

Применение геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований для выявления зон геодинамической активности в рудных скважинах

Е. А. Баженова

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100,
e-mail: Bazhenova_jena@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.2024 г., принята к печати 07.12.2024 г.

Объект исследований. Скважина №1 Северо-Тараташского участка (Средний Урал) и скважина №2 Восточно-Тарутинского месторождения (Южный Урал). Литологический разрез скв. №1 сложен преимущественно гнейсами с маломощными прослоями долеритов, кварцитов, габбро и магнетитовыми кварцитами. Литологический разрез скв. №2 представлен диоритовым порфиритом, скарном, пропилитом, метасоматитами. По всему разрезу наблюдается сульфидная и магнетитовая минерализация с различным содержанием рудных компонентов. *Цель.* Выявление зон геодинамической активности горных пород посредством измерения сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований скважин. *Методика.* Расчет и анализ коэффициентов корреляции Пирсона для параметров геоакустической эмиссии, электромагнитного излучения и параметров стандартного комплекса геофизических исследований. Сопоставление диаграмм измеренных параметров с учетом значимых коэффициентов корреляции и литологического строения исследуемых скважин. *Результаты.* Рассчитаны коэффициенты корреляции между параметрами электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии, кажущимся электрическим сопротивлением, потенциалами собственной поляризации, магнитной восприимчивостью, кавернометрией и естественной радиоактивностью горных пород. В скв. №1 и 2 выявлены зоны геодинамической активности горных пород в интервалах оруденения и по контактам руда–вмещающая порода. Дана качественная оценка геодинамической активности скважин. *Выводы.* Зоны геодинамической активности горных пород проявляются в полях геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Комплексирование результатов каротажа геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения со стандартными методами геофизических исследований скважин позволяет не только проводить литологическое расчленение разреза скважины, но и выделять зоны нарушения и трещиноватости горных пород.

Ключевые слова: картаж, геоакустическая эмиссия, электромагнитное излучение, нарушенные зоны, магнетитовое оруденение, сульфидная минерализация

Application of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in combination with standard geophysical research methods to identify geodynamic activity areas in ore boreholes

Evgeniya A. Bazhenova

Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsen st., Ekaterinburg 620016, Russia,
e-mail: bazhenova_jena@mail.ru

Received 10.09.2024, accepted 07.12.2024

Research subject. Borehole 1 of the Severo-Taratashsky site (Middle Urals) and borehole 2 of the Vostochno-Tarutinsky deposit (Southern Urals). The lithological section of borehole 1 is composed mainly of gneisses with thin interlayers of dolerites, quartzites, gabbro, and magnetite quartzites. The lithological section of borehole 2 is represented by diorite porphyrite, skarn, propylite, and metasomatites. Sulfide and magnetite mineralization with different contents of ore components is observed throughout the section. *Aim.* Identification of geodynamic activity areas in rocks by measuring geo-

Для цитирования: Баженова Е.А. (2025) Применение геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований для выявления зон геодинамической активности в рудных скважинах. *Литосфера*, 25(3), 644–655. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>. EDN: CQCPZS

For citation: Bazhenova E.A. (2025) Application of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in combination with standard geophysical research methods to identify geodynamic activity areas in ore boreholes. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 644–655. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>. EDN: CQCPZS

acoustic emission signals and electromagnetic radiation in combination with standard methods of geophysical borehole surveying. *Methods.* Calculation and analysis of Pearson correlation coefficients for parameters of geoaoustic emission, electromagnetic radiation, and parameters of a standard set of geophysical studies. Comparison of diagrams of measured parameters taking into account significant correlation coefficients and the lithological structure of the studied wells. *Results.* The correlation coefficients between the parameters of electromagnetic radiation and geoaoustic emission, apparent electrical resistance, self-polarization potentials, magnetic susceptibility, caliper measurements, and natural radioactivity of rocks were calculated. In boreholes 1 and 2, geodynamic activity areas were identified in mineralization intervals and along ore-host rock contacts. A qualitative assessment of the geodynamic activity of the boreholes was given. *Conclusions.* Geodynamic activity areas of rocks are manifested in the fields of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in a wide range of frequencies. The use of logging of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in combination with standard methods of geophysical borehole surveying allows not only lithological dissection of the borehole section, but also identification of areas of rock disturbance and fracturing.

Keywords: logging, geoaoustic emission, electromagnetic radiation, disturbed areas, magnetite mineralization, sulfide mineralization

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что геологическая среда неоднородна, для нее характерна иерархия раздробленности, существование отдельностей различного порядка, и вместе с тем она представляет собой образование, целостность которого обеспечивается контактами между блоками различной степени прочности (Садовский и др., 1982). При воздействии сил эндогенной, экзогенной или техногенной природы реакция среды, а именно ее геодинамическая активность, будет проявляться прежде всего в зонах контактов и тектонической нарушенности горных пород. Также эти участки могут вызывать осложнения при бурении скважин, когда при изменении напряженно-деформированного состояния геологической среды в тензочувствительных зонах начинают происходить процессы трещинообразования горных пород, провоцирующие образование каверн, вывалы ствола скважины, прихват скважинного оборудования и т. д. Изучение зон трещиноватости и нарушенности горных пород проводится в основном на нефтегазовых скважинах при исследованиях коллекторов (Ягафаров и др., 2013; Битнер, Прокатень, 2018; Орехов, Амани, 2019), в то время как на рудных месторождениях таким исследованиям отводится второстепенное место. Тем не менее для рудных скважин выявление зон геодинамической активности (трещиноватости и нарушенности) горных пород также является актуальной задачей.

Одна из основных задач методов скважинной геофизики на рудных скважинах заключается в литологическом расчленении разрезов. Для этого применяют следующие методы геофизических исследований скважин (Перелыгин и др., 2015): метод кажущихся сопротивлений, метод потенциалов собственной поляризации, метод скважинной магнитометрии или каротажа магнитной восприимчивости, метод кавернометрии, гамма-каротаж, метод термометрии. При этом выделение зон трещиноватости возможно лишь по косвенным признакам данных электрического каротажа (трещиноватые породы обладают пониженным сопротивлением), кавернометрии и термометрии (Аузин, Ахмад, 2019), которые позволяют выделять уже образовавшиеся зоны трещиноватости и нарушенности горных пород, но не позволяют оценивать их активность.

