

ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИ НАРУШЕННЫХ ЗОН В ПРЕДЕЛАХ РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Е.А. Баженова

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия,
e-mail: Bazenova_jena@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены результаты комплексирования скважинных и наземных геофизических методов на территории железорудного месторождения. Цель исследований на территории Северо-Тараташского участка заключалась в поиске и оценке геодинамической активности дизъюнктивных тектонических нарушений в пределах Куватальского проявления магнетитовых кварцитов. Скважинные исследования включали в себя регистрацию сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения. Комплекс наземных геофизических работ состоял из площадной магнитометрической съемки, пешеходной гамма-съемки и эманационной съемки. По результатам исследования сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в скважинах на данном объекте выявлены аномалии, обусловленные близостью тектонических нарушений. Были установлены частотные диапазоны сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения, позволяющие выделять геодинамически активные тектонические нарушения геологической среды в околоскважинном пространстве. Наземные геофизические работы в районе исследованных скважин проводились с целью подтверждения результатов каротажа. В ходе выполненных работ были получены карты аномального магнитного поля и мощности экспозиционной дозы, а также графики объемной активности радона. В результате анализа имеющейся геологической информации о строении участка работ, скважинных измерений и наземных геофизических исследований были подтверждены известные тектонические нарушения, а также выделены новые, проявляющие свою геодинамическую активность в исследованных геофизических полях.

Ключевые слова: геоакустическая эмиссия, электромагнитное излучение, каротаж, наземная магнитометрия, пешеходная гамма-съемка, тектонические нарушения, напряженно-деформированное состояние, комплексирование.

Для цитирования: Баженова Е. А. Выделение тектонически нарушенных зон в пределах рудного месторождения по комплексу геофизических методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 67–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_67.

Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods

E.A. Bazhenova

Institute of Geophysics of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: Bazenova_jena@mail.ru

Abstract: The article discusses the results of complexing of land works and downhole geophysical surveys in the area of an iron ore deposit. The research undertaken at the North Taratash site was aimed to detect and estimate the geodynamic activity of disjunctive faults within the boundaries of Kuvatal occurrence of magnetite quartzite. The borehole surveys included recording of geoacoustic emission and electromagnetic radiation. The land works package consisted of areal magnetometry, hand-held gamma-radiation survey and radon measurements. The geoacoustic emission and electromagnetic radiation data analysis reveals the anomalies conditioned by the proximity to faults. The frequency ranges of signals of geoacoustic emission and electromagnetic radiation are determined, which enables identifying geodynamically active fault zones in the geological borehole environment. The land works in the test borehole area aimed to confirm the borehole logging results. During the research, the anomalous magnetic fields were mapped, and the three-dimensional graphs of radon activity were plotted. The analysis results of the available geological information on the structure of the test area, data of land works and borehole surveys prove the known faults and reveal new geodynamically active faults within the limits of the studied geophysical fields.

Key words: geoacoustic emission, electromagnetic radiation, logging, land magnetometry, hand-held gamma-radiation survey, faults, stress-strain behavior, complexing.

For citation: Bazhenova E. A. Identification of fault zones within an orebody using a set of geophysical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):67-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_67.

Введение

Месторождения твердых полезных ископаемых по своей структуре являются уникальными геологическими объектами и, как правило, приурочены к зонам контактового метаморфизма и разрывным тектоническим нарушениям различного типа. При этом геологическая среда находится в напряженном состоянии и имеет участки концентрации и разгрузки напряжений. Разгрузка напряжений может происходить в местах образования новых разломов либо существующих. В пределах одного месторождения может встречаться большое количество разрывных тектонических нарушений различного типа с разной геодинамической активностью. Процесс разработки месторождений влияет на напряженно-деформированное состояние (НДС) массивов горных пород, вследствие чего могут возникать такие катастрофические явления, как горные удары, обвалы и пр.,

сопровождающиеся многочисленными разрушениями и человеческими потерями [1]. Обнаружение и исследование тектонически нарушенных зон на территории месторождений твердых полезных ископаемых является важной и актуальной задачей.

Как известно, одним из индикаторов изменения НДС массивов горных пород служат сигналы электромагнитного излучения (ЭМИ) и геоакустической эмиссии (ГАЭ). В настоящее время исследование взаимосвязи сигналов ГАЭ и ЭМИ и их отклик на изменение напряженного деформированного состояния ведется в различных научных направлениях, как в лабораторных, так и в реальных условиях. Так, например, в работах [2–5] описываются лабораторные эксперименты по установлению связи между стадиями разрушения образцов горных пород и сигналами ЭМИ и ГАЭ. С одной стороны, лабораторные экспе-

рименты на образцах дают достаточно хорошие результаты, так как заранее известны все необходимые для моделирования процессов разрушения параметры, как самих образцов, так и измерительной аппаратуры [6–9]. С другой стороны, результаты лабораторных экспериментов не всегда совпадают с результатами натуральных исследований, потому как геологическая среда, имея сложное иерархично-блоковое строение, постоянно подвергается воздействию факторов эндогенного и экзогенного происхождения [10].

В реальных условиях измерения сигналов электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии выполняют в шахтах [11–14] для выявления и мониторинга зон повышенной напряженности в массивах горных пород; в условиях открытых горных выработок [15] для оценки реакции геологической среды на техногенные взрывы; на дневной поверхности [16–18] для исследования естественных электромагнитных и геоакустических сигналов литосферного происхождения и выявления тектонически нарушенных зон; в скважинах [19–21] для выявления зон повышенной напряженности и трещиноватости массивов горных пород в естественном залегании и установления связи вариаций сигналов ГАЭ и ЭМИ с деформационными процессами известной физической природы.

При этом зоны тектонической нарушенности отражаются и в полях других геофизических методов. В частности, в работе [22] описываются результаты использования глубинного сейсмического зондирования, наземной магнитометрии и гравиразведки при выделении и картировании разломных структур.

Исходя из вышеизложенного материала, очевидно, что для выделения, картирования и оценки геодинамической активности тектонических нарушений

геологической среды на месторождениях полезных ископаемых необходимо рассматривать комплекс геофизических методов.

В настоящей работе описаны результаты комплексирования наземных геофизических методов и скважинных измерений в условиях месторождения магнетитовых кварцитов.

Объект исследований

Тараташский мигматитовый комплекс обнажается в северной части Башкирского мегантиклинория в одноименном тектоническом блоке, имеющем вид выгнутой к востоку линзы, вытянутой в север-северо-восточном направлении. Общая площадь Тараташского блока около 400 км². Комплекс обрамляется вулканогенно-осадочными отложениями айской и саткинской свит нижнего мезопротерозоя и преимущественно сложен гиперстеновыми плагиогнейсами, мигматизированными двупироксеновыми кристаллическими сланцами и метакремниитами. Подчиненное значение имеют биотитовые гнейсы с гранатом, кордиеритом, силлиманитом и графитом, а также железистые и графитовые кварциты. Породы Тараташского комплекса претерпели метаморфизм гранулитовой фации, более поздние процессы диафореза гранулитов проявились в условиях амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций» [23, с. 5]. С востока и с запада Тараташский блок ограничен надвигами, имеющими восточное падение, при этом в разрезе имеет форму клина, погружающегося на восток [24].

