

УДК 550.312

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ПУСТОТ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД (НА ПРИМЕРЕ КРИВБАССА, УКРАИНА)

П.И. Пигулевский, В.К. Свистун, С.П. Пахомов, В.П. Лазебник, А.С. Кирилук

Рассмотрены возможности геоэлектрических методов при оценке процессов воронкообразования и поиске подземных пустот в массивах кристаллических пород на территории Криворожского железорудного бассейна.

Ключевые слова: геофизические методы, аудио-магнитотеллурическое зондирование, резонансно - акустическое профилирование, воронка, провал.

ВВЕДЕНИЕ

В течение двух столетий из недр Криворожского железорудного бассейна (Кривбасса) было «извлечено» около трех миллиардов тонн богатой руды и на порядок больше железистых кварцитов. Вследствие такой продолжительной промышленной деятельности регион получил ряд серьезных экологических проблем, связанных с существенным изменением геологического и гидрологического состояний окружающей среды. Причин множество: шахты, карьеры, отвалы и шламонакопители (см. рис. 1). Деятельность таких технических сооружений способствует активизации опасных приповерхностных геологических процессов. В центре г. Кривой Рог имеется не менее трех опасных участков на которых в любой момент времени могут произойти провалы. Наличие старых (заброшенных) шахтных выработок под городом могут провоцировать просадки земной поверхности (см. рис. 2) с непредсказуемыми последствиями. Сдвигения и деформации горных пород в массивах пород вызывают повреждения различных промышленных объектов, увеличение водо- и газопроницаемости пород над выработанным пространством, изменение гидрогеологического режима поверхностных и грунтовых вод, оползневые процессы и т.д.

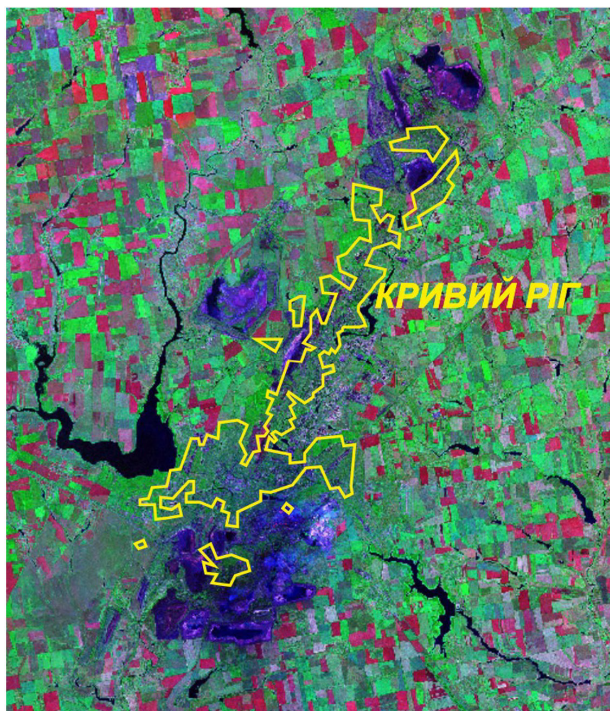


Рис. 1. Космический снимок Landsat 7 (ETM+) Криворожской агломерации М 1:500 000

Внезапное образование воронок и провалов (см. рис. 2), могут представлять опасность как для ведения горных работ в карьерах, так и для проживания населения одноименной агломерации. Провалы поверхности начинают происходить в течение 1-10 и более лет после выработки горного пространства. Поэтому для принятия разного рода мер безопасности необходимо определить (локализовать) места возможного развития воронок и условия их образования.



Рис. 2. Провал возле центрального рынка г. Кривого Рога

ОБРАЗОВАНИЕ ВОРОНОК

По условиям образования воронки делятся на первичные и вторичные [3].

Размеры зоны влияния подземных разработок, величина и характер деформаций, скорости роста деформаций, а также продолжительность процесса сдвижения горных пород и земной поверхности зависят от следующих основных факторов:

Первичные воронки (воронки обрушения) образуются при отработке слепых залежей или верхних горизонтов залежей, выходящих под наносы, при погашении потолочин и междукammerных целиков. На их образование влияют:

- физико-механические свойства покрывающей толщи горных пород (структура, крепость, коэффициент разрыхления);
- геологические условия залегания пород (наличие тектонических нарушений, даек, зон выветривания, трещиноватость);
- размеры и форма выработанного пространства;
- мощность отрабатываемых залежей, суммарная мощность сближенных параллельных залежей;
- глубина залегания рудного тела.