Для решения задачи, заключающейся в выявлении зон нарушенности горных пород по стволу скважины и оценки их геодинамической активности, целесообразно применять методы, измеряющие естественные сигналы – индикаторы процессов трещинообразования. К таким сигналам относятся электромагнитное излучение (ЭМИ) и геоакустическая эмиссия (ГАЭ) горных пород. Известно, что, процесс зарождения и распространения трещины сопровождается излучением электромагнитных и акустических волн (Пимонов, Иванов, 1990). Это связано с образованием двойных электрических слоев расходящихся берегов трещины и излу-

чением упругих колебаний в процессе роста структурного нарушения целостности породы (Косарев, Соловьев, 2011). Согласно авторам (Беспалько и др., 2005), на развитие процессов трещинообразования и, соответственно, на возбуждение геоакустических и электромагнитных импульсов существенное влияние оказывают структурно-текстурные характеристики, физические свойства и состав горных пород. При этом в генерацию электромагнитных и геоакустических сигналов в зонах трещиноватости и нарушенности горных пород вносят вклад физико-химические и механоэлектрические процессы, например пьезоэффект (Демин и др., 1998). В ряде работ установлено, что сигналы ГАЭ и ЭМИ в скважинах являются не только индикаторами процессов трещинообразования и флюидогазодинамики, но и реагируют на изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород вследствие воздействия на геологическую среду различных деформационных процессов (Rader, 1975; Дьяконов, Улитин, 1982; Ипатов и др., 2004; Троянов и др., 2011; Троянов и др., 2012а, б; Полтавцева и др., 2013; Li et al., 2022; Mari et al., 2023).

Таким образом, в скважинах наблюдаются электромагнитное излучение и геоакустическая эмиссия от различных источников, генерирующих сигналы, регистрируя которые можно оценить геодинамическую активность изучаемого объекта. При этом совместная интерпретация результатов каротажа ГАЭ и ЭМИ с другими методами геофизических исследований скважин (ГИС) позволит получить гораздо больше информации не только о литологическом строении скважины, но и о происходящих в ней процессах.

АППАРАТУРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ГАЭ И ЭМИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для регистрации сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения использовались аппаратно-программные комплексы, разработанные в лаборатории скважинной геофизики Института геофизики УрО РАН, позволяющие осуществлять одновременную регистрацию сигналов ГАЭ и ЭМИ в скважинах (Астраханцев и др., 2018). На рис. 1 представлен один из приборов со снятым корпусом, где отчетливо видны три ориентированных по ортогональным осям датчика ГАЭ и блок ЭМИ.

Магнитная компонента электромагнитного излучения (пТл) регистрируется на трех частотах: 45 (F1), 80 (F2) и 120 (F3) кГц. Геоакустические сигналы ($\text{мм}/\text{с}^2$) регистрируются тремя датчиками-акселерометрами в трех диапазонах частот: 100–500 Гц (X1, Y1, Z1), 500–5000 Гц (X2, Y2, Z2), 2500–5000 Гц (X4, Y4, Z4).

Основные технические характеристики аппаратуры:

Геоакустический канал:

диапазон измерений, $\text{мм}/\text{с}^2$ 0.1–10;

разрешающая способность, $\text{мм}/\text{с}^2$ 0.01.

Электромагнитный канал:

диапазон измерений, пТл 0.1–50;

разрешающая способность, пТл 0.01.

Период измерения всех параметров, с 1.6.

В зависимости от решаемой задачи шаг каротажа может изменяться от 1 до 100 м. Основная запись сигналов осуществляется на спуске скважин-



Блок измерений электромагнитного излучения



Блок акустических измерений

Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс для измерения сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения.

Fig. 1. Hardware and software package for measuring geoaoustic emission and electromagnetic radiation signals.

ного прибора, а детализация и дополнительные измерения – на подъеме. На каждой точке проводится 10 циклов записи всего массива данных. Общее время нахождения прибора на каждой точке составляет порядка 30 с.

Интерпретация результатов каротажа сигналов ГАЭ и ЭМИ осуществляется посредством построения диаграмм параметров: параметры ГАЭ – X1–X4, Y1–Y4, Z1–Z4; параметры ЭМИ – F1–F3.

Для удобства отображения данных параметры ГАЭ с двух горизонтальных датчиков (X, Y) программным способом преобразуются в результирующую H для каждого диапазона частот (Белоглазова, Троянов, 2003):

$$H_{1-4} = \sqrt{X_{1-4}^2 + Y_{1-4}^2}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера выявления зон геодинамической активности горных пород рассмотрим результаты исследований в скв. №1 Северо-Тараташского участка. Литологический разрез скважины сложен преимущественно гнейсами, с маломощными

прослоями долеритов, кварцитов, габбро и магнетитовыми кварцитами. В скважине проведены измерения магнитной восприимчивости горных пород (K), кажущегося сопротивления (KS), потенциалов собственной поляризации (PS), естественной радиоактивности (GL) и сигналов ГАЭ и ЭМИ. Дискретизация непрерывных измерений стандартного комплекса ГИС составляла 10 см, измерения выполнялись на подъеме, скорость записи варьировалась от 300 до 600 м/ч в зависимости от метода. Измерения сигналов ГАЭ и ЭМИ выполнялись поточечно на спуске скважинного прибора, шаг каротажа составлял 1 м.

По результатам геофизических исследований зафиксирован ряд аномалий магнитной восприимчивости, потенциалов собственной поляризации, кажущегося сопротивления, естественной радиоактивности и сигналов ЭМИ в интервале глубин 560–660 м. Для выявления связи между зарегистрированными аномалиями выполнен расчет коэффициентов корреляции Пирсона (R). Для анализа результаты исследований сведены к единому шагу каротажа 1 м. Объем выборки составил 101 значение. Результаты расчета коэффициентов корреляции представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона для стандартного комплекса ГИС и сигналов ГАЭ и ЭМИ (скв. №1 Северо-Тараташского участка, интервал глубин 560–660 м)

Table 1. Pearson correlation coefficients for the standard GWS complex and GAE and EMR signals (well No. 1 of the North-Taratashsky site, depth interval 560–660 m)

	H1	H2	H4	Z1	Z2	Z4	F1	F2	F3	K	PS	KS	GL
H1													
H2	0.26												
H4	0.3	0.11											
Z1	0.16	0.02	0.3										
Z2	0.26	0.7	–0.03	0.02									
Z4	0.24	0.41	0.3	0.05	0.3								
F1	0.03	0.05	0.07	0.04	–0.04	–0.04							
F2	0.02	0.03	–0.02	0.02	–0.03	–0.1	0.9						
F3	0.05	0.07	0.3	–0.01	–0.02	0.1	0.7	0.6					
K	0.08	0.01	0.18	0.06	0.01	–0.07	–0.2	–0.4	–0.1				
PS	0.05	0.06	0.01	0.06	–0.15	0.11	0.49	0.5	0.25	–0.47			
KS	–0.03	–0.06	–0.05	0.07	–0.13	–0.07	0.3	0.4	0.18	–0.35	0.79		
GL	0.01	–0.14	–0.02	0.08	–0.13	–0.11	–0.05	–0.05	0.06	–0.15	0.08	0.02	

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены корреляции, значимые на уровне 0.05. Голубым цветом выделена корреляция между параметрами ГАЭ (H1–H4, Z1–Z4) и ЭМИ (F1–F3), зеленым – между параметрами стандартного комплекса (K – магнитная восприимчивость, PS – потенциалы собственной поляризации, KS – кажущееся сопротивление, GL – естественная радиоактивность), розовым – между параметрами ЭМИ и стандартным комплексом.

