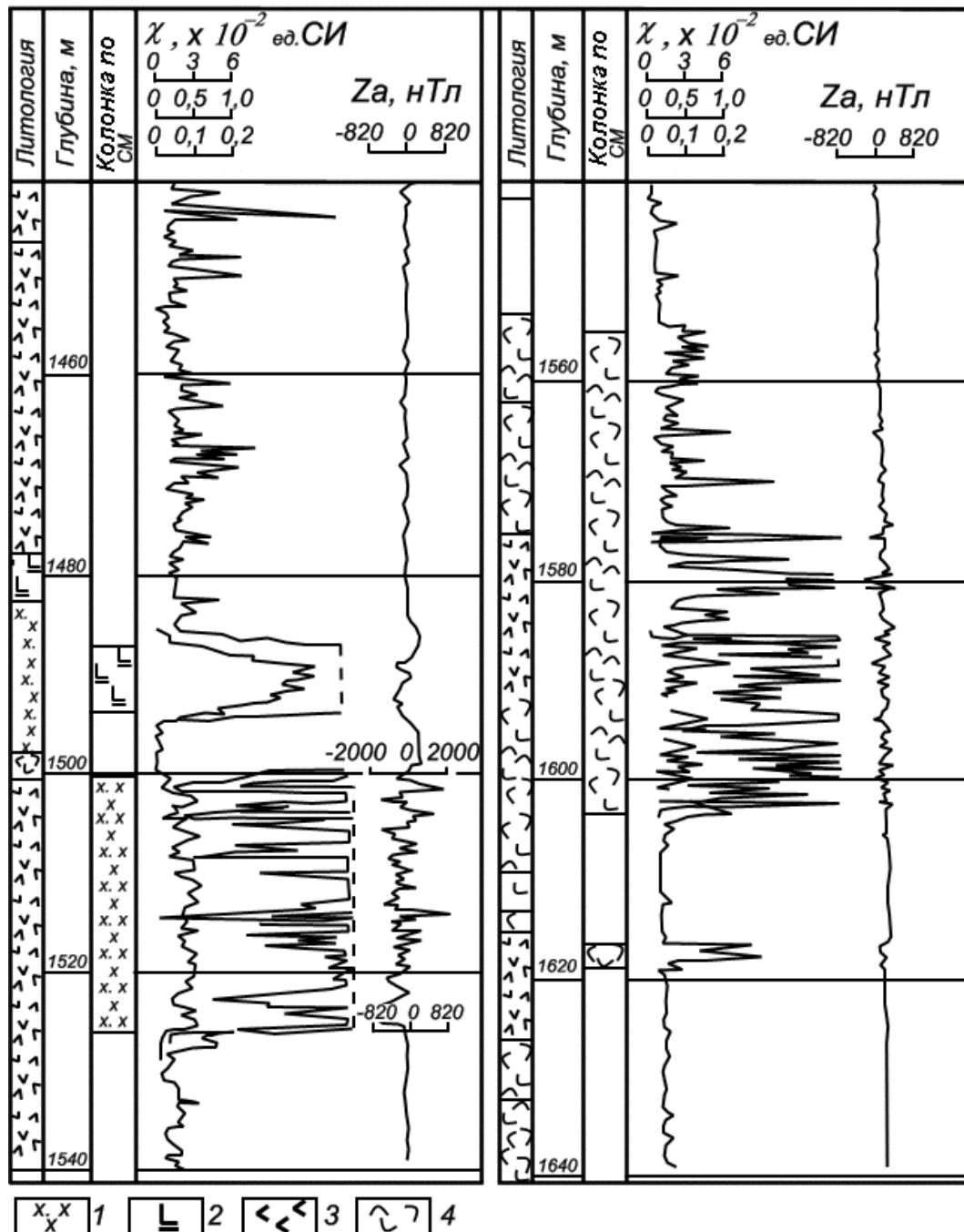


Рисунок 1. Уточнение литологического расчленения разреза Уральской СГ – 4 по данным скважинной магнитометрии:
 1 – микродиориты; 2 – дипироксен-плагиоклазовые базальты;
 3 – агломератовые туффиты; 4 – агломератовые туфы

По геологическому описанию базальты и микродиориты отмечаются в интервале 1478-1482 м и 1482-1498 м соответственно. Мощности пород по геологической колонке и данным магнитометрии также отличаются. Как видно из этих данных, различие довольно значительно и необходимость проведения магнитных измерений очевидна. Расхождение глубины залегания пород по данным бурения и каротажа обусловлено неточностями геологической документации при низком выходе керна.

Поэтому для более точного литологического расчленения пород и ведения контроля геологической документации разрезов скважин необходимо привлекать частотно-спектральный анализ измеренных параметров и изучение намагниченности пород в естественном залегании по данным измерений в сверхглубоких и глубоких скважинах. В работе А.Н.Бахвалова, А.А. Жамалетдинова, Ю.Н. Кузнецова и др.[4] показана возможность применения частотно - спектрального анализа для изучения ритмичности осадконакопления по физическим свойствам пород.

В Саатлинской сверхглубокой скважине в интервалах глубин 3590-3718 м, 4063-4191 м, 4236-4364 м, 4635-4763 м, 5000-5218 м, 6000-6128 м, 6532-6660 м, 6840-6968 м, 7000-7064 м, 7224-7156 м для изучения ритмов образования вскрытых эффузивов был применен частотно-спектральный анализ результатов скважинной магнитометрии: магнитной восприимчивости и аномальной вертикальной составляющей магнитного поля Z_a . Все расчеты выполнялись с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Наиболее практически значимым является амплитудный спектр, т.к. только он не зависит от начальной фазы изучаемой кривой, а остальные спектры зависят от нее.