Непосредственно объектом исследований является проявление Куватал, пространственно расположенное в северо-восточной части Тараташского рудного района. В структурном плане проявление приурочено к северо-восточной части Тараташского антиклинория, гра-

Характеристики аппаратурно-программного комплекса МЭШ-42
Specifications of hardware–software suite MESH-42

Блок аппаратуры	Регистрируемые параметры			Расчетные параметры		
Электромагнитное излучение	$F_1 - 45 \text{ кГц}$ $F_2 - 80 \text{ кГц}$ $F_3 - 120 \text{ кГц}$					
Геоакустическая эмиссия	Частотный диапазон, Гц			Частотный диапазон, Гц		
	100 – 500	500 – 5000	2500 – 5000	100 – 500	500 – 5000	2500 – 5000
	$X_1 - \text{ГД}$ $Y_1 - \text{ГД}$ $Z_1 - \text{ВД}$	$X_2 - \text{ГД}$ $Y_2 - \text{ГД}$ $Z_2 - \text{ВД}$	$X_4 - \text{ГД}$ $Y_4 - \text{ГД}$ $Z_4 - \text{ВД}$	$H_1 - \text{результурующая с двух ГД}$	$H_2 - \text{результурующая с двух ГД}$	$H_4 - \text{результурующая с двух ГД}$
ГД – горизонтальный датчик; ВД – вертикальный датчик.						

ничащего на востоке с позднепротерозойским прогибом Уралтауской структурно-фациальной зоны по Юрюзань-Зюраткульскому глубинному разлому, который представлен здесь Восточно-Тараташской зоной расланцевания. На площади Куватал выделяется шесть тектонических блоков, разделенных между собой дизъюнктивами взбросо-надвигового характера [25].

В районе исследованных скважин по геологическим данным имеются две тектонические структуры дизъюнктивного типа – надвиг, пространственно простирающийся с севера на юг и разделяющий проявление Куватал на две области (куватальская свита и зона зеленосланцевых диафоритов), и разлом, примыкающий к зоне надвига с западной стороны.

Аппаратура и методика

Для решения задачи поиска тектонических нарушений и оценки их геодинамической активности в пределах Куватальского проявления магнетитовых кварцитов были выбраны скважинные исследования сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения, площадная магнитометрическая и шпуровая эманационная съемки, а также пешеходная гамма-съемка.

Скважинные исследования

Регистрация сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в скважинах осуществлялась аппаратурно-программным комплексом МЭШ-42. Прибор разработан в лаборатории скважинной геофизики Института геофизики УрО РАН и предназначен для синхронных измерений сигналов ГАЭ и ЭМИ в скважинах [26, 27]. Основные характеристики аппаратуры приведены в таблице.

Результаты каротажа представляются в виде диаграмм измеренных и расчетных параметров геоакустических (при расчете имеют размерность регистрируемого ускорения в мм/с^2) и электромагнитных (переводятся в единицы магнитной составляющей электромагнитного поля в пТл) сигналов.

Измерения сигналов ГАЭ и ЭМИ в скважинах выполнялись дискретно, с шагом каротажа от 1 до 5 м в зависимости от глубины скважины и времени на каротажные работы.

Наземные геофизические исследования

Перед проведением наземных геофизических исследований были выполнены топогеодезические работы с целью плано-высотной привязки пунктов наб-

людений. На участке работ было размечено 22 профиля и 2 магистрали.

Направление профилей задавалось вкрест простираения основных геологических границ (с юго-запада на северо-восток). Привязка пикетажа осуществлялась по данным GPS-приемника, нумерация пикетов велась с юго-запада на северо-восток. Начальной точкой отчета пикетажа служила западная граница исследуемой площади. Нумерация профилей начиналась с северо-западного, велась с севера на юг.

Магнитометрическая съемка

Измерения полного вектора постоянного магнитного поля проводились переносным цезиевым магнитометром G-859SX, производства компании Geometrics (США). Масштаб съемки 1:5000. Расстояние между профилями 50 м, между пикетами 5 м. Измерения производились с шагом дискретизации 5 с и с сохранением координат каждой точки съемки. Оценка условий работы с последующей увязкой измеренных значений геомагнитного поля T , при высоте магниточувствительного датчика (МЧД) в 1,7 м, осуществлялась на контрольном пункте (КП), который был выбран на участке работ в малоградиентном месте — месте установки магнитовариационной станции (МВС). В качестве приемника МВС использовался протонный «Оверхаузеровский» магнитометр POS, производства УГТУ-УПИ [28]. Качество съемки оценивалось по измерениям на КП перед началом и в конце рабочего дня.

Уровень нормального магнитного поля полного вектора для данной территории был выбран условно по средневзвешенным значениям и принят равным 57 200 нТл. Картографический материал по магнитной съемке представлен картами полного вектора аномального магнитного поля (ΔT_a).

Пешеходная гамма-съемка

Гамма-съемка проводилась по профилям с помощью радиометра СРП-68-01. Масштаб съемки 1:10 000. Расстояние между профилями составило 100 м, шаг съемки — 50 м. По результатам пешеходной гамма-съемки была построена карта мощности экспозиционной дозы. Дополнительно был намечен профиль 17 для сопоставления с результатами эманационной съемки.

Шпуровая эманационная съемка

Эманационная съемка проводилась радиометром альфа-активных газов РГА-01П. Измерения проводились по профилю 17 с шагом между пикетами 50 м. При проведении съемки отбирались пробы подпочвенного воздуха с глубины 0,5–1,0 м и определялась объемная активность радона в этих пробах [29].

Результаты исследований

Скважинные исследования

На территории Северо-Тараташского участка скважинные геофизические исследования сигналов геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения были выполнены в семи скважинах. На рис. 1 представлена схема расположе-