Note. Correlations significant at the 0.05 level are shown in bold. The correlation between the parameters of GAE (H1–H4, Z1–Z4) and EMR (F1–F3) is highlighted in blue, green – between the parameters of the standard complex (K – magnetic susceptibility, PS – intrinsic polarization potentials, KS – apparent resistance, GL – natural radioactivity), pink – between the parameters of EMR and standard the complex.

По результатам статистического анализа выделены четыре вида корреляционной зависимости. Слабая корреляция ($0.2 \leq R \leq 0.29$), умеренная ($0.3 \leq R \leq 0.49$) средняя ($0.5 \leq R \leq 0.69$) и сильная ($R \geq 0.7$). При этом наблюдается как прямая, так и обратная корреляция.

Для установления причины корреляционной зависимости рассмотрим результаты геофизических исследований совместно с литологическим строением и с учетом значимых коэффициентов корреляции (рис. 2).

Так, интервалы магнетитовых кварцитов (см. рис. 2а) уверенно выделяются по диаграмме магнитной восприимчивости (К) в интервалах глубин 577.6–578.3, 579.3–581.6, 584.2–585.7, 595.4–598.8, 611.5–612.3, 622.2–622.5, 628.8–629.8, 630.5–632.9, 637.5–642.4, 645.1–647 м. В зонах оруденения значения К достигают $80\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. По диаграмме PS эти участки выделяются отрицательными аномалиями, достигающими значений -200 мВ, что объясняется окислительно-восстановительными реакциями в зонах магнетитового оруденения (восстановительная реакция среды). Корреляция между магнитной восприимчивостью и потенциалами собственной поляризации обратная умеренная. По диаграмме KS магнетитовые кварциты выделяются падением значений кажущегося электрического сопротивления до 20 Ом м (см. рис. 2б). Корреляция между кажущимся сопротивлением и магнитной восприимчивостью также обратная умеренная, тогда как между кажущимся сопротивлением и потенциалами собственной поляризации прямая сильная связь (см. рис. 2в).

По параметрам ЭМИ (F1–F3) аномальные падения значений амплитуд сигналов приходятся на границы руда–вмещающая порода и достигают интенсивности 0.5 пТл на частоте 80 кГц (см. рис. 2г–е). При этом корреляция между параметрами ЭМИ и данными стандартного комплекса изменяется от слабой до средней преимущественно для частот 45 и 80 кГц. Также стоит отметить обратную корреляцию между магнитной восприимчивостью и сигналами электромагнитного излучения.

На диаграммах параметров ГАЭ (H4) и ЭМИ (F3), помимо слабоинтенсивных флуктуаций сигналов на контактах пород (см. рис. 2ж), наблюдается небольшой тренд на увеличение амплитуды фонового уровня с глубины 610 м обоих параметров. С глубины 632 м увеличивается интенсивность флуктуаций параметра ГАЭ H4. По результатам статистического анализа между рассматриваемыми параметрами имеется прямая умеренная корреляция.

В общем случае по параметрам ГАЭ (см. рис. 2з) во всем исследуемом интервале глубин (560 – 660 м) наблюдаются крайне слабые флуктуации сигналов, практически не выходящие за уровень общего фона. Корреляция между параметрами прямая и изменяется от слабой до сильной.

В результате проведенного анализа результатов каротажа в скв. №1 можно предположить следующее: во-первых, выявленная связь между магнитной восприимчивостью, кажущимся сопротивлением и потенциалами собственной поляризации обусловлена литологическим строением исследуемого участка скважины, а именно магнетитовым оруденением. Во-вторых, установленная связь между сигналами ЭМИ и данными стандартного комплекса также обусловлена литологическим строением, но в данном случае аномалии ЭМИ сконцентрированы преимущественно в зонах контактов магнетитового оруденения и вмещающих пород, что позволяет предположить протекающие механоэлектрические процессы в этих зонах (Беспалько, 2019). В-третьих, отсутствие интенсивных флуктуаций сигналов ГАЭ позволяет предположить отсутствие активных процессов трещинообразования.

Таким образом, в результате проведенных исследований в скв. №1 в целях выделения зон геодинамической активности установлено, что разрез скважины является геодинамически стабильным, при этом аномальные флуктуации сигналов ЭМИ и слабоинтенсивные вариации высокочастотного параметра ГАЭ позволяют предположить возможное развитие процессов трещинообразования по контактам пород.

Другим примером выделения геодинамически активных зон горных пород являются исследования, выполненные в скв. №2 Восточно-Тарутинского месторождения (Южный Урал). Литологический разрез скважины представлен диоритовым порфиритом, скарном, пропицитом, метасоматитами. По всему разрезу наблюдаются сульфидная и магнетитовая минерализации с различным содержанием рудных компонентов.

Геофизические исследования (дополнительно проведена кавернометрия) и интерпретация полученных результатов по скв. №2 выполнены по аналогии со скв. №1.

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона (R) произведен для интервала скважины 40 – 164 м. Объем выборки составил 125 значений. Результаты расчета коэффициентов корреляции представлены в табл. 2.

По результатам статистического анализа, так же как и для скв. №1, выделены четыре вида корреляционной зависимости: слабая корреляция ($0.2 \leq R \leq 0.29$), умеренная ($0.3 \leq R \leq 0.49$), средняя ($0.5 \leq R \leq 0.69$) и сильная ($R \geq 0.7$). Наблюдается как прямая, так и обратная корреляция.

На рис. 3 представлено сопоставление диаграмм измеренных параметров в скв. №2 совместно с литологическим строением и с учетом значимых коэффициентов корреляции.