Полученные в результате расчета амплитудные спектры характеризуют среднюю амплитуду физических параметров гармоник Z_a и χ в зависимости от номера гармоники K , меняющейся от 1 до 2^M . От номера гармоники K осуществляется переход к периоду $T = L/K$, где L - длина изученного интервала по скважине в метрах. Периоды гармоники

характеризуют ритмы повторяемости магнитных свойств. Максимальными значениями на спектрах выделяются наиболее распространенные мощности прослоев в изучаемом интервале, которые в свою очередь характеризуют в метрах преобладающие ритмы образования эффузивов.

Разница между ритмами по кривым магнитной восприимчивости χ и кривой магнитного поля Z_a объясняется тем, что аномалии магнитной восприимчивости создаются только магнитными породами, пересеченными скважиной и залегающими на расстоянии первых десятков сантиметров от оси скважины. Аномалии магнитного поля создаются не только магнитными породами, пересеченными скважиной, но и магнитными породами, которые находятся в околоскважинном пространстве в радиусе десятков метров. Расхождения спектров Z_a и χ высокочастотной части спектра могут быть вызваны и механическими причинами (колебаниями датчика Z при проведении измерений).

Максимумы спектров показаны точками со значениями амплитуды максимума спектра, нормированной в единицах $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ для χ и единицах 50 нТл для Z_a . Наиболее объективными для интерпретации являются спектры χ , т.к. они связаны только с пересеченными магнитными породами, и околоскважинное пространство на них не влияет. Результаты интерпретации показывают, что в спектрах χ и Z_a хорошо прослеживаются максимумы гармоник с периодами $T = 64$ м. В спектре магнитной восприимчивости также отмечается полоса колебаний с периодами от 10 до 20 м с устойчивой средней гармоникой периода $T = 16$ м. Такая же гармоника присутствует и в спектрах Z_a , но здесь она более широкая (от 7 до 32 м). Таким образом, спектральный анализ показал, что два характерных ритма 64 м и 16 м являются для скважины СГ-1 основными ритмами образования эффузивов.

Определение намагниченности породиспользуется при моделировании железорудных месторождений, когда необходимо знать намагниченность в естественном залегании [3,6]. По результатам измерения магнитной

восприимчивости и магнитного поля в скважине изучается полный разрез скважины, тем более, что зоны магнетитовой минерализации часто связаны с вторичными процессами (дробление, серпентинизация и т.д.), а выход керна из этих зон практически отсутствует. Результаты исследований показали, что магнитные свойства магнетитовых руд, вскрытых вышеперечисленными скважинами, очень дифференцированы и неоднородны. Встречены породы, как с прямой, так и с обратной полной и естественной остаточной намагниченностью.

Изучение магнитных характеристик было выполнено для зон магнетитовой минерализации по Кольской СГ-3, Криворожской СГ-8, Воротиловской и по 19 подсечениям магнетитовых руд в 11 скважинах месторождений Среднего Урала: Ново-Естюнинское, Кушвинское, Верхне-Вийское, Северо-Баумановское.

К I типу относятся богатые и массивные руды с содержанием железа $30 \div 45\%$ и более. Характеризуются они высокими значениями χ до $300 \div 500 \cdot 10^{-2}$ ед. СИ, величина Z_a достигает $-40 \div 50$ мкТл, полная вертикальная составляющая намагниченности J_z имеет прямую полярность, остаточная намагниченность J_{nz} - обратную. Полярность горизонтальных составляющих намагниченностей как полной, так и остаточной – обратная (таблица 1). Текстура руд – в основном массивные, линзовидно-пятнистые.

Таблица 1. Оценка типа магнитной минерализации магнетитовых руд по магнитным характеристикам

Тип магнитной минерализации	$\chi * 10^{-2}$ ед. СИ	Z_a , мкТл	$J_z * 10^3$, сА/м	$J_{nz} * 10^3$, сА/м	Фактор Q_z	$J_h * 10^3$, сА/м	$J_{nh} * 10^3$, сА/м
I	200÷300	-30 ÷ -40	1,5 ÷ 2,5	-2,0 ÷ -0,7	0,5	-5 ÷ -10	-4 ÷ -10
II	50÷80	±5 ÷ -15	0,8 ÷ 2	-0,8 ÷ -1,5	-0,5 ÷ -0,8	0,8 ÷ 1,2	-1 ÷ 1,5
III	15÷30	-10 ÷ -30	0,5 ÷ 1,5	0,5 ÷ 1,3	-0,8 ÷ 1	2	1,5
IV	80	±10	-2 ÷ 2	-0,5	-2 ÷ 1	-50	-40

Ко второму (II) типу относятся бедные руды с содержанием железа от 20 до 30%, текстура руд - линзовидно - полосчатая. В отличие от первого

типа все величины магнитных характеристик имеют меньшие значения по абсолютной величине. Магнитная восприимчивость χ не превышает $80 \cdot 10^{-2}$ ед. СИ. Намагниченность J_{nz} примерно такая же, как у первого типа, и составляет $-0,8 \div -1,5 \cdot 10^{-3}$ сА/м, Q_z составляет $-0,5 \div -8$. А вот J_h имеет прямую полярность и величину ниже на порядок. Естественная остаточная J_{nh} меняет свою полярность от обратной к прямой и изменяется от -1000 до 1500 сА/м. Руды этого типа встречаются как в кровле, так и в подошвенной части массивных руд.

Третий (III) тип руд магнетитового оруденения по магнитным свойствам существенно отличается от первых двух типов полярностью намагниченности как по вертикали, так и по горизонтали. Например, вертикальная составляющая остаточной намагниченности J_{nz} имеет прямую полярность, а в I и II типе J_{nz} - обратная, J_h , J_{nh} тоже обладает прямой полярностью.

Величина магнитной восприимчивости χ существенно ниже и составляет $15 \div 30 \cdot 10^{-2}$ ед. СИ. Это вызвано тем, что содержание Fe уменьшилось до $16 \div 20\%$, а также с изменением текстуры – до рассеянно-вкрапленной. По трем скважинам встречены 3 типа минерализации, а именно I, II, III в скважинах 8904, 818, 9001. В шести скважинах встречены породы с двумя типами магнитной минерализации: с I и III типами в скважинах 8611, 9030, 8508; с I и II в скв. 8910, 9016; с I и IV в скважине 8919; с III скважине 8901. Характерно, что породы с третьим типом магнетитового оруденения встречаются в кровле пород I типа. Стабильность естественной остаточной намагниченности существенно выше (Q_z до 1,5), чем для I и II типа. Вероятно, что здесь играет роль генезис руд, а также повторные геологические процессы, хотя для этих месторождений окисление руд не отмечается.