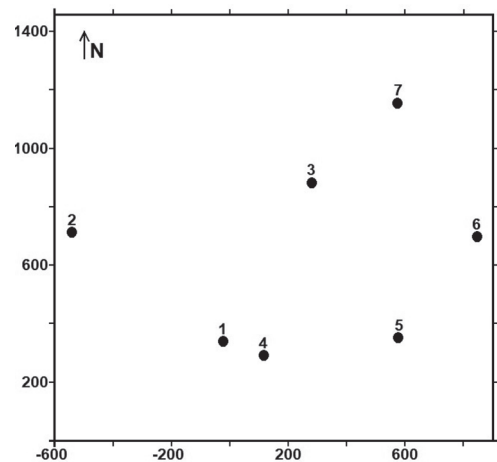


Рис. 1. Схема расположения скважин

Fig. 1. Borehole pattern

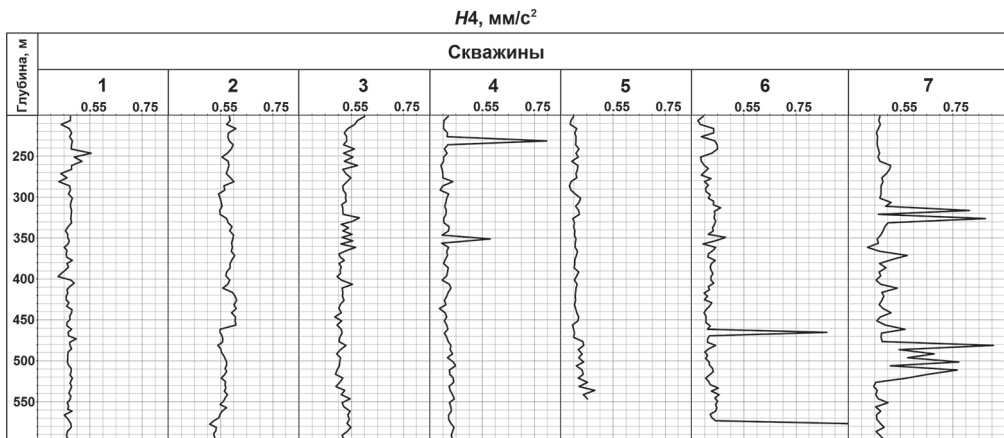
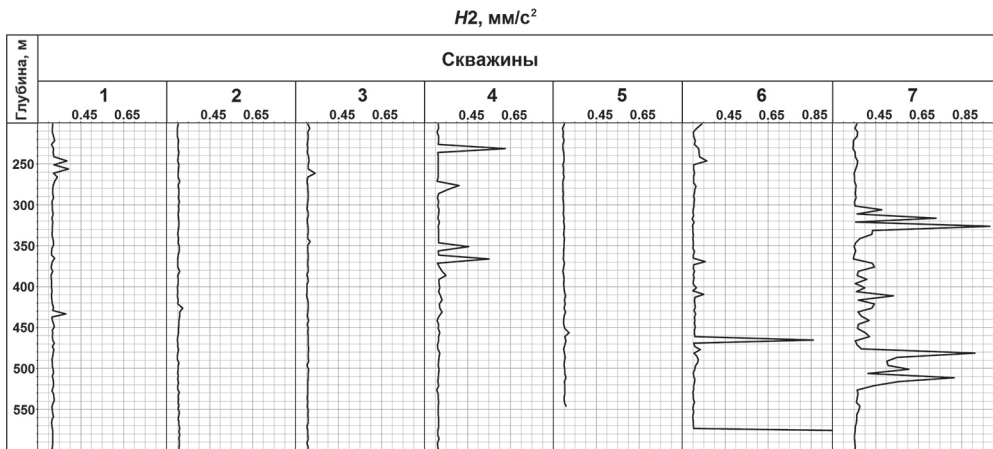
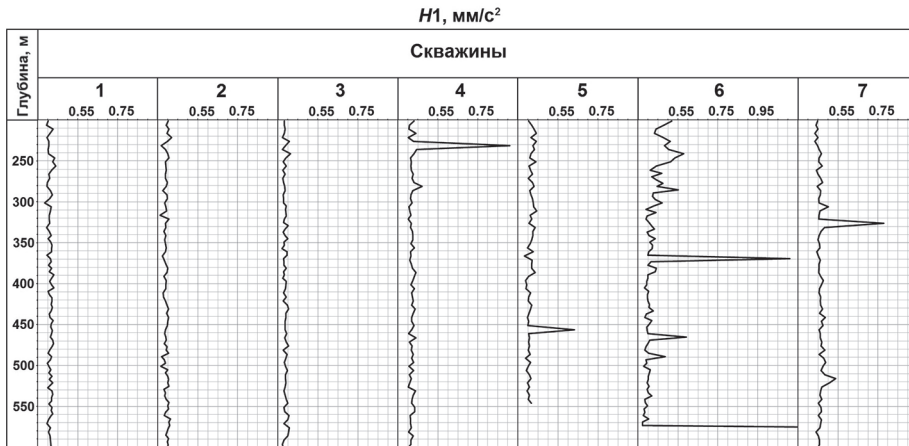


Рис. 2. Фрагменты записей сигналов геоакустической эмиссии в семи скважинах в интервале глубин 200–600 м с горизонтальных датчиков (параметры $H1-H4$)

Fig. 2. Sub-records of geoacoustic emission signals in 7 boreholes in depth range of 200–600 m from horizontal sensors (parameters $H1-H4$)

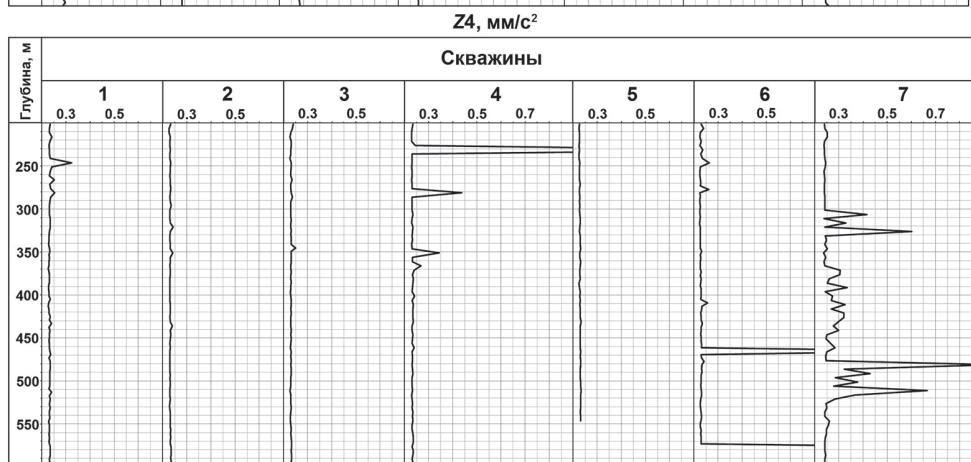
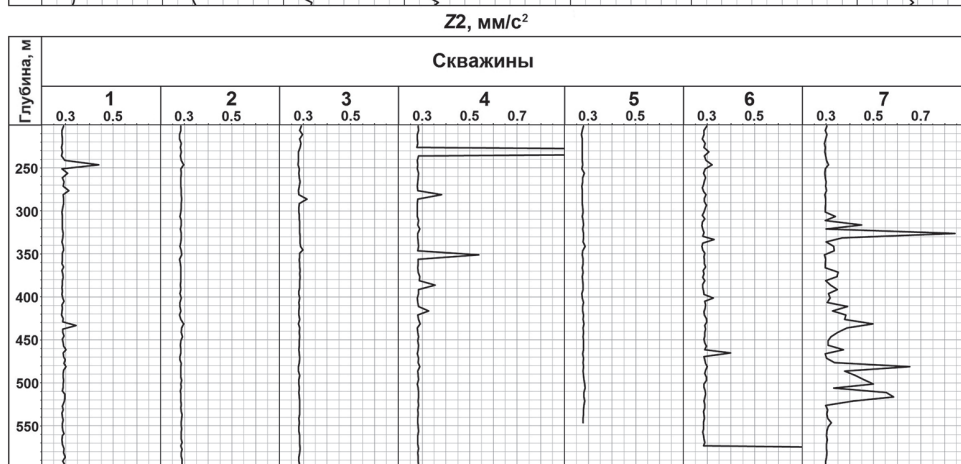
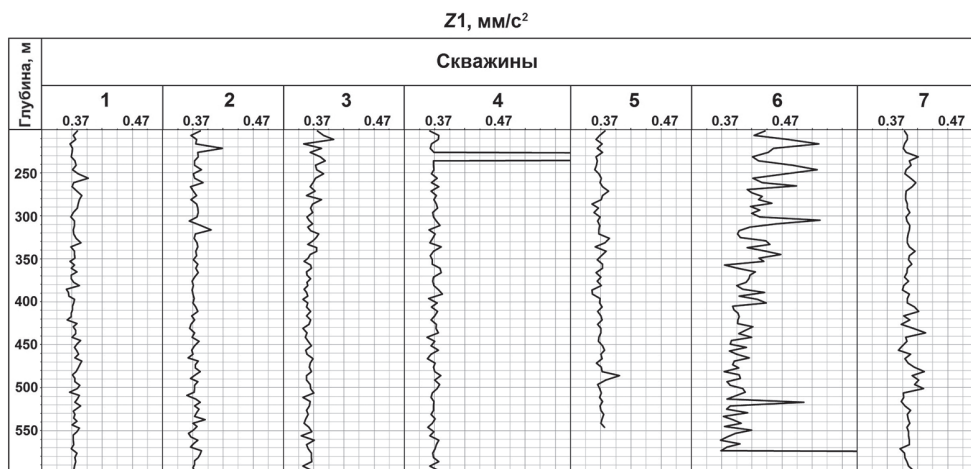