В скв. №2 сульфидная и магнетитовая минерализации с различным содержанием рудных ком-

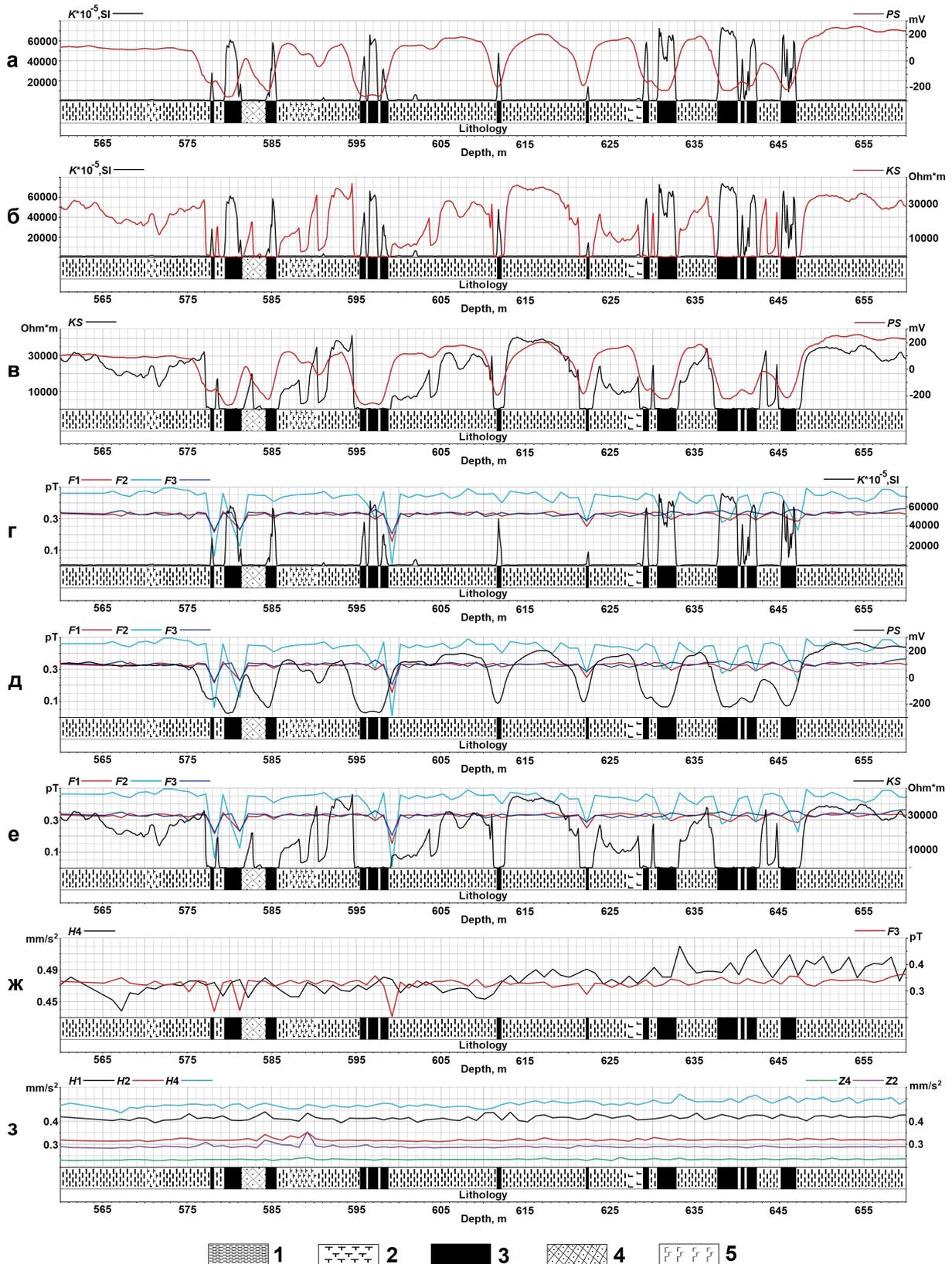


Рис. 2. Сопоставление диаграмм К, PS, KS, параметров ЭМИ (F1–F3) и ГАЭ (H1–H4 и Z2–Z4) с учетом значимых коэффициентов корреляции и литологического строения в интервале глубин 560–660 м скв. №1 Северо-Тараташского участка.

1 – гнейс, 2 – долерит, 3 – магнетитовые кварциты, 4 – кварциты, 5 – габбро.

Fig. 2. Comparison of the diagrams K, PS, KS, EMR parameters (F1–F3) and GAE (H1–H4 and Z2–Z4) taking into account significant correlation coefficients and lithological structure in the depth range of 560–660 m of well No. 1 of the North-Taratashsky site.

1 – gneiss, 2 – dolerite, 3 – magnetite quartzites, 4 – quartzites, 5 – gabbro.

понентов распространена до глубины 150 м. Наибольшее содержание рудных минералов отмечается в скарнах в интервале глубин 88–112 м, что подтверждается данными каротажа магнитной восприимчивости (рис. 3а). В интервалах оруденения значения K достигают $38\,000 \cdot 10^{-5}$ СИ. Диаграмма PS по всему разрезу скважины находится в положительной области значений и местами достигает 400 мВ, что обусловлено присутствием сульфидной минерализации в породах (наблюдается окислительная реакция среды). Корреляция между магнитной восприимчивостью и потенциалами собственной поляризации прямая сильная, тогда как между магнитной восприимчивостью и кажущимся сопротивлением обратная умеренная. По диаграмме KS разрез скважины можно условно разделить на четыре части (см. рис. 3б). Первый интервал от 0 до 90 м представлен диоритовыми порфиридами с редкими включениями сульфидной минерализации. Для данного интервала значения кажущегося сопротивления составляют в среднем 800 Ом · м. Второй интервал представлен магнетитово-сульфидной минерализацией, где наблюдается падение значений кажущегося сопротивления до

20 Ом · м. Третий интервал 115–150 м в основном представлен пропилитами с редкими включениями магнетитово-сульфидной минерализации. Значения кажущегося сопротивления в этом интервале достигают 2000 Ом · м. Четвертый интервал начинается со 150 м и до забоя скважины и представлен метасоматитами. В данном интервале наблюдается постепенное снижение значений кажущегося сопротивления. Максимальная концентрация сульфидных минералов, по данным PS и KS (см. рис. 3в), сосредоточена в интервалах глубин 79–84 м (скарнированные диоритовые порфириды) и 88–114 м (скарны). Корреляция между потенциалами собственной поляризации и кажущимся сопротивлением обратная умеренная. Общий фоновый уровень радиоактивности горных пород по всей скважине не превышает 9 мкР/ч, за исключением двух интервалов (см. рис. 3г, д). Первый – на глубине 80–88 м (максимальное значение естественной радиоактивности достигает 18 мкР/ч) в зоне скарнированных диоритовых порфиридов, второй – в районе 95–98 м в скарнах (максимальное значение естественной радиоактивности достигает 15 мкР/ч). При этом между естественной радиоак-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона для стандартного комплекса ГИС и сигналов ГАЭ и ЭМИ (скв. №2 Восточно-Тарутинского месторождения, интервал глубин 40–164 м)