Четвертый (IV) тип руд, выделенный по магнитным свойствам, встреченный только в скважине 8919, характеризуется величиной χ до $80 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, Z_a до ± 10 мкТл (как у второго типа руд). Отличается он от

всех вышеописанных типов оруденения полярностью J_z , высокой сохранностью J_{nz} (Q_z около -2), а также обратной полярностью J_h , величина которой выше на порядок, чем у других типов пород, и обратной полярностью остаточной намагниченности. По геологическим данным это рудное подсечение также не относится по своим свойствам ни к одному из рудных тел. Текстура руд в этой скважине не определена.

В интервалах с магнетитовой минерализацией Уральской СГ-4 (дайки микродиоритов, андезито-базальтов и базальтов) отмечается преобладание прямой намагниченности. Например, встреченные скважиной в интервале 938–948 м диоритовые порфириды имеют величину магнитной восприимчивости χ до $6000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Величина аномалии магнитного поля Z_a меняется от -1000 нТл до + 300 нТл. Значения полной вертикальной составляющей намагниченности J_z положительно намагниченных порфиридов в основном варьируются от 0,7 А/м до 0,23 А/м, достигая 0,4 А/м. Диоритовые порфириды характеризуется отрицательными значениями естественной остаточной намагниченности J_{nz} , а величина не превышает 0,6 А/м. Наиболее вероятные значения Q_z находятся в пределах от 0,78 до 1,56, что свидетельствует о достаточной сохранности остаточной намагниченности [6,12].

По данным магнитометрических исследований, пирротиновая минерализация встречается в Уральской СГ-4 в интервалах: 2597-3770 м, 4385-4609 м, 4670-5000 м, представленных переслаиванием туфов, туффитов, туфопесчаников, туфоалевролитов и их брекчий. Присутствие в породах мелкодисперсного моноклинного пирротина изменяет характер кривых J , J_i , J_n - они становятся изрезанными и знакопеременными. Неоднородность намагниченности этих пород связана, в основном, с изменением естественной остаточной намагниченности J_n в связи с ее разной стабильностью. Отношение J_n/J_i больше 1. Отмечается как прямая, так и обратная полярность J_n , с преобладанием обратной. Величина J_n в зонах пирротиновой минерализации достигает +60 сА/м.

Туффиты (до туфоконгломератов), пестроокрашенные, интенсивно эпидотизированные от крупнопсефитовых до агломератовых, ритмично-слоистые, залегающие на глубине 2481,2 - 2491,2 м в Уральской СГ-4, по магнитным свойствам сильно дифференцированы. Величина магнитной восприимчивости χ меняется от $1500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ до $2400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а величина аномалии магнитного поля варьируется от -1000 нТл до -1500 нТл.