Вторичные воронки образуются в зоне трещин и террас. Согласно работы [3] образованию вторичных воронок способствуют:

- оставленные в выработанном пространстве рудные и безрудные целики, нарушающие нормальное (равномерное) развитие процесса сдвижения пород подработанной толщи;
- разработка комплекса залежей сложного строения;
- обрушение междупластья при разработке сближенных залежей;
- неравномерный по площади выпуск руды из обрушенных блоков.

Процесс обрушения в массиве развивается послойно в течение многих лет, что причиняет значительный ущерб развитию территории городской агломерации.

Для оценки возможности выявления пустот и оценки процессов воронкообразования в массиве горных пород [4] в пределах территории Кривбасса были выполнены геофизические исследования [2]

под полигоном складирования отходов строительных материалов (см. рис. 3) комплексом геофизических методов, который включал аудио-магнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) и резонансно-акустическое профилирование (РАП).

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работы АМТЗ (см. рис. 3) выполнялись в частотном диапазоне от 10000Гц до 1Гц станцией MTU-5A канадской фирмы «Феникс» по семи профилям, которые проходили над предполагаемыми пустотами и ослабленными интервалами (пустотами и трещиноватыми зонами). Положения профилей определялись с учётом поверхностных условий участка работ и возможностей обеспечения «нормальных» заземлений электродов. Всего было отработано 60 физических точек, из них 56 координатные точки и 4 контрольных точки для оценки качества работ. По данным контрольных измерений погрешность определения импеданса составила 4,1%. Шаг наблюдения составил 10м. Регистрировались пять компонент электромагнитного поля (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z). Датчиками электрического поля служили линии MN длиной 10м, заземленные латунными электродами; датчиками магнитного поля – магнитные датчики МТС-30. Длительность одной записи составляла 15 минут. Азимуты датчиков поля были равными $x = 0^\circ$ и $y = 90^\circ$. Плановое и высотное положение точек АМТЗ определялось встроенным в измеритель MTU-5A GPS.

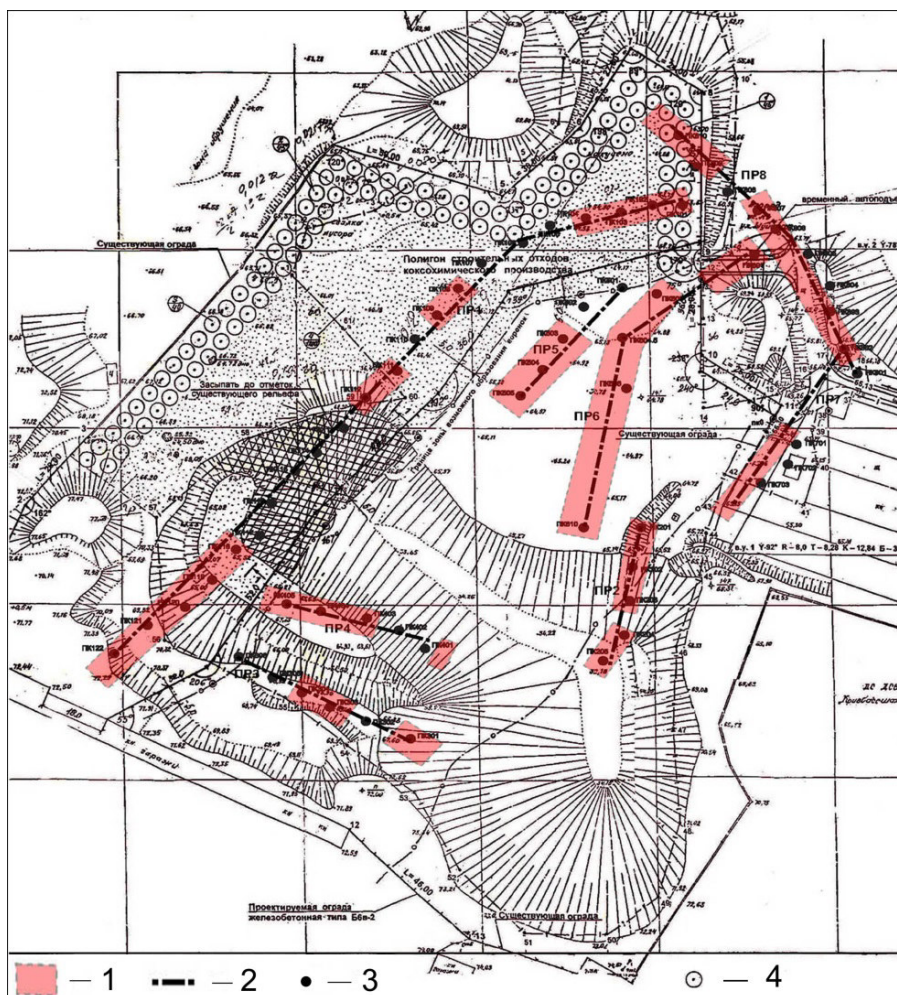


Рис. 3. План полигона строительных отходов:

- 1 – зоны возможного воронкообразования; 2 – профили геофизических исследований;
3 – точки наблюдения АМТЗ; 4 – границы зоны обрушения.