Table 2. Pearson correlation coefficients for the standard GWS complex and GAE and EMR signals (well No. 2 of the East Tarutinskoye field, depth interval 40–164 m)

	H1	H2	H4	Z1	Z2	Z4	F1	F2	F3	K	PS	KS	CM	GL
H1														
H2	0.48													
H4	-0.24	-0.1												
Z1	0.6	0.46	-0.2											
Z2	0.45	0.78	-0.1	0.62										
Z4	0.03	0.1	-0.1	0.01	0.02									
F1	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.1	0								
F2	0.2	0.1	-0.2	0.1	0.1	0.1	0.37							
F3	0.1	0.01	-0.2	0.1	0.1	0	-0.21	-0.1						
K	-0.12	-0.1	-0.07	-0.05	-0.1	0	0.6	0.2	-0.04					
PS	-0.06	-0.07	-0.07	-0.02	-0.07	-0.01	0.8	0.4	-0.06	0.75				
KS	0.05	0.02	-0.07	0.03	-0.05	-0.02	-0.6	-0.4	-0.07	-0.41	-0.41			
CM	0.07	0.45	0.02	0.06	0.39	0.07	0	0.07	0.1	0	0.05	-0.1		
GL	0.11	0.1	-0.23	0.09	0.07	-0.01	-0.34	-0.15	0.12	-0.37	-0.32	0.14	-0.01	

Примечание. Пояснения – см. табл. 1.

Note. For explanations, see Table 1.

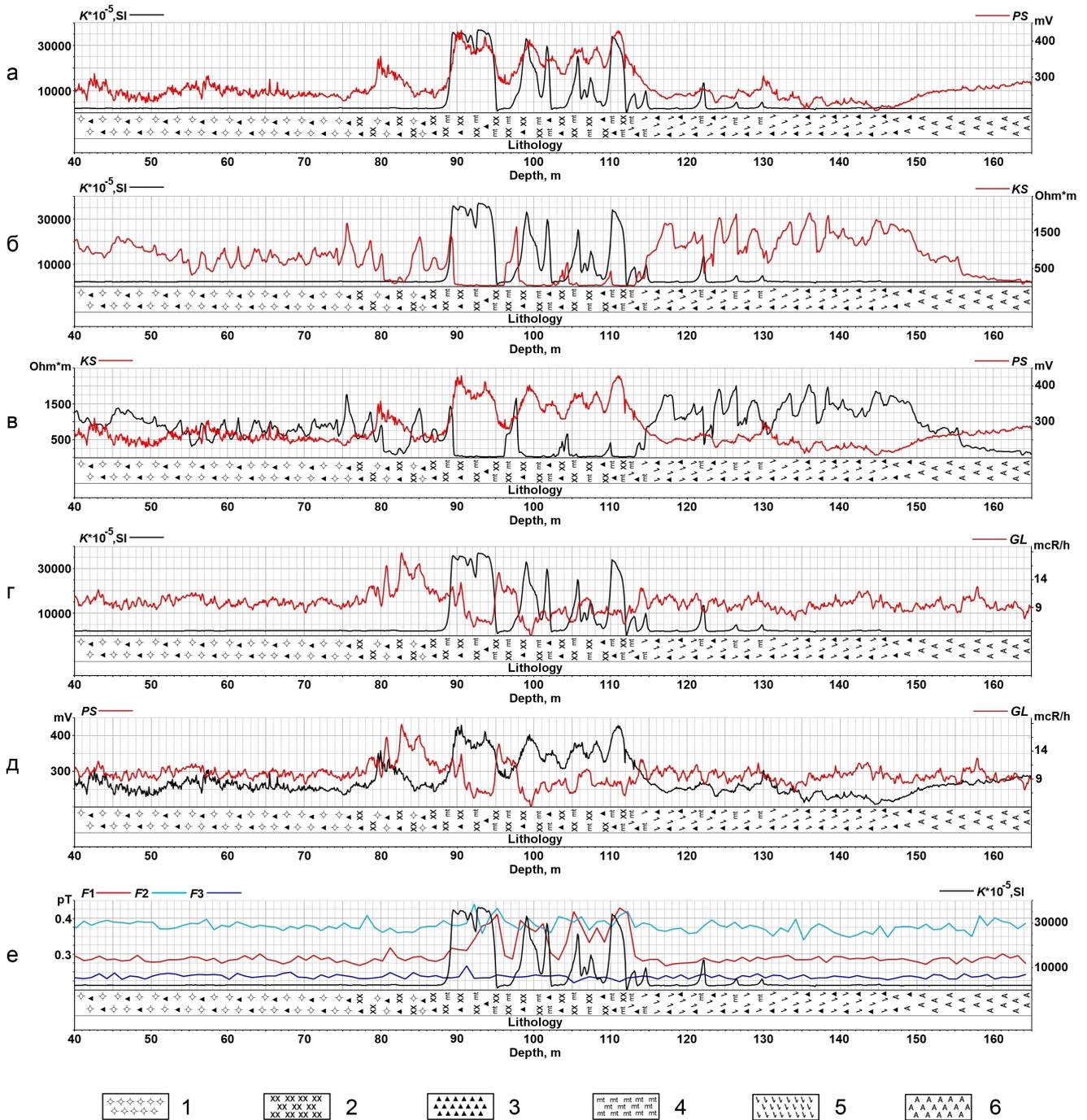


Рис. 3. Сопоставление диаграмм К, KS, PS, GL, CM и параметров ЭМИ (F1–F3) и ГАЭ (H1–H4 и Z1–Z4) с учетом значимых коэффициентов корреляции и литологического строения в интервале глубин 40–164 м скв. №2 Восточно-Тарутинского месторождения (Южный Урал).

1 – диоритовый порфирит, 2 – скарн, 3 – сульфидная минерализация, 4 – магнетитовая минерализация, 5 – пропилиты, 6 – метасоматиты.

Fig. 3. Comparison of the K, KS, PS, GL, CM diagrams and the EMI (F1–F3) and GAE (H1–H4 and Z1–Z4) parameters, taking into account significant correlation coefficients and lithological structure in the depth range of 40–164 m of well No. 2 of the East Tarutinskoye field (Southern Urals).

1 – diorite porphyrite, 2 – scarn, 3 – sulfide mineralization, 4 – magnetite mineralization, 5 – propylites, 6 – metasomatites.