Рис. 3. Фрагменты записей сигналов геоакустической эмиссии в семи скважинах в интервале глубин 200–600 м с вертикального датчика (параметры Z1–Z4)

Fig. 3. Sub-record of geoaoustic emission signals in 7 boreholes in depth range of 200–600 m from vertical sensor (parameters Z1–Z4)

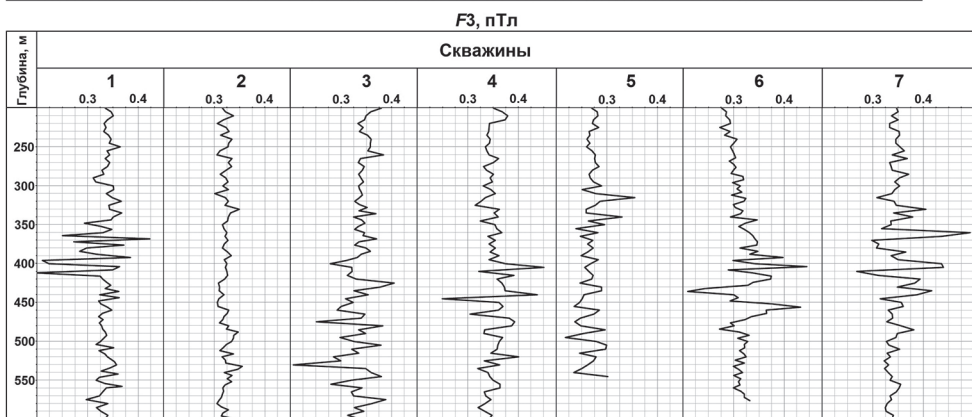
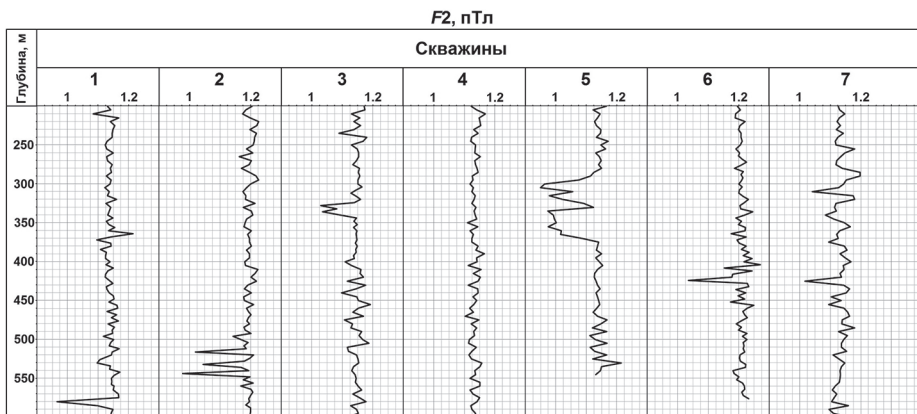
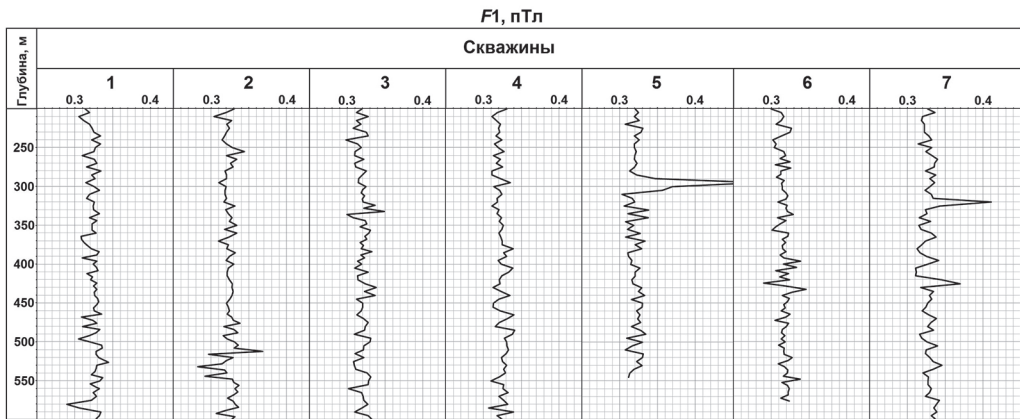


Рис. 4. Фрагменты записей сигналов электромагнитного излучения в семи скважинах в интервале глубин 200–600 м

Fig. 4. Sub-records of electromagnetic radiation signals in 7 boreholes in depth range of 200–600 m

ния скважин, построенная по материалам геологического отдела Магнитогорского металлургического комбината (ПАО «ММК»).

Масштаб карты 1:10 000, расстояние на карте указано в метрах. Максимальное расстояние между скважинами № 2–№ 6 — 1360 м. Самой глубокой является скважина № 2 — забой на 1090 м. Шаг каротажа сигналов ГАЭ и ЭМИ составлял 5 м, детализация выполнялась через 1–2 м.

При детальном анализе результатов каротажа в скважинах Куватальского проявления [30] было установлено, что в интервале глубин от 200 до 600 м наблюдается схожее поведение кривых некоторых параметров. Для их сопоставления диаграммы каждого параметра ГАЭ и ЭМИ были построены в одном и том же масштабе для всех скважин.

На рис. 2 приведены диаграммы параметра H в трех частотных диапазонах. Как можно заметить, в диапазоне частот 100–500 Гц (H_1) первые три скважины имеют практически одинаковый уровень фоновых значений ГАЭ, тогда как на остальных четырех скважинах имеются локальные аномалии, пространственно совпадающие с зонами контактов пород. По параметру H_2 (500–5000 Гц) аномальные изменения сигналов ГАЭ наблюдаются во всех скважинах. Наиболее чувствительным для данного участка работ оказался параметр H_4 (2500–5000 Гц). Во всех скважинах наблюдаются не только локальные аномалии параметра H_4 , но и ступенчатое изменение фонового уровня, свидетельствующее о наличии процессов трещинообразования.

Похожая ситуация наблюдается при сопоставлении данных с вертикального датчика сигналов ГАЭ (рис. 3). Причем аномалии по параметру Z более узкие, за исключением скважины № 6. В этой скважине форма кривой сильно диффе-

ренцирована и имеет ярко выраженный тренд на увеличение амплитудного уровня от забоя к устью, причем такая картина наблюдается только в частотном диапазоне 100–500 Гц.