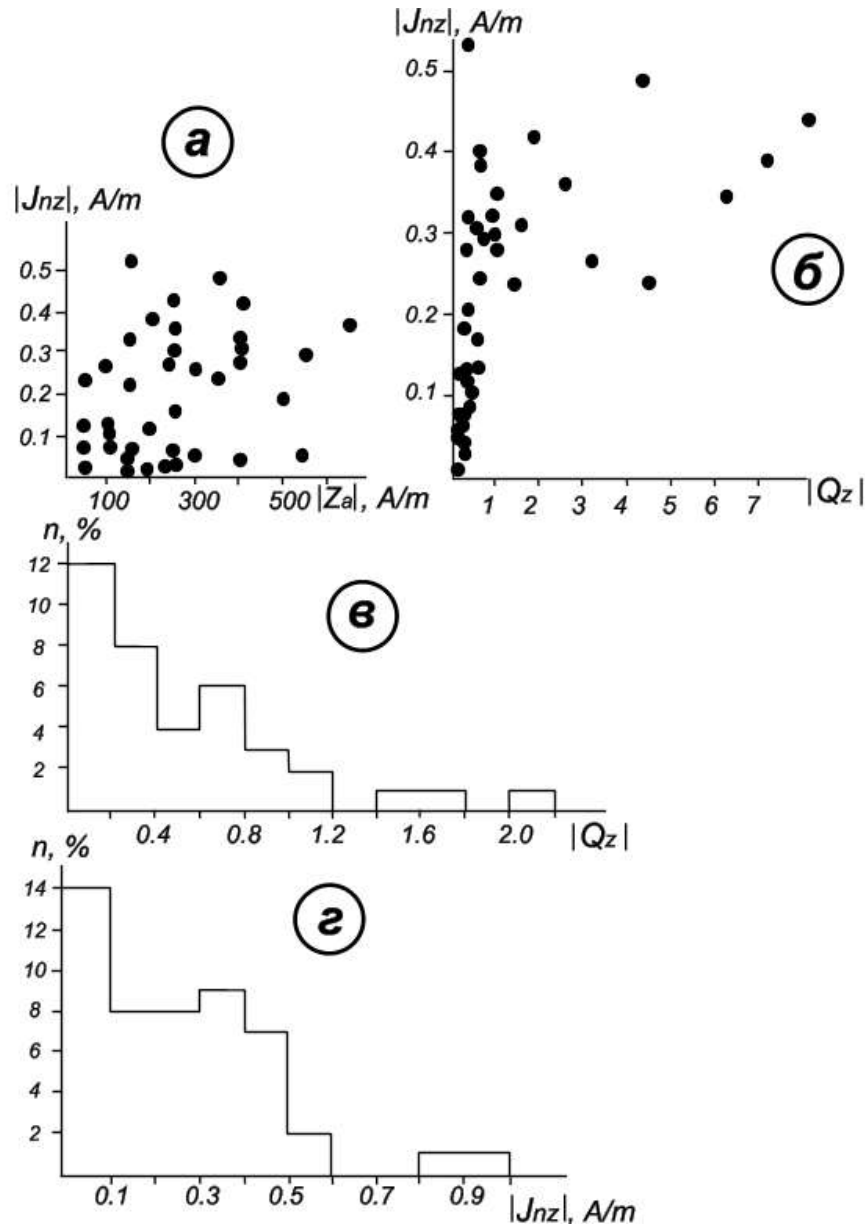


Рисунок 2. Зависимость естественной остаточной вертикальной составляющей намагниченности J_{nz} крупнопсефитовых туффитов Уральской СГ-4 от аномалии вертикальной составляющей магнитного поля Z_a (а) и от фактора Q_z (б); гистограммы распределения Q_z (в) и J_{nz} (г) в интервале глубин 2481-2491 м

Результаты расчета намагниченности, их статистический анализ и корреляционные зависимости, представленные на рисунке 2 подтверждают неоднородность структурно – текстурных особенностей туффитов. На гистограмме распределения естественной остаточной намагниченности и фактора Q_z четко видны две группы пород с различными петрографическими свойствами.

Известно, что чем более крупнозернистыми являются ферромагнитные минералы, тем ниже их магнитная жесткость и меньше сохранность первичной остаточной намагниченности [12], но вероятно, не только изменение размера зерен является причиной различия магнитных свойств, но и условия осадконакопления.

Магнитные свойства гнейсов, брекчий гнейсов, их чередование с брекчиями кристаллосланцев, амфиболитов, вскрытых Воротиловской скважиной, очень сильно дифференцированы, что вообще характерно для метаморфических пород, и особенно, для тех, которые подвержены процессам грейзенизации, аргиллитизации, серицитизации и хлоритизации. Величина магнитной восприимчивости χ меняются от 1000 до $5000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а величина магнитного поля Z_a меняется от + 2000 нТл до -6000 нТл, при максимальных значениях до -10000 нТл, а диаграммы χ и Z_a сильно изрезаны, что говорит о неоднородном распределении магнитных минералов и о наличии различных типов магнитной минерализации [6].

Изучение намагниченности пород, вскрытых Мурунтауской СГ-10, позволило оценить сложный характер магнитной минерализации, а комплексирование метода скважинной магнитометрии с методом электродных потенциалов МЭП дало возможность выделить из общей зоны сульфидной минерализации зоны с моноклинным пирротинном и, таким образом, уточнить литологическое расчленение неоднородного, тонкослоистого разреза скважины.

Расчет полной J_z , индуцированной J_{iz} , естественной остаточной J_{nz} вертикальной составляющих намагниченности и фактора Q_z выполнен в интервале 2120-2145м по измерениям в скважине магнитной восприимчивости и магнитного поля до и после искусственного намагничивания пород вследствие работы с магнитным фрезером (рисунок 3). Анализ показывает, что наблюдается резкое увеличение намагниченности за счет остаточной изометрической намагниченности, вызванной искусственным намагничиванием пород. Величина J_{nz} (измерения июня 1987 г.) составляла $\pm 1,5$ А/м, Q_{zcp} около 5 (рисунок 3,а), а по измерениям декабря 1987 г. (рисунок 3,б), величина J_{nz} составила ± 15 А/м, значения Q_z возросли до 20÷80. Кривые J_{nz} , J_z , Q_z сильно дифференцированы, отмечается как прямая, так и обратная намагниченности. Такое поведение намагниченности характерно для моноклинного пирротина, присутствие которого подтверждается и работами других исследователей [1,11].

В работах А.А. Кременецкого [10,11] описано выделение в разрезе СГ-10 зональности в распределении акцессорной сульфидной минерализации, вызванной «пирит-пирротинным переходом», позднее детально изученным А.К. Алексеевой [1]. Проведенные ею петромагнитные исследования показали, что природа наиболее контрастных петромагнитных разностей связана с различиями в составе сульфидной минерализации: пирит-пирротин моноклинный, пирит - пирротин моноклинный и гексагональный. Изучение вопросов рудообразования, метаморфизма, оценки границ между геологическими образованиями в районе Мурунтауской скважины связано с определением зональности распределения пирита и пирротина по глубине [11].