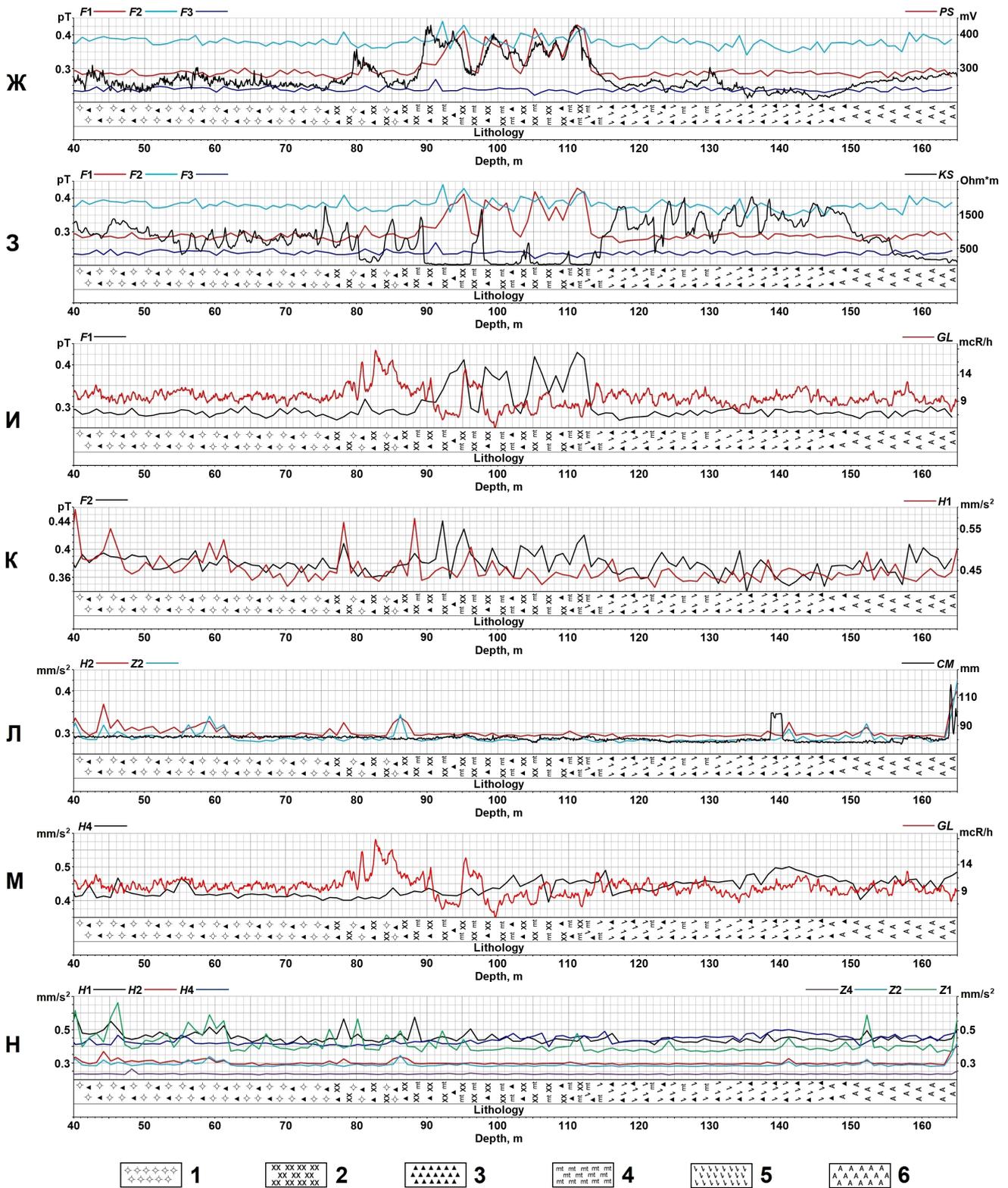


Рис. 3. Продолжение.

Fig. 3. Continuation.

тивностью и магнитной восприимчивостью и потенциалами собственной поляризации наблюдается обратная умеренная корреляция. По данным ЭМИ (см. рис. 3е), участок магнетитово-сульфидной минерализации отмечается широкой положительной аномалией в интервале 92–114 м с максимальной интенсивностью 0.15 пГл на частоте 45 кГц (F1). Корреляция между параметрами ЭМИ и магнитной восприимчивостью прямая средняя, между ЭМИ и потенциалами собственной поляризации прямая сильная (рис. 3ж), тогда как между сигналами ЭМИ и кажущимся сопротивлением обратная средняя (рис. 3з).

Обратная умеренная корреляция наблюдается между естественной радиоактивностью и ЭМИ (см. рис. 3и). В результате как графического, так и статистического анализа выявлена слабая прямая корреляция (см. рис. 3к) между низкочастотным параметром ГАЭ (H1) и среднечастотным параметром ЭМИ (F2). По диаграмме кавернометрии СМ по всему разрезу наблюдаются небольшие изменения диаметра ствола скважины, которые отмечаются и в поле геоакустических сигналов во всем измеряемом диапазоне частот (см. рис. 3л). В интервале глубин 138–140 м отмечена каверна, которая оконтуривается аномалиями геоакустических параметров. Между кавернометрией и параметрами ГАЭ во втором частотном диапазоне получена прямая умеренная корреляция. Также стоит отметить слабую прямую корреляцию между высокочастотным параметром ГАЭ (H4) и естественной радиоактивностью пород (см. рис. 3м). В общем случае по диаграммам ГАЭ (параметры H1–H4 и Z1–Z4) разрез скважины можно условно разделить на две части (см. рис. 3н). Диаграммы верхней части разреза до глубины 98 м сильно дифференцированы, наблюдаются широкие и локальные аномалии с максимальной амплитудой сигналов ГАЭ 0.7 мм/с² в частотном диапазоне 100–500 Гц (параметры H1 и Z1). Диаграммы параметров ГАЭ нижней части разреза с глубины 98 м в основном слабо дифференцированы, но при этом зарегистрирован ряд локальных аномалий с максимальной амплитудой до 0.6 мм/с² в диапазоне частот 100–500 Гц. Между параметрами ГАЭ корреляция изменяется от слабой до сильной и наблюдается как прямая, так и обратная связь.

В результате проведенного анализа данных по скв. №2 можно предположить следующее. Во-первых, выявленная связь между параметрами стандартного комплекса ГИС обусловлена литологическим строением скважины, а именно наличием сульфидно-магнетитовой минерализации. Во-вторых, полученная значимая корреляция между параметрами ЭМИ и данными стандартного комплекса может быть обусловлена и включениями магнетитово-сульфидной минерализации и протекающими механоэлектрическими процессами в зонах

трещиноватости. В-третьих, верхняя часть разреза по параметрам ГАЭ до глубины 98 м представлена трещиноватыми породами и, учитывая преобладание амплитудных значений вертикальной компоненты (Z) над горизонтальными компонентами (H), можно предположить, что трещиноватость пород носит преимущественно субвертикальный характер. Наличие зон трещиноватости в верхней части разреза подтверждают и пониженные значения кажущегося сопротивления. В нижней части разреза скважины, наоборот, возрастает сопротивление пород и снижаются до фонового уровня значения параметров ГАЭ, следовательно, породы в нижней части разреза более плотные, за исключением редких тектонических нарушений, отмечаются на диаграммах геоакустической эмиссии узкими локальными аномалиями различной интенсивности и результатами кавернометрии.