Пространственное совпадение аномалий сигналов ГАЭ с горизонтальных и вертикального датчиков говорит о том, что в зонах трещиноватости и контактов горных пород образование и распространение трещин происходит не только в субгоризонтальной, но и в субвертикальной плоскостях. При этом самой активной, в геодинамическом плане, является скважина № 7.

Диаграммы параметров ЭМИ кардинально отличаются от записей параметров ГАЭ (рис. 4). Формы кривых дифференцированы. Присутствуют зональные аномалии, охватывающие интервалы от нескольких метров (F_1 и F_2), приуроченные к контактам пород и магнетитовому оруденению [31], и до нескольких десятков метров (параметр F_3). Причем формы диаграмм F_3 (120 кГц) похожи между собой и пространственно не совпадают с известными контактами пород и зонами трещиноватости, а следовательно, имеют другой источник происхождения. При этом стоит отметить, что в скважине № 2 отсутствуют аномальные изменения амплитудного уровня сигналов ЭМИ на частоте 120 кГц.

При совместном рассмотрении параметров ЭМИ и ГАЭ можно заметить, что в основном локальные аномалии по параметрам геоакустической эмиссии оконтуривают зоны напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в околоскважинном пространстве, выделенных по параметрам ЭМИ.

То есть по границам зон повышенного НДС происходят процессы активного трещинообразования, вызванного нарушением сплошности геологической среды в процессе бурения скважин.

Наземные геофизические исследования

По результатам проведенных наземных геофизических исследований были составлены карты (рис. 5, см. Приложение с. 83) аномального магнитного поля ΔT_a и мощности экспозиционной дозы (МЭД). Для проведения детального анализа полученных результатов на карты были вынесены скважины, в которых выполнялись исследования сигналов ГАЭ и ЭМИ, профиль объемной активности радона (ОАР) и МЭД (на карте Пр 17), а также тектонические нарушения, известные по геологическим данным (черные линии разного типа) и предполагаемые по геофизическим исследованиям (зеленые линии разного типа).

По карте аномального магнитного поля ΔT_a исследуемый участок условно можно разделить на две области. Первая, с положительными значениями магнитного поля, — западная часть района работ, вторая, отрицательная, область — восточная часть района. Между двумя этими областями проходит линия нулевых значений. В юго-восточной части выделяется мощная положительная аномалия ΔT_a (до 1000 нТл), приуроченная к магнетитовому оруденению в толще зеленосланцевых диафоритов. В северо-западной части исследуемого района наблюдается участок с повышенными значениями магнитного поля, совпадающий с кварцит-магнетитовым оруденением в толще пород куватальской свиты. Юго-восточная область (скважина № 5) и северо-западная (скважина № 3) разделены линией нулевых значений. Эти нулевые области пространственно совпадают с границами тектонических нарушений, установленных по геологическим данным. По материалам ПАО «ММК», известно, что между скважинами № 3 и № 7, № 4 и № 5 проходит линия надвига, разделяющая весь участок на две большие области: Куватальская

свита — западная часть района работ, зона зеленосланцевых диафоритов — восточная часть района. По результатам исследований было установлено, что линия надвига уходит от известной в юго-восточную часть исследуемого участка. Линия разлома (черная пунктирная) проходит между скважинами № 1 и № 3 и предположительно продолжается за линией надвига. Судя по линиям нулевых значений, между скважинами № 1 и № 4 существует тектоническое нарушение, не отмеченное в геологическом описании. При этом с восточной стороны от скважины № 4 имеется зона нулевых значений ΔT_a , возможно, являющаяся ответвлением от разлома, проходящего между скважинами № 1 и № 4. Учитывая, что район скважины № 2 не был охвачен наземными исследованиями, сложно судить о пространственном простирании линии в районе скважины № 3.

По результатам пешеходной гамма-съемки (см. рис. 5) зона Куватальской свиты выделяется пониженными значениями МЭД от 5 до 10 мкР/ч. Зону зеленосланцевых диафоритов условно можно разделить на четыре области, между которыми проходят участки средних значений мощности экспозиционной дозы 10–13 мкР/ч (на карте представлены переходными цветами). Линия надвига и предполагаемые разломы пространственно совпадают с участками средних значений МЭД. При этом зона разлома (по геологическим данным) в породах Куватальской свиты, отмеченная на карте ΔT_a в западной ее части, по результатам пешеходной гамма-съемки практически не выделяется, тогда как за линией надвига отчетливо прослеживается линия средних значений МЭД в районе скважины № 7.

Результаты шпуровой эманационной съемки и пешеходной гамма-съемки по профилю 17 приведены на рис. 6. На графиках отмечается несколько аномальных

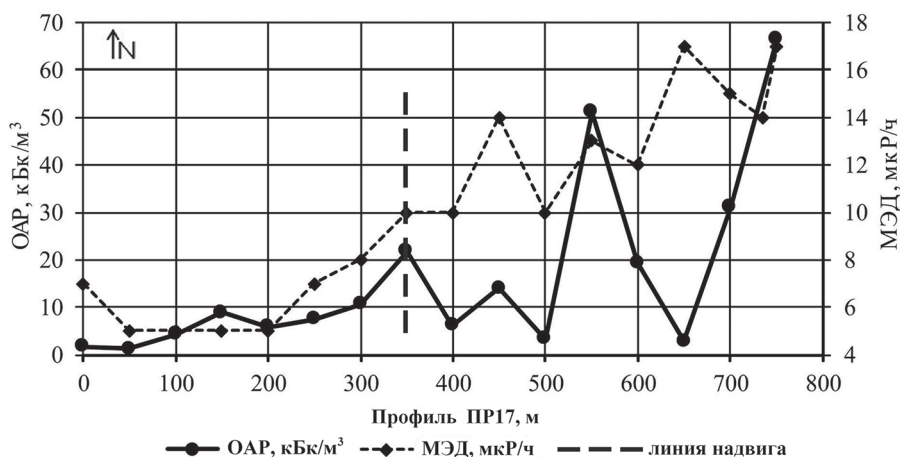


Рис. 6. Объемная активность радона (ОАР) и мощность экспозиционной дозы (МЭД) по профилю Пр17
 Fig. 6. Volumetric radon activity (VRA) and exposure dose rate (EDR) in profile Pr17

значений МЭД и объемной активности радона (ОАР). Так, на 350 м фиксируется значения ОАР порядка 20 кБк/м³, далее, по профилю на 550 м — 50 кБк/м³, и на границе исследуемого участка ОАР достигает значений свыше 65 кБк/м³. По значениям МЭД от 200 м до 400 м наблюдается переходная зона со средними значениями, затем происходит увеличение мощности экспозиционной дозы с максимумами на 450 м (14 мкР/ч), 650 м (17 мкР/ч) и 750 м (17 мкР/ч). Полученные результаты измерений ОАР и МЭД могут свидетельствовать о смене литологического состава горных пород и о наличии тектонического нарушения, что также согласуется с геологической информацией и результатами наземной и скважинной геофизики.