Измерения методом РАП (рис. 3) проведены по 8 профилям с шагом измерений 5 метров. Регистрация сигнала осуществлялась аппаратным (измерительным) комплексом РАП-2008, разработанным в процессе совершенствования первых модификаций аппаратуры и внедрённым в производство компанией ИнтерГеоРАП (с 2008 г. GEOEXPLORE) в 2009 году.

Измерения были проведены на частоте дискретизации сигнала 2000 герц, длина записываемого сигнала составляла 8192 отсчёта.

Общее количество полевых измерений на объекте составило 158 точек. Для оценки качества работ на 10 пунктах были выполнены повторные (контрольные) измерения. По данным контрольных измерений погрешность определения глубин не превысила 2,5%.

ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам качественной обработки была выполнена геологическая стратификация среды и построена ее модель, которая позволила получить дополнительную информацию о приповерхностных и глубинных структурах. Этот этап обработки носит чисто профессиональный характер, поэтому в данной публикации не приводится.

В дальнейшем проводилась полуколичественная обработка, которая заключалась в построении модели первого приближения с использованием результатов качественной обработки, а также был проведен вейвлет-анализ электромагнитных параметров (импеданса, фазы и сопротивления). После этих процедур проводились одномерная и двухмерная инверсии (программы: msu_mt1d, MTS_Prof inv, MT-2Dtools).

В результате проведения перечисленных этапов были получены вертикальные разрезы изменения электромагнитного поля с глубиной.

Обработка метода РАП осуществлена по двум алгоритмам анализа первичной информации – до глубин 50 и 300 метров. В первом случае (глубинность 50 метров) применялся алгоритм, ориентированный на выделение «градиентных» зон спектральных амплитуд. При использовании этого алгоритма границы блоков с различными физико-механическими свойствами в верхней части разреза проявляются наиболее контрастно.

Во втором случае было обращено внимание на визуализацию амплитуд частотного спектра – при таком подходе появляется возможность визуализации параметров разреза в более глубинном диапазоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделение в массиве ослабленных неоднородностей производилось по результатам совместного анализа всех вариантов обработки РАП и результатов АМТЗ. При анализе полученных материалов решались две задачи:

- первая, изучение верхней части разреза для выделения участков воронкообразования;
- вторая, изучение более глубинной части разреза (до 300 метров) с целью выяснения влияния отработанных горных выработок на процессы их куполения и образования разуплотненных зон.

Выделение предполагаемых участков воронкообразования проводилось по пониженным сопротивлениям (1-10 Ом·м) метода АМТЗ и по результатам морфоструктурного анализа РАП-разрезов – морфологии зон повышенных градиентов частотных спектров.

Выявление предполагаемых участков отработанного пространства и вызванных им участков разуплотненных зон, проводилось по высоким значениям сопротивления от 200 до 1000 Ом·м по методу АМТЗ и как структурных особенностей частотного спектра и его амплитуд по методу РАП.

На профиле 1 по методу АМТЗ (рис.4) в интервалах пикетов 101-110, 112 -113, 120 - 122 выделяются 3 зоны, по методу РАП (рис.5) в интервалах пикетов 101-104, 107-109, 111-113 и 18-122 выделены 4 зоны. В контурах этих зон предполагается развитие процессов воронкообразования. Учитывая, что шаг наблюдений в методе РАП более детальный, чем в методе АМТЗ и дифференциация верхней части разреза намного выше, авторы приходят к мнению о существовании четырех зон в интервалах глубин от 2,5 до 35 метров.

В интервалах глубин 70-120 метров прогнозируется два участка отработанного пространства – северный и южный. Участки отличаются по высоким значениям сопротивления (300-500 Ом·м) и изменяющейся амплитудой частотного спектра, а также морфологическими характеристиками спектрального «края» в цвето-теневом представлении нами они интерпретируются как «участки с повышенной пористостью».

На северном участке проецируются первые из трёх предполагаемых зон воронкообразования, на южном – четвёртая из них.