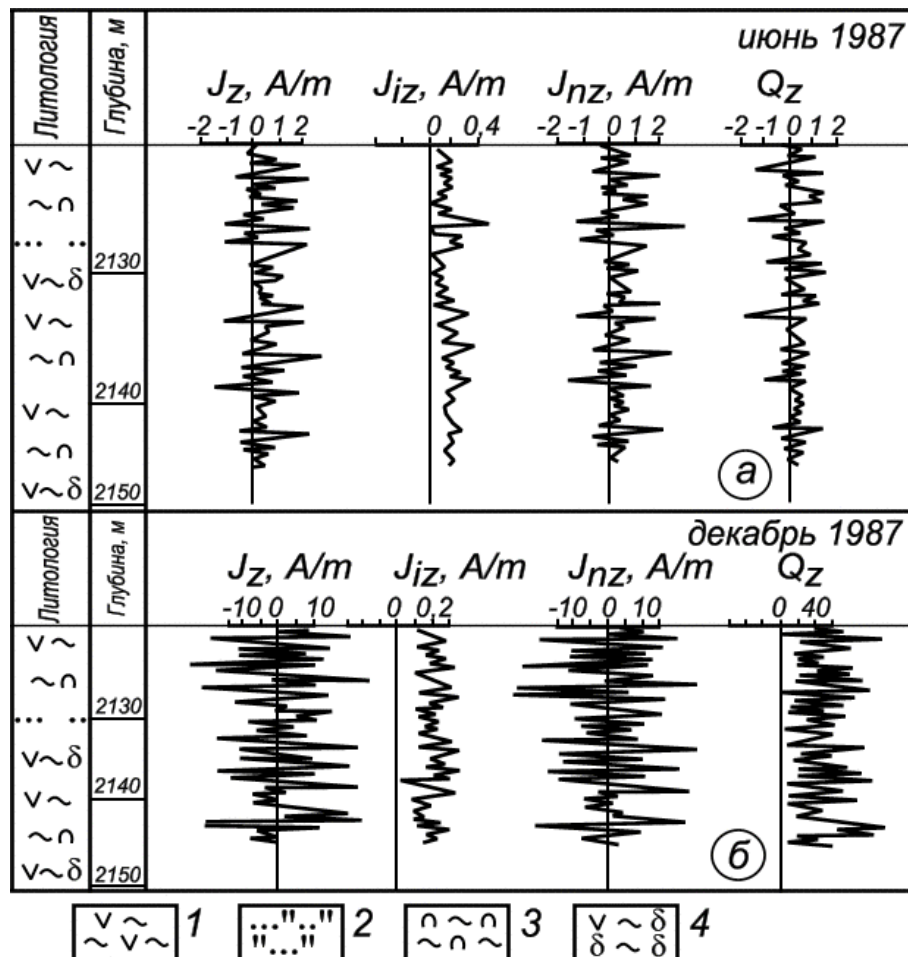


Рисунок 3. Результаты определения вертикальных составляющих полной J_z , индуктивной J_{iz} , естественной остаточной J_{nz} намагниченности и фактора Q_z зон пирротиновой минерализации по данным скважинной магнитометрии в Мурунтауской сверхглубокой скважине до (а) и после (б) искусственного намагничивания в интервале глубин 2120-2150 м: 1 – слюдисто-кварцевые метатерригенные породы; 2 – углеродисто-биотит-мусковитовые (двуслюдяные) сланцы; 3 – тонкое чередование углеродисто-слюдистых сланцев и кварц-плагиоклазовых пород; 4 – углеродисто-биотит-плагиоклаз-кварцевые породы

Пирротин присутствует в виде мелкой вкрапленности, гнездообразных скоплений, просечек, примазок, пленок. Отмечается наличие полных глобулярных форм пирротина в высоко - углеродистых сланцах. По данным И.А. Свяжиной [12] возможно присутствие магнитных карбидов железа.

По эффекту искусственного намагничивания в условиях скважины представляется возможность дать качественную оценку распределения гексагонального моноклинного пирротина в зонах сульфидной

минерализации, т.к. амплитудные значения Z_a в первую очередь зависят от содержания моноклинного пирротина. Поэтому, для решения вопроса о количественном соотношении обоих типов нужна дополнительная информация [6]. Это является еще одной возможностью литологического расчленения разреза по содержанию сульфидной минерализации. Раньше это рассматривалось в работах В.П. Кальварской [9], предложившей для расчленения зон сульфидной минерализации использовать каротаж с намагничиванием пород в скважине.

На рисунке 4 приведены результаты исследований Мурунтауской скважины СГ-10 в интервале глубин 2213-2225 м. Породы в этом интервале представляют собой тонкое переслаивание углеродисто – кварцево – слюдяных сланцев и серых массивных метатерригенных пород [10,11,15]. Породы смяты в мягкие складки, развита биотитовая и пирротиновая минерализация, которая распределена в породе неравномерно. Магнитные свойства подсеченных скважиной пород обусловлены наличием моноклинного пирротина и для них характерны невысокие значения магнитной восприимчивости ($\chi = 500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и знакопеременная, сильно дифференцированная Z_a . Величина аномалии $Z_a = \pm 2000$ нТл. Естественная остаточная намагниченность J_{nz} характеризуется частой сменой знака (см. колонку полярности) и высокими, но почти равными по амплитуде значениями до 5 А/м. Полная вертикальная составляющая намагниченности практически равна J_{nz} , т.к. величина индуцированной J_{iz} очень незначительна. Фактор Q_z много больше 1, сильно дифференцирован по величине. Среднее значение его в интервале 2215–2224 м около 15, а на глубине 2224 м он достигает 100. Такие значения Q_z характерны для «жесткого» типа магнитной минерализации, которая здесь представлена магнитным пирротинном.

Минералогическими исследованиями [10,11] установлено, что рудная минерализация в исследуемых образцах керна представлена, главным образом, пирротинном, рутилом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом и

магнетитом. Основной рудный минерал – пирротин – представлен преимущественно двумя морфологическими типами: крупнозернистым изометрической формы, размеры которого до 1-2 мм и мелкозернистым (0,01 – 0,05 мм), подчеркивающим сланцеватость породы.