Заключение

В ходе проведенных исследований было установлено, что наиболее чувствительным к процессам трещинообразования в пределах Куватальского проявления магнетитовых кварцитов является параметр геоакустической эмиссии H_4 (2500–5000 Гц). Параметр электромагнитного излучения F_3 (120 кГц) выступает в роли индикатора дизъюнктивных

тектонических нарушений в пределах исследуемого участка, существование которых подтверждается не только геологическими данными, но и наземными методами геофизики. Также следует отметить, что скважина № 2 находится вдали от выделенных тектонических структур и по результатам каротажа сигналов ГАЭ и ЭМИ (частоты 2500–5000 Гц и 120 кГц, соответственно) является динамически пассивной, что также согласуется с наземными исследованиями. В остальных скважинах наблюдается общая закономерность: чем ближе к точке измерения линия тектонического нарушения, тем больше аномальные изменения амплитудных уровней параметров как ЭМИ, так и ГАЭ.

При сопоставлении результатов наземной магнитометрии и пешеходной гамма-съемки наблюдается сходимость результатов полученных данных с имеющейся геологической информацией. Дополнительно были выделены тектонические нарушения на участке Куватальского проявления, геодинамическая активность которых проявляется не только по результатам скважинных исследований, но и по объемной активности радона.

Таким образом, примененный комплекс наземных и скважинных геофизических методов, выбранный для выделения и оценки геодинамической активности тектонических нарушений в пределах Куватальского проявления магнетитовых кварцитов на Северо-Тараташском участке, доказал свою эффективность.

В процессе будущих исследований планируется закрыть наземной магнитометрией и пешеходной гамма-съёмкой западную часть карты в районе скважин № 1 и № 2. Также планируется

увеличение объема профилей для измерения объемной активности радона.

Автор выражает признательность сотрудникам Института геофизики УрО РАН: А.Г. Вдовину, А.Н. Антипину, М.А. Федосову, Б.Д. Хацкевичу — за помощь в проведении скважинных и наземных геофизических исследований, в обработке и построении графического материала; Н.А. Белоглазовой, В.А. Давыдову и А.К. Юркову — за помощь при интерпретации полученных данных и редактировании текста рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломов М. А., Константинов А. В., Терешкин А. А. Перспективные методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов пород // Проблемы недропользования. — 2019. — № 4(23). — С. 83–90. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.083.

2. Вострецов А. Г., Кривецкий А. В., Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е. Характеристики электромагнитного излучения горных пород при их разрушении в лабораторных экспериментах // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2013. — № 2(21). — С. 46–54.

3. Бизяев А. А., Савченко А. В., Цупов М. Н., Смирнягин И. И., Смирнов М. Н. Исследования сигналов электромагнитного излучения, сопутствующих разрушению горных пород / Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы IX Международной научно-практической конференции. — Междуреченск: КузГТУ, 2020. — С. 1051–1056.

4. Кульков Д. С., Имашев С. А. Анализ сигналов акустической эмиссии в образцах геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2019. — № 2–1(50). — С. 274–280.

5. Kong Biao, Wang Enyuan, Li Zenghua Regularity and coupling correlation between acoustic emission and electromagnetic radiation during rock heating process // Geomechanics and Engineering. 2018, vol. 15, no. 5, pp. 1125–1133. DOI: 10.12989/gae.2018.15.5.1125.

6. Богомолов Л. М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов // Физическая мезомеханика. — 2010. — Т. 13. — № 3. — С. 39–56.

7. Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е., Шарапова М. Д., Щелканова В. И. Прогнозирование трещинообразования в деформируемых конструкционных материалах и горных породах по их электромагнитной эмиссии // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 163–168.

8. Zhong-Hui Li, Quan Lou, En-Yuan Wang, Shuai-Jie Liu, Yue Niu Study on acoustic-electric-heat effect of coal and rock failure processes under uniaxial compression // Journal of Geophysics and Engineering. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 71–80. DOI: 10.1088/1742-2140/aa8437.

9. Xiaofei Liu, Enyuan Wang Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine // Journal of Geophysics and Engineering. 2018, vol. 15, no. 3, pp. 909–920. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa3ce.

10. Шуман В. Н. Нелинейная динамика геосреды: переходные процессы и критические явления // Геофизический журнал. — 2014. — Т. 36. — № 6. — С. 129–142.
11. Zhang Q., Wang E., Feng X., Yue N., Ali M., Lin S., Wang H. Rockburst risk analysis during high-hard roof breaking in deep mines // Natural Resources Research. 2020, vol. 29, no. 17, pp. 4085–4101. DOI: 10.1007/s11053-020-09664-w.
12. Рассказов И. Ю. Геоакустические предвестники горных ударов // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. — 2011. — № 3/4(8/9). — С. 121–143.
13. Рассказов И. Ю., Мигунов Д. С., Аникин П. А., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Желнин Д. О. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 3. — С. 169–179.
14. Потапов П. В., Шведикова И. Н. К вопросу исследований геомеханического состояния горных пород и активности электромагнитного излучения на участках полей шахт «Южная» и «Черниговская» геофизическими методами // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2011. — № 1. — С. 48–52.
15. Вдовин А. Г., Белоглазова Н. А. Геофизические исследования динамической устойчивости массивов горных пород при разработке карьера // Уральский геофизический вестник. — 2020. — № 1(39). — С. 4–11. DOI: 10.25698/UGV.2020.1.1.04.
16. Уваров В. Н., Малкин Е. И., Санников Д. В. Электромагнитное проявление геоакустической эмиссии литосферы // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2016. — № 1(12). — С. 55–65. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-12-1-55-65.
17. Боков В. Н., Воробьев В. Н. Изменчивость геоакустической эмиссии и изменения атмосферной циркуляции // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. — 2013. — № 32. — С. 43–54.
18. Hamimi Z., Hagag W., Osman R., El-Bialy M., Abu El-Nadr I., Ei Sayed Fadel M. The active Kalabsha Fault Zone in Southern Egypt: detecting faulting activity using field-structural data and EMR-technique, and implications for seismic hazard assessment // Arabian Journal of Geosciences. 2018, vol. 11, no. 15, pp. 421. DOI: 10.1007/s12517-018-3774-1.
19. Троянов А. К., Дьяконов Б. П., Мартышко П. С., Астраханцев Ю. Г., Начапкин Н. И., Гаврилов В. А., Белоглазова Н. А. Сейсмоакустическая эмиссия и электромагнитное излучение трещиноватых пород в скважинах // Доклады Академии наук. — 2011. — Т. 436. — № 1. — С. 118–120. DOI: 10.1134/S1028334X11010119.
20. Беляков А. С., Диденкулов И. Н., Жигалин А. Д., Лавров В. С., Малеханов А. И., Николаев А. В. Сейсмоакустический мониторинг в Воротиловской глубокой скважине: методика и результаты // Геология и геофизика Юга России. — 2017. — № 3. — С. 5–12.
21. Гаврилов В. А., Полтавцева Е. В., Дещеревский А. В., Бусс Ю. В., Морозова Ю. В. Мониторинг состояния геосреды на основе синхронных геоакустических и электромагнитных скважинных измерений: использование естественного электромагнитного излучения // Сейсмические приборы. — 2015. — Т. 51. — № 4. — С. 41–57.
22. Дружинин В. С., Начапкин Н. И., Осипов В. Ю. Выделение и картирование глубинных разломов по сейсмическим данным и их проявление в геофизических полях // Известия Уральского государственного горного университета. — 2018. — № 3(51). — С. 47–53. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-47-53.
23. Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Архейско-палеопротерозойская история метаморфизма пород Уральского сегмента земной коры // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Серия: Геология докембрия. — 2015. — № 7. — С. 3–18. DOI: 10.17076/geo163.
24. Тевелев А. В., Тевелев А. В., Федорчук В. А., Хотылев А. О., Кошелева И. А. Тараташский индентор и его роль в строении Урала // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2017. — № 1. — С. 3–12.