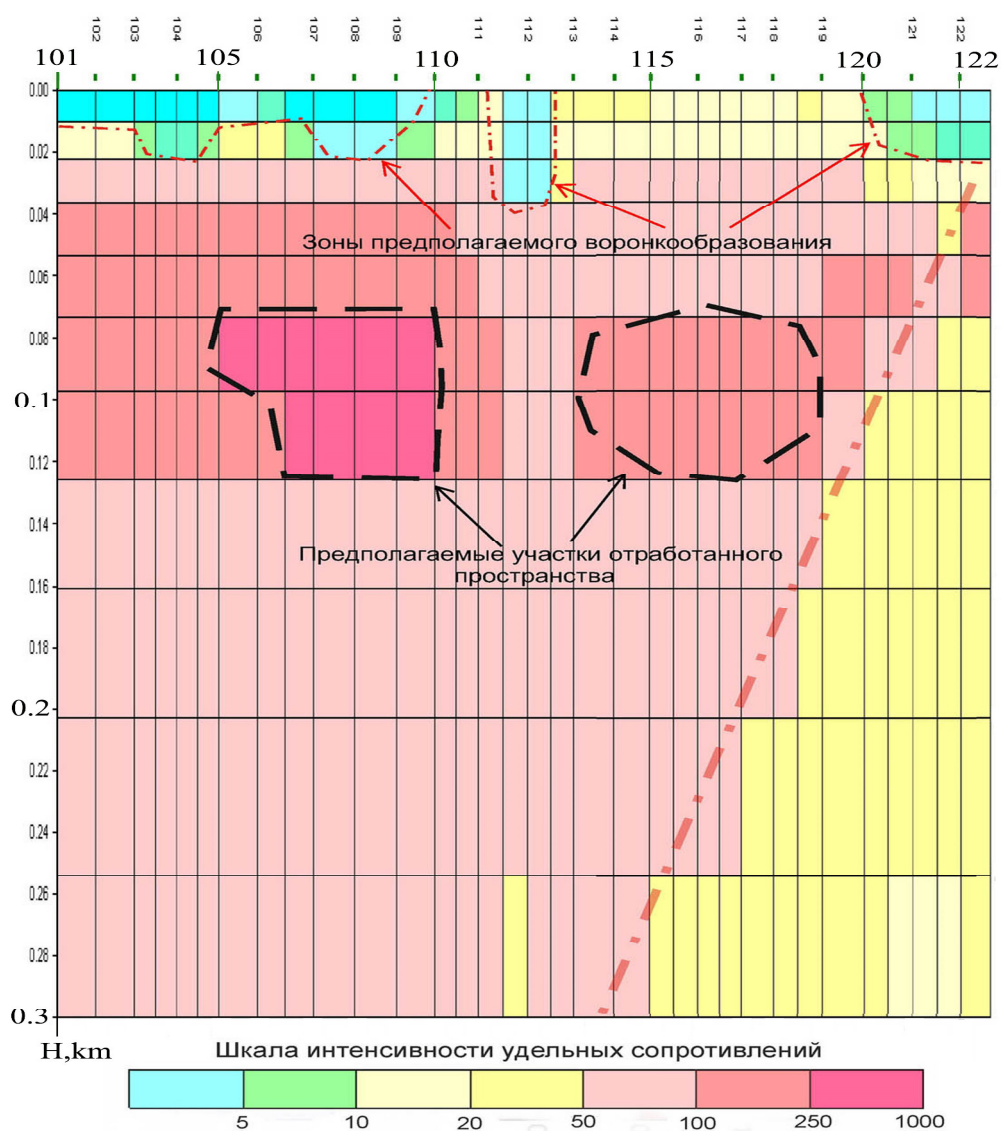


Рис. 4. Геоэлектрическая модель разреза по АМТЗ-данным по профилю 1.

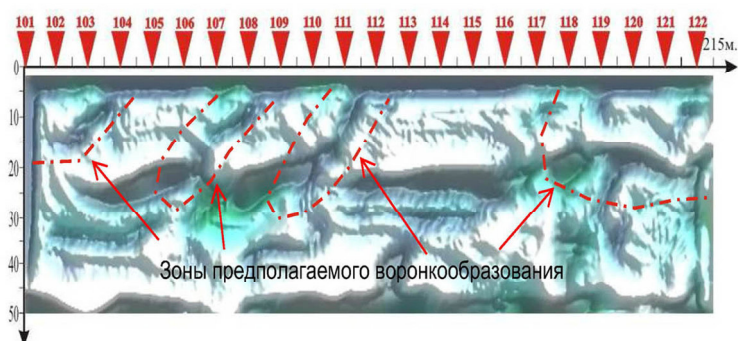


Рис. 5. Частотнo-спектральный РАП-разрез по профилю 1 (до 50 м).

В южной части профиля достаточно отчётливо фиксируется линейная крутопадающая на север структура (рис. 7). По нашим предположениям эта структура может соответствовать разлому, разделяющему «лежачий» и «висячий» блоки рудного тела.