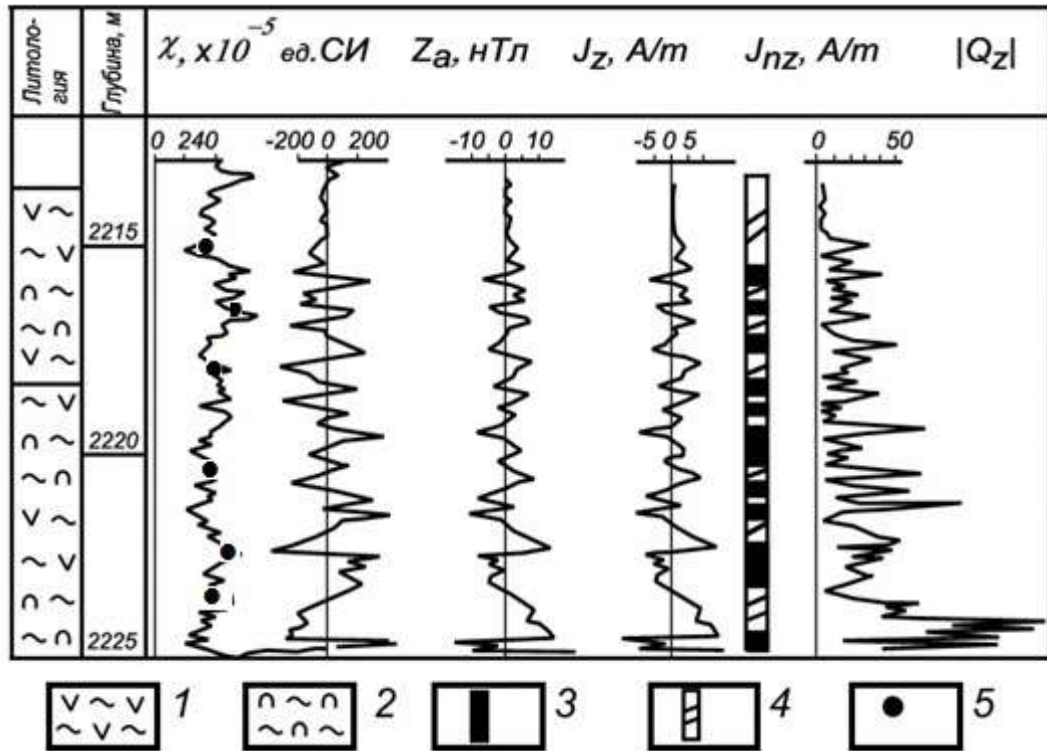


Рисунок 4. Результаты сопоставления магнитной восприимчивости χ и естественной остаточной намагниченности J_{nz} по данным исследования керна и результатам скважинной магнитометрии, а также колонка полярности намагниченности углеродисто-сланцевых пород Мурунтауской СГ-10 в интервал 2210–2225 м:

- 1 – слюдисто-кварцевые метатерригенные породы; 2 – тонкое чередование углеродисто-сланцевых пород и кварц-плагиоклазовых пород;
- 3 – обратная намагниченность пород; 4 – прямая намагниченность пород;
- 5 – результаты изучения керна по данным В.З. Фукса (ВСЕГЕИ)

Принципиальное значение имеет возможность определения по данным скважинной магнитометрии остаточной намагниченности, несущей информацию о древнем магнитном поле. С целью оценки достоверности метода было выполнено сопоставление вычисленных значений естественной остаточной намагниченности и фактора Кенигсбергера пород сверхглубоких скважин с данными палеомагнитных исследований.

При исследовании керна углеродисто-слюдистых сланцев бесапанской и тасказганской свит [12] было установлено, что магнетизм пород связан с минералами, точки Кюри которых приходятся на области температур 200-270, 320-360 и 380-600 °С. Наличие в черных сланцах углеродистого вещества позволило высказать предположение о присутствии в них магнитных карбидов железа – когенита и халипита. Основным носителем намагниченности черносланцевой толщи бесапанской свиты является моноклинный пирротин [1,12].

Для изучения состава магнитной фракции пород использовались методы термомагнитного анализа остаточной намагниченности насыщения J_{rs} и J_n с контролем поведения векторов в процессе терморазмагничивания, а также метод параметров насыщения J_{rs} и разрушающего ее поля H_{crs} , которые очень чувствительны к изменениям состава и структуры магнитных минералов, происходящим при нагревании.

Для углеродисто-слюдистых сланцев разреза характерны большие значения фактора Q : естественная остаточная намагниченность в десятки раз (максимум 159) превышает индуцированную J_i , т.е. намагниченность пород обусловлена остаточной намагниченностью (таблица 2).

Палеомагнитные наклонения 75% образцов изменяются в пределах 0-45° и имеют положительные и отрицательные знаки. Векторы J_n в бесапанской свите направлены вверх, т.е. указывают на обратную полярность остаточной намагниченности. Выделяются три зоны, вскрытые скважиной, которые приурочены к крупным разломам и, в пределах которых векторы J_n направлены вниз. Это говорит о том, что в пределах разрывных структур сланцы прямо намагниченные. Ниже по разрезу, вблизи контакта бесапанской свиты с тасказганской и в самой тасказганской свите наблюдается частая смена знака палеомагнитного наклонения.

Выявленные закономерности в направлениях векторов намагниченности обеих свит объясняются тем, что J_n углеродисто-

слюдистых сланцев является суммой нескольких намагниченностей, из которых каждая связана с определенным магнитным минералом и имеет свое направление. Компонента J_n , обусловленная моноклинным пирротинном, имеет направление, обратное современному геомагнитному полю и сохраняет его в процессе размагничивания.

Сравнение данных расчета остаточной намагниченности J_n по измерениям внутреннего магнитного поля и магнитной восприимчивости χ с полученными значениями χ и J_n по керну Мурунтауской СГ-10 показывает хорошую сопоставимость данных [14].

Из таблицы 2 видно, что полярности магнитных зон совпадают, в том и другом случае породы обладают как прямой, так и обратной намагниченностью.

Таблица 2. Результаты изучения магнитных свойств пород Мурунтауской СГ-10

Глубина, м	№ образца	По керну (по Свяжиной И.А.)					По результатам скважинной магнитометрии (по Иголкиной Г.В.)				
		Поляр- ность	χ 10-5 ед. СИ	J_n , сА/м	Фактор Q	H_c	Поляр- ность	χ 10-5 ед. СИ	Z_a , нТл	J_{nz} , сА/м	Фактор Qz
1172	11201	R	150	143	1,9	9	R	462	175	270	-2
1203	11511	R	656	11153	35,1	14	R1	1075	1000	11900	- 25
1226	11757	R	328	2391	14,6	14	R	338	100	2000	8
2132	20836	R	335	5011	29	22	R	120	350	3420	-19
2411	23778	N	53	1920	72,5	24	N	372	-1000	794	47
3571	36067	N	21,7	558	21,7	72	N	280	-900	205	1,8
3577	36113	N	1004	7214	14,4	20	R	1330	-1600	7320	-6
3582	36192	N	5,2	15,3	5,84	126	R	1120	-100	13,7	-0,3
3597	36351	N	52,5	817	31,1	29	N	420	-600	367	0,5

Оба метода показывают обратную полярность остаточной намагниченности толщи бесапанской свиты, связанную с присутствием моноклинного пирротина, и положительную намагниченность пород из зон мощных тектонических нарушений этой свиты. Магнетизм последних обусловлен присутствием карбидов железа. Величины намагниченности, рассчитанные и измеренные на керне, одного порядка. Отмечается сильная

дифференцированность J_n по глубинам, которая объясняется неоднородностью распределения магнитных минералов. Частая смена полярности и низкие величины магнитного поля и J_n пород тасказганской свиты объясняются присутствием и количественным соотношением в породах положительно намагниченных карбидов железа и прямо - и обратно намагниченных высокотемпературных пирротинов.