Таким образом, можно предположить, что скв. №2 является геодинамически активной, с возможностью образования каверн, что подтверждается как результатами измерений сигналов ГАЭ и ЭМИ, так и стандартным комплексом ГИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований установлено, что зоны геодинамической активности проявляются в полях геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Совместная интерпретация результатов каротажа ГАЭ и ЭМИ со стандартными методами ГИС позволяет не только проводить литологическое расчленение разреза скважины, но и выделять зоны нарушенности горных пород. Проведение статистического анализа данных геофизических исследований позволяет выявить даже слабые значимые корреляционные связи между измеряемыми параметрами среды. При этом наиболее тесная корреляционная связь наблюдается между сигналами ЭМИ и электрическими и магнитными свойствами горных пород в интервалах оруденения. Также стоит отметить влияние непосредственно рудного компонента и его текстурно-структурных особенностей на характер распределения сигналов ЭМИ. Так, в скв. №1 амплитуда аномалий ЭМИ падает практически до нуля за счет сплошного магнетитового оруденения, а в скв. №2, наоборот, значительно возрастает, так как в скважине присутствует именно минерализация с различным содержанием рудных компонентов, в том числе сульфидных. Полученные результаты согласуются с лабораторными исследованиями, выполненными другими авторами (Беспалько и др., 2005; Вдовин, 2019). Следует отметить отсутствие явной корреляционной связи между кажущимся сопротивлением и сигналами ГАЭ, но при этом в ходе проведения исследований выявлена косвенная связь меж-

ду электрическими и геоакустическими параметрами среды. Это можно объяснить тем, что геоакустическая эмиссия напрямую не связана с электрическими и магнитными свойствами горных пород, но при этом она является индикатором процессов трещинообразования и реагирует на изменение прочностных характеристик горных пород, как и кажущееся сопротивление, что подтверждается результатами исследований в скв. №2.

Таким образом, проведенные исследования в скв. №1 и 2 показали возможности использования сигналов ГАЭ и ЭМИ совместно с данными стандартного комплекса ГИС для выделения зон геодинамической активности горных пород, что актуально при исследованиях современной геодинамической обстановки на новых и разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых в целях отслеживания изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астраханцев Ю.Г., Баженова Е.А., Белоглазова Н.А., Вдовин А.Г., Глухих И.И., Иванченко В.С., Хачай О.А. (2018) Комплексные геофизические исследования массивов горных пород в естественном залегании. (Отв. ред. О.А. Хачай). Екатеринбург: УрО РАН, 105 с. ISBN 978-5-7691-2517-1.
- Аузин А.А., Ахмад Х.М. (2019) Возможности скважинной термометрии при решении гидрогеологических задач. *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геол.*, (1), 72-75.
- Белоглазова Н.А., Троянов А.К. (2003) Оптимизация комплекса информативных параметров геоакустических шумов при решении задач в нефтегазовых скважинах. *Материалы XIII сессии Российского акустического общества*. М., 57-60.
- Беспалько А.А. (2019) Физические основы и реализация метода электромагнитной эмиссии для мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород. Дисс. ... докт. техн. наук. Томск: ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 395 с.
- Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. (2005) Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях. *Изв. Томск. политехн. ун-та*, **308**(7), 18-23.
- Битнер А. К., Прокатень Е.В. (2018) Методы исследования пород-коллекторов и флюидов: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 224 с. ISBN 978-5-7638-3819-0.
- Вдовин А.Г. (2019) Лабораторные исследования сигналов электромагнитного излучения на образцах с различной магнитной восприимчивостью. *Урал. геофиз. вестн.*, **4**(38), 4-9.
- Демин В.М., Майбук З.-Ю. Я., Лементуева Р.А. (1998) О роли пьезоэффекта при механоэлектрическом преобразовании в полиметаллических рудах. *Физика Земли*, (11), 50-55.
- Дьяконов Б.П., Улитин Р.В. (1982) Земные приливы и вариации физических характеристик горных пород. *ДАН СССР*, **264**(2), 322-325.
- Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьенко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. (2004) Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах. *Геофизика*, (2), 25-30.
- Косарев И.Б., Соловьев С.П. (2011) Физические модели генерации электромагнитных сигналов при деформации и разрушении горных пород с низкой пористостью. *Динамические процессы в геосферах*, (2), 165-176.
- Орехов А.Н., Аmani М.М.М. (2019) Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов. *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*, **330**(6), 198-209.
- Перелыгин В.Т., Машкин К.А., Рыскаль О.Е., Коротченко А.Г., Гайнетдинов Р.Г., Романов В.М., Глухов В.Л., Сафонов П.А., Камалтдинов А.Ф., Огнев А.Н., Шабиев И.Х. (2015) Аппаратурно-методические комплексы для исследования рудных, угольных и гидрогеологических скважин. *Каротажник*, **9**(255), 99-127.
- Пимонов А.Г., Иванов В.В. (1990) Имитационная модель процесса трещинообразования в очагах разрушения горных пород. *ФТПРПИ*, (3), 34-37.
- Полтавцева Е.В., Власов Ю.А., Гаврилов В.А. (2013) Исследование откликов на приливное воздействие в рядах скважинных геоакустических измерений. *Вестн. Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Сер.: Науки о Земле*, **2**(22), 178-183.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. (1982) О свойстве дискретности горных пород. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, (12), 3-18.
- Троянов А.К., Дьяконов Б.П., Мартышко П.С., Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И., Гаврилов В.А., Белоглазова Н.А. (2011) Сейсмоакустическая эмиссия и электромагнитное излучение трещиноватых пород в скважинах. *Докл. АН*, **436**(1), 118-120.
- Троянов А., Иголкина Г.В., Астраханцев Ю.Г., Баженова Е.А. (2012а) Трехкомпонентный геоакустический каротаж для контроля при разработке газовых месторождений. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, **2**, 53-58.
- Троянов А.К., Мартышко П.С., Юрков А.К., Дьяконов Б.П., Астраханцев Ю.Г., Начапкин Н.И., Козлова И.А., Баженова Е.А., Вдовин А.Г. (2012б) Выделение проницаемых зон по скважинным наблюдениям сейсмоакустической эмиссии и концентрации гелия. *Докл. АН*, **445**(2), 210-213.
- Ягафаров А.К., Клещенко И.И., Новоселов Д.В. (2013) Современные геофизические и гидродинамические исследования нефтяных газовых скважин: учеб. пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 140 с.
- Li D., Huang L., Zheng Y., Li Y., Wannamaker P., Moore J. (2022) Feasibility of source-free DAS logging for next-generation borehole imaging. *Sci. Rep.*, **12**(1), 11910.
- Mari J.L., Delay F., Voisin C., Gaudiani P. (2023) Active and Passive acoustic logging applied to the detection of preferential flow in a sedimentary aquifer. *Sci. Technol. Energy Transit.*, **78**, 25.
- Rader D. (1975) Acoustical logging of oil wells. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **57**(S1), S29-S30.