25. Закис А. С. Технично-экономическое обоснование временных разведочных кондиций для подсчета запасов железных руд проявления Куватал Северо-Тараташского участка в Челябинской области (подземная отработка): отчет о НИР. — Челябинск: ОАО ММК, 2017. — Рег. № 75-16-645.

26. Астраханцев Ю. Г., Баженова Е. А., Белоглазова Н. А., Вдовин А. Г., Глухих И. И., Иванченко В. С., Хачай О. А. Комплексные геофизические исследования массивов горных пород в естественном залегании. — Екатеринбург: УрО РАН, 2018. — 105 с.

27. Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А., Троянов А. К. Патент РФ № 2658592 С1, 21.06.2018. Устройство для исследования в скважинах динамического состояния горных пород. 2018. Бюл. № 18.

28. Сапунов В. А., Нархов Е. Д., Денисов А. Ю., Савельев Д. В., Муравьев Л. А. Современные оверхаузеровские магнитометры POS — надежный источник данных для геологической интерпретации / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2019. — С. 327 — 332.

29. Антипин А. Н., Хацкевич Б. Д. Результаты радиометрических методов исследования на Северо-Тараташском участке / XIX Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов. — Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2018. — С. 4 — 6.

30. Белоглазова Н. А., Баженова Е. А., Вдовин А. Г. Геодинамическая обстановка Северо-Тараташского участка по геофизическим исследованиям скважин // Уральский геофизический вестник. — 2017. — № 1(29). — С. 60 — 65.

31. Вдовин А. Г. Электромагнитное излучение как индикатор массивного магнетитового оруденения // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей: Сборник научных материалов. — Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2015. — С. 393 — 396. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Lomov M. A., Konstantinov A. V., Tereshkin A. A. Promising methods of assessment and control of the geomechanical state of rock massifs. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 4(23), pp. 83 — 90. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.083.

2. Vostretsov A. G., Krivetskiy A. V., Bizyaev A. A., Yakovitskaya G. E. Characteristics of electromagnetic radiation of rocks during their destruction in laboratory experiments. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*. 2013, no. 2(21), pp. 46 — 54. [In Russ].

3. Bizyaev A. A., Savchenko A. V., Tsupov M. N., Smirnyagin I. I., Smirnov M. N. Studies of electromagnetic radiation signals accompanying the destruction of rocks. *Sovremennye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern trends and innovations in science and production: Materials of the IX International Scientific and Practical Conference], Mezhdurechensk, KuzGTU, 2020, pp. 1051 — 1056. [In Russ].

4. Kul'kov D. S., Imashev S. A. Analysis of acoustic emission signals in geomaterial samples under uniaxial compression conditions. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2019, no. 2 — 1(50), pp. 274 — 280. [In Russ].

5. Kong Biao, Wang Enyuan, Li Zenghua Regularity and coupling correlation between acoustic emission and electromagnetic radiation during rock heating process. *Geomechanics and Engineering*. 2018, vol. 15, no. 5, pp. 1125 — 1133. DOI: 10.12989/gae.2018.15.5.1125.

6. Bogomolov L. M. On the mechanism of electromagnetic influence on the kinetics of microcracks and electrostimulated variations of acoustic emission of rock samples. *Physical Meso-mechanics*. 2010, vol. 13, no. 3, pp. 39 — 56. [In Russ].

7. Kulakov G. I., Yakovitskaya G. E., Sharapova M. D., Shchelkanova V. I. Prediction of crack formation in deformable structural materials and rocks by their electromagnetic emission. *Interexpo GEO-Siberia*. 2016, vol. 2, no. 3, pp. 163 — 168. [In Russ].

8. Zhong-Hui Li, Quan Lou, En-Yuan Wang, Shuai-Jie Liu, Yue Niu Study on acoustic-electric-heat effect of coal and rock failure processes under uniaxial compression. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 71 – 80. DOI: 10.1088/1742-2140/aa8437.
9. Xiaofei Liu, Enyuan Wang Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018, vol. 15, no. 3, pp. 909 – 920. DOI: 10.1088/1742-2140/aaa3ce.
10. Shuman V. N. Nonlinear dynamics of the geo-environment: transients and critical phenomena. *Geophysical Journal*. 2014, vol. 36, no. 6, pp. 129 – 142. [In Russ].
11. Zhang Q., Wang E., Feng X., Yue N., Ali M., Lin S., Wang H. Rockburst risk analysis during high-hard roof breaking in deep mines. *Natural Resources Research*. 2020, vol. 29, no. 17, pp. 4085 – 4101. DOI: 10.1007/s11053-020-09664-w.
12. Rasskazov I. Yu. Geoacoustic precursors of mountain impacts. *Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, no. 3/4(8/9), pp. 121 – 143. [In Russ].
13. Rasskazov I. Yu., Migunov D. S., Anikin P. A., Gladys' A. V., Tereshkin A. A., Zhel'nin D. O. Geoacoustic portable device of a new generation for assessing the impact hazard of a rock mass. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no. 3, pp. 169 – 179. [In Russ].
14. Potapov P. V., Shvedikova I. N. On the issue of studying the geomechanical state of rocks and the activity of electromagnetic radiation in the fields of the Yuzhnaya and Chernihiv mines by geophysical methods. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti*. 2011, no. 1, pp. 48 – 52. [In Russ].
15. Vdovin A. G., Beloglazova N. A. Geophysical studies of dynamic stability of rock massifs during quarry development. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*. 2020, no. 1(39), pp. 4 – 11. [In Russ]. DOI: 10.25698/UGV.2020.1.1.04.
16. Uvarov V. N., Malkin E. I., Sannikov D. V. Electromagnetic manifestation of geoacoustic emission of the lithosphere. *Bulletin of the Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center (KRASEC). Physical and Mathematical Sciences*. 2016, no. 1(12), pp. 55 – 65. [In Russ]. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-12-1-55-65.
17. Bokov V. N., Vorob'ev V. N. Variability of geoacoustic emission and changes in atmospheric circulation. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2013, no. 32, pp. 43 – 54. [In Russ].
18. Hamimi Z., Hagag W., Osman R., El-Bialy M., Abu El-Nadr I., Ei Sayed Fadel M. The active Kalabsha Fault Zone in Southern Egypt: detecting faulting activity using field-structural data and EMR-technique, and implications for seismic hazard assessment. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018, vol. 11, no. 15, pp. 421. DOI: 10.1007/s12517-018-3774-1.
19. Troyanov A. K., D'yakonov B. P., Martyshko P. S., Astrakhantsev Yu. G., Nachapkin N. I., Gavrilov V. A., Beloglazova N. A. Seismoacoustic emission and electromagnetic radiation of fractured rocks in wells. *Doklady Akademii nauk*. 2011, vol. 436, no. 1, pp. 118 – 120. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1028334X11010119.
20. Belyakov A. S., Didenkulov I. N., ZHigalin A. D., Lavrov V. S., Malekhanov A. I., Nikolaev A. V. Seismoacoustic monitoring in the Vorotilovskaya deep well: methodology and results. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017, no. 3, pp. 5 – 12. [In Russ].
21. Gavrilov V. A., Poltavtseva E. V., Deshcherevskiy A. V., Buss Yu. V., Morozova Yu. V. Monitoring of the state of the geoenvironment based on synchronous geo-acoustic and electromagnetic borehole measurements: the use of natural electro-magnetic radiation. *Seysmicheskoe priboye*. 2015, vol. 51, no. 4, pp. 41 – 57. [In Russ].
22. Druzhinin V. S., Nachapkin N. I., Osipov V. Yu. Identification and mapping of deep faults based on seismic data and their manifestation in geophysical fields. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2018, no. 3(51), pp. 47 – 53. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-3-47-53.
23. Pystin A. M., Pystina Yu. I. Archean-Paleoproterozoic history of metamorphism of rocks of the Ural segment of the Earth's crust. *Transactions of the Karelian Research Centre of the*