Исследования керна Мурунтауской СГ-10 с глубины 3500 м подтверждают результаты интерпретации скважинной магнитометрии о сложном составе магнитной фракции пород, где, в основном, присутствует антиферромагнитный пирротин и отмечается более широкое присутствие когенита и карбида Хэгга. Сделать такой вывод позволили исследования керна методом параметров насыщения. Таким образом, магнетизм пород тасказганской свиты обусловлен главным образом промежуточным пирротином, когенитом и карбидом Хэгга. Анализ величины остаточной коэрцитивной силы пирротинов подтверждает возможность подмагничивания и перемагничивания пород, что приводит к разнице записей магнитного поля до и после подмагничивания[14].

С глубины 4002 м наблюдается региональное изменение магнитных свойств пород – низкие значения χ и магнитного поля, однородность характеристик, связанное со сменой пород: переход от кварцитовидных пород и углеродисто-сланцев к аплитовидным гранитам и пегматито-гранитам. Подтверждено переслаивание пород, связанное с геологическими условиями их образования (породы смяты, передроблены) по результатам определения элементов залегания зон пирротиновой минерализации и отмечено чередование юго-западного направления с северо-западным направлением падения пластов. Кроме того, было установлено, что падение пород с глубиной изменяет свое направление с юго-западного на северо-западное, а угол падения с глубиной выполаживается. Это позволило уточнить и повысить достоверность структурных построений геологических разрезов. Очень важно то, что эти

переходы совпадают с геологическими границами разреза и метаморфической зональностью, указывая на их взаимосвязь.

Выводы

Магнитные свойства пород являются надежным критерием для литологического расчленения тонкослоистых, неоднородных разрезов глубоких и сверхглубоких скважин. По величине магнитной восприимчивости, величине и знаку составляющих магнитного поля, величине и знаку намагниченности, величине и знаку фактора Q_z определяются границы и местоположение в разрезе скважин литологических разностей пород, что подтверждается высокой степенью корреляции между данными различных методов ГИС.

Результаты исследований показали, что для пород с магнетитовой и титаномагнетитовой минерализацией, представленных интрузиями (долеритов, дайками микродиоритов, андезито-базальтов, базальтов) отмечается как прямая, так и обратная намагниченность. Установленные особенности распределения намагниченности с глубиной, величина и знак полной J и естественной остаточной намагниченности J_n пород, вскрытых сверхглубокими скважинами, а также проведенная оценка типов магнитной минерализации дает основание использовать магнитные параметры для геологического истолкования наблюдаемых внутренних и внешних магнитных полей, а также показывает возможности метода для решения палеомагнитных задач.

Применение метода скважинной магнитометрии способствовало оценке границы пирит-пирротинового перехода по результатам комплексного анализа результатов скважинной магнитометрии и метода электронных потенциалов (МЭП), что важно для установления границ золоторудного оруденения в Мурунтауском рудном поле.

Работа частично выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований по Отделению наук о Земле УрО РАН.

Список используемых источников

1 Алексеева А.К., Кременецкий А.А. Природа петрофизических неоднородностей в разрезах золоторудных черносланцевых толщ // Международ. геофиз. конф. 300 лет горно-геологической службе России: тез. докл. Санкт-Петербург. 2000. С.212-213.

2 Магнитометрические исследования нефтегазовых скважин/ Астраханцев Ю.Г.[и др.] // Экспозиция: Нефть Газ. 2008. №4/ Н(69). С. 12-14.

3 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. 1992. № 2. С. 116-121.

4 Опыт применения частотного анализа для изучения ритмичности осадконакопления по физическим свойствам пород/ Бахвалов А.Н. [и др.] // Геология и разведка. 1981. № 5. С. 35 – 40.

5 Глухих И.И., Иголкина Г.В., Астраханцев Ю.Г. Магнитометрия сверхглубоких и глубоких скважин // Геофизика. 1995. № 4. С. 37-41.

6 Иголкина Г.В. Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин: монография. Екатеринбург: УрО РАН. 2002. 215 с.

7 Иголкина Г.В., Мезенина З.С. Исследование магнитных характеристик пород при изучении нефтегазовых бассейнов (на примере Кечимовского и Тевлино-Русскинского месторождений Западной Сибири) // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2013. №2. С. 52-71.
URL: http://www.ogbus.ru/authors/Igolkina/Igolkina_2.pdf

8 Перспективы и возможности скважинной магнитометрии при исследовании осадочных разрезов и палеозойского фундамента Западной Сибири по результатам измерений в глубоких скважинах /Иголкина Г.В..[и др.] // Электрические и электромагнитные исследования в нефтегазовых скважинах. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ. 1999. С. 291-298.

9 Способ каротажа с намагничиванием пород в скважине/ Кальварская В.П.[и др.]// Вопросы геофизики. Ученые записки. ЛГУ. 1978. Вып. 27. С. 27-85.

10 Кременецкий А.А., Лapidзе А.В., Скрыбин В.Ю. Геолого-геохимические методы прогноза полезных ископаемых. М.: Наука, 1990. 223 с.

11 Заири Н.М., Курбанов Н.К. Изотопно-геохимическая модель рудогенеза на рудном поле Мурунтау // Советская геология. 1991. № 8. С. 64-69.

12 Диагностика магнитных карбидов железа в углеродисто-слюдистых сланцах из Мурунтауской СГС /Свяжина И.А.[и др.]// Доклады АН. 1996. Т.347. № 6. С. 792-794.

13 Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра. 1977. 182 с.