REFERENCES

- Astrakhantsev Ju.G., Bazhenova E.A., Beloglazova N.A., Vdovin A.G., Glukhikh I.I., Ivanchenko V.S., Hachai O.A. (2018) Complex geophysical studies of rock massifs in natural occurrence. (Ed. O.A. Hachai). Ekaterinburg, UrO RAN, 105 p. ISBN 978-5-7691-2517-1 (In Russ.)
- Auzin A.A., Akhmad H.M. (2019) Possibilities of borehole thermometry in solving hydrogeological problems. *Vestn. Voronezh. Gos. Universiteta. Ser.: Geol.*, (1), 72-75. (In Russ.)
- Beloglazova N.A., Troyanov A.K. (2003) Optimization of a Complex of Informative Parameters of Geoaoustic Noises in Solving Problems in Oil and Gas Wells. *Proceedings of the XIII Session of the Russian Acoustic Society*. Moscow, 57-60. (In Russ.)
- Bespal'ko A.A. (2019) Physical principles and implementation of the electromagnetic emission method for monitoring and short-term forecasting of changes in the stress-strain state of rocks. Doct. tech. sci. diss. Tomsk, FGAOU VO NI TPU Publ., 395 p. (In Russ.)
- Bespal'ko A.A., Yavorovich L.V., Fedotov P.I. (2005) Relationship between electromagnetic signal parameters and electrical characteristics of rocks under acoustic and quasi-static influences. *Izv. Tomsk Politekhnich. Universiteta*, **308**(7), 18-23. (In Russ.)
- Bitner A.K., Prokaten' E.V. (2018) Methods of studying reservoir rocks and fluids: textbook. manual. Krasnoyarsk, SFU Publ., 224 p. ISBN 978-5-7638-3819-0. (In Russ.)
- Demin V.M., Maibuk Z.-Yu. Ya., Lementueva R.A. (1998) On the role of the piezoelectric effect in mechanoelectric transformation in polycrystalline ores. *Fizika Zemli*, (11), 50-55. (In Russ.)
- D'yakonov B.P., Ulitin R.V. (1982) Earth tides and variations of physical characteristics of rocks. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **264**(2), 322-325. (In Russ.)
- Ipatov A.I., Gorodnov A.V., Ipatov S.I., Mar'enko N.N., Petrov L.P., Skopintsev S.P. (2004) Study of amplitude-frequency spectra of acoustic and electromagnetic noise signals during fluid filtration in rocks. *Geofizika*, (2), 25-30. (In Russ.)
- Kosarev I.B., Solov'ev S.P. (2011) Physical models of electromagnetic signal generation during deformation and destruction of low-porosity rocks. *Dinamicheskie Protessy v Geosferakh*, (2), 165-176. (In Russ.)
- Li D., Huang L., Zheng Y., Li Y., Wannamaker P., Moore J. (2022) Feasibility of source-free DAS logging for next-generation borehole imaging. *Sci. Rep.*, **12**(1), 11910.
- Mari J.L., Delay F., Voisin C., Gaudiani P. (2023) Active and Passive acoustic logging applied to the detection of preferential flow in a sedimentary aquifer. *Sci. Technol. Energy Transit.*, **78**, 25.
- Orekhov A.N., Amani M.M.M. (2019) Capabilities of geophysical methods for predicting reservoir fracturing. *Izv. Tomsk Politekh. Universiteta. Inzhiniring Georesursov*, **330**(6), 198-209. (In Russ.)
- Perelygin V.T., Mashkin K.A., Ryskal' O.E., Korotchenko A.G., Gainetdinov R.G., Romanov V.M., Glukhov V.L., Safonov P.A., Kamaltdinov A.F., Ognev A.N., Shabiev I.H. (2015) Hardware and methodological complexes for the study of ore, coal and hydrogeological wells. *Karotazhnik*, **9**(255), 99-127. (In Russ.)
- Pimonov A.G., Ivanov V.V. (1990) Simulation model of the process of crack formation in the centers of rock destruction. *FTPRPI*, (3), 34-37. (In Russ.)
- Poltavtseva E.V., Vlasov Yu.A., Gavrilov V.A. (2013) Study of responses to tidal action in borehole geoaoustic measurement series. *Vestnik Kamchatskoi Regional'noi Assotsiatsii Uchebno-Nauchnyi Tsentra. Ser.: Nauki o Zemle*, **2**(22), 178-183. (In Russ.)
- Rader D. (1975) Acoustical logging of oil wells. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **57**(S1), S29-S30.
- Sadovskii M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. (1982) On the Discreteness Property of Rocks. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, (12), 3-18. (In Russ.)
- Troyanov A.K., D'yakonov B.P., Martyshko P.S., Astrakhantsev Yu.G., Nachapkin N.I., Gavrilov V.A., Beloglazova N.A. (2011) Seismoacoustic emission and electromagnetic radiation of fractured rocks in wells. *Doklady Earth Sciences*, **436**(1), 118-120. (In Russ.)
- Troyanov A., Igolkina G.V., Astrakhantsev Ju.G., Bazhenova E.A. (2012a) Three-component geoaoustic logging for monitoring during the development of gas fields. *Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftnykh i Gazovykh Mestorozhdenii*, **2**, 53-58. (In Russ.)
- Troyanov A.K., Martyshko P.S., Yurkov A.K., Astrakhantsev Y.G., Nachapkin N.I., Kozlova I.A., Bazhenova E.A., Vdovin A.G., D'yakonov B.P. (2012b) Identification of permeable zones based on the borehole observations of seismoacoustic emissions and helium concentrations. *Doklady Earth Sciences*, **445**(1), 893-896. (In Russ.)
- Vdovin A.G. (2019) Laboratory studies of electromagnetic radiation signals on samples with different magnetic susceptibility. *Ural. Geofiz. Vestnik*, **4**(38), 4-9. (In Russ.)
- Yagafarov A.K., Kleshchenko I.I., Novoselov D.V. (2013) Modern geophysical and hydrodynamic studies of oil and gas wells: study guide. Tyumen', TyumGNGU Publ., 140 p. (In Russ.)