Russian Academy of Sciences. Precambrian Geology. 2015, no. 7, pp. 3–18. [In Russ]. DOI: 10.17076/geo163.

24. Tevelev A. V., Tevelev A. V., Fedorchuk V. A., Khotylev A. O., Kosheleva I. A. Taratash indenter and its role in the structure of the Urals. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2017, no. 1, pp. 3–12. [In Russ].

25. Zakis A. S. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vremennykh razvedochnykh konditsiy dlya podscheta zapasov zheleznykh rud proyavleniya Kuvatal Severo-Taratashskogo uchastka v Cpelyabinskoy oblasti (podzemnaya otrabotka): otchet o NIR* [Feasibility study of temporary exploration conditions for the calculation of iron ore reserves in the Kuvatal of the Severo-Taratashsky site in the Chelyabinsk region (underground mining). Research report], Chelyabinsk, OAO MMK, 2017. [In Russ].

26. Astrakhansev Yu. G., Bazhenova E. A., Beloglazova N. A., Vdovin A. G., Glukhikh I. I., Ivanchenko V. S., Khachay O. A. *Kompleksnyye geofizicheskie issledovaniya massivov gornykh porod v estestvennom zaleganii* [Complex geophysical studies of rock massifs in natural occurrence], Ekaterinburg, UrO RAN, 2018. 105 p.

27. Astrakhansev Yu. G., Beloglazova N. A., Troyanov A. K. *Patent RU 2658592 C1*, 21.06.2018. [In Russ].

28. Sapunov V. A., Narkhov E. D., Denisov A. Yu., Savel'ev D. V., Murav'ev L. A. Modern overhauser POS magnetometers are a reliable data source for geological interpretation. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i elektricheskikh poley: Sbornik nauchnykh trudov* [Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields, Collection of scientific materials], Perm, GI UrO RAN, 2019, pp. 327–332. [In Russ].

29. Antipin A. N., Khatskevich B. D. Results of radiometric research methods at the North Tatar site. *XIX Ural'skaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike: Sbornik nauchnykh materialov* [XIX Ural Youth Scientific School of Geophysics, Collection of scientific materials], Ekaterinburg, IGF UrO RAN, 2018, pp. 4–6.

30. Beloglazova N. A., Bazhenova E. A., Vdovin A. G. Geodynamic situation of the North-Taratash site for geophysical well surveys. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*. 2017, no. 1(29), pp. 60–65. [In Russ].

31. Vdovin A. G. Electromagnetic radiation as an indicator of massive magnetite mineralization. *Glubinnoe stroenie, geodinamika, teplovoe pole zemli, interpretatsiya geofizicheskikh poley: Sbornik nauchnykh materialov* [Deep structure, geodynamics, thermal field of the earth, interpretation of geophysical fields, Collection of scientific materials], Ekaterinburg, IGF UrO RAN, 2015, pp. 393–396. [In Russ].

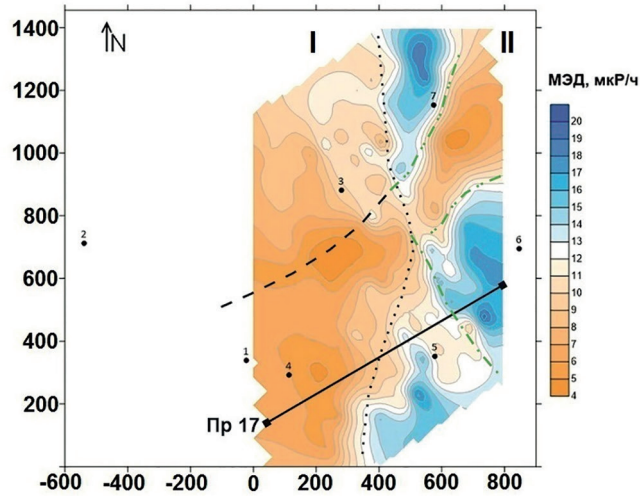
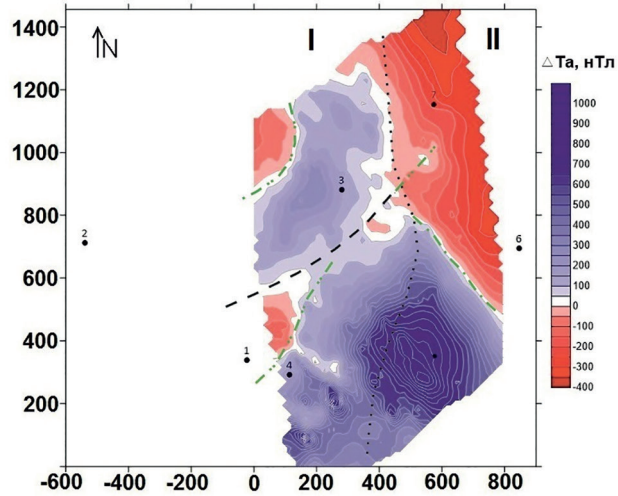
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Баженова Евгения Анатольевна — научный сотрудник,
Институт геофизики УрО РАН,
e-mail: bazenova_jena@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2068-7140.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

E.A. Bazhenova, Researcher, e-mail: bazenova_jena@mail.ru,
Institute of Geophysics of Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, Russia,
ORCID ID: 0000-0002-2068-7140.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 10.03.2022; принята к печати 10.04.2022.
Received by the editors 01.11.2021; received after the review 10.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.



Условные обозначения

- Линия надвига по геологическим данным
- - - - - Линия надвига по геофизическим данным
- - - - - Линия разлома по геологическим данным
- · - · - · Линия разлома по геофизическим данным
- — Линия профилей объемной активности радона (ОАР) и мощности экспозиционной дозы (МЭД)

I - Куватальская свита II - Зона зеленосланцевых диафортиров

Рис. 5. Карты аномального магнитного поля (ΔT_a) и мощности экспозиционной дозы (МЭД). Масштаб 1:10 000

Fig. 5. Maps of anomalous magnetic field (ΔT_a) and exposure dose rate (EDR). Scale 1:10 000