14 Igolkina G.V., Svyazhina I.A. Correlation of borehole magnetometry results with paleomagnetic investigation on cores at Muruntau SD-10 // Book of abstracts XX1 General Assembly of IUGG, Scientific Program GA 5.19” Magnetic Petrology and Magnetic Signature of Ore Deposits and Ore Environments “, July 2-14, 1995, Boulder, Colorado, USA, GAB51K-12.

15 Kremenetsky A.A. Models and cross-section of the Earth’s crust (based on super deep drilling data of the USSR). М.: IMGRE, 1991. 161p.

16 Mezenina Z.S., Litvinov E.P., Igolkina G.V. The study of magnetic and paleomagnetic core properties of oil boreholes in the Western Siberia // Book of Abstracts 5th International Conference on Problems of Geocosmos - St. Petersburg, 2004. P. 179-180.

References

1 Alekseeva A.K., Kremenetsky A.A. Priroda petrofizicheskikh neodnorodnostey v razrezah zolotorudnykh chernoslancevykh tolsch // Mezhdunarodnaya geofizicheskaya konferenciya. 300 let gorno-geologicheskoy sluxhbe Rossii. Tezisi dokladov Sankt-Peterburg. 2000. S.212-213. [in Russian].

2 Astrakhantsev Yu. G., Beloglazova N.A., Glukhikh I.I., Igolkina G.V. Magnetometricheskie issledovaniya neftegazovih skvazhin/ Ekspoziciya: Neft' Gaz. 2008. № 4/ N (69). S.12-14. [in Russian].

3 Bahvalov A.N., Igolkina G.V., Portnov V.S. Opredelenie namagnichennosti porod v skvazhine po rezul'tatam izmereniya magnitnogo polya i magnitnoy vospriimchivosti // Geologiya i razvedka. 1992. № 2. S. 116-121. [in Russian].

4 Bahvalov A.N., Zhamaletdinov A.A., Kuznetsov Y.N., Smirnov Y.P., Smolin P.P. Opit primeneniya chastotnogo analiza dlya izucheniya ritmichnosti osadkonakopleniya po fizicheskim svoistvam porod // Geologiya i razvedka. 1981. № 5. S. 35-40. [in Russian].

5 Glukhikh I.I., Igolkina G.V., Astrakhantsev Yu.G. Magnetometriya sverhglubokih i glubokih skvazhin // Geofizika. 1995. № 4. S.37-41. [in Russian].

6 Igolkina G.V. Skvazhinnya magnitometriya pri issledovanii sverhglubokih i glubokih skvazhin. Monografiya. Ekaterinburg: UrO RAN. 2002. 215 S. [in Russian].

7 Igolkina G.V., Mezenina Z.S. Issledovanie magnitnih harakteristik porod pri izuchenii neftegazovih basseinov (na primere Kechimovskogo i Tevlino-Russkinskogo mestorozhdeni Zapadnoi Sibiri) // Elektronniy nauchniy zhurnal "Neftegazovoe delo". 2013. № 2. S. 52-71. http://www.ogbus.ru/authors/Igolkina/Igolkina_2.pdf. [in Russian].

8 Igolkina G.V., Astrakhantsev Yu.G., Glukhikh I.I., Litvinov E.P. Perspektivi i vozmozhnosti skvazhinnoi magnitometrii pri issledovanii osadochnih razrezov i paleozoiskogo fundamenta Zapadnoi Sibiri po rezul'tatam izmereniy v glubokih skvazhinah // Elektricheskie i elektromagnitnie issledovaniya v neftegazovih skvazhinah. Novosibirsk: SO RAN NIC OIGGM. 1999. S. 291-298. [in Russian].

9 Kalvaraskaia V.P., Filippycheva L.C., Metallov V.V., Petrov I.N. Sposob karotazha s namagnichivaniem porod v skvazhine // Voprosi geofiziki. Uch. Zap. LGU. 1978. Vip. 27. S. 27-85. [in Russian].

10 Kremenetsky A.A., Lapidze A.V., Skryabin V.Y. Geologo-geohimicheskie metodi prognoza poleznych iskopaemih. M.: Nauka. 1990. 123 S. [in Russian].

11 Zairi N.M., Kurbanov N.K. Izotopno-geohimicheskaya model' rudogeneza na rudnom pole Muruntau // Sovetskaya geologiya. 1991. № 8. S. 64-69. [in Russian].

12 Svyazhina I.A., Kopteva R.A., Lagutina M.V., Glukhikh I.I. Diagnostika magnitnih karbidov zheleza v uglerodisto-slyudistih slancah iz Muruntauskoj SGS // DAN. 1996. T. 347. № 6. S. 792-794. [in Russian].

13 Sholpo. L.E. Ispol'zovanie magnetizma gornih porod dlya recheniya geologicheskikh zadach. L.: Nedra. 1977. 182 S. [in Russian].

14 Igolkina G.V., Svyazhina I.A. Correlation of borehole magnetometry results with paleomagnetic investigation on cores at Muruntau SD- 10 // Book of abstracts XX1 General Assembly of IUGG, Scientific Program GA 5.19 "Magnetic Petrology and Magnetic Signature of Ore Deposits and Ore Environments", 1995. July 2-14., Boulder, Colorado, USA, GAB51K-12.

15 Kremenetsky A. A. Models and cross-section of the Earth's crust (based on superdeep drilling data of the USSR). M.: IMGRE. 1991. 161 s.

16 Mezenina Z.S., Litvinov E.P., Igolkina G.V. The study of magnetic and paleomagnetic core properties of oil boreholes in the Western Siberia // Book of Abstracts 5th International Conference on Problems of Geocosmos. St. Petersburg. 2004. S. 179-180.

Сведения об авторе

About the author

Иголкина Г.В., д-р геол.-мин. наук, зав. лабораторией промысловой геофизики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

G.V. Igolkina, Doctor of Geol. -min. Sciences, Head well Logging Laboratory Institute of Geophysics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, the Russian Federation

e-mail: galinaigolkina@yandex.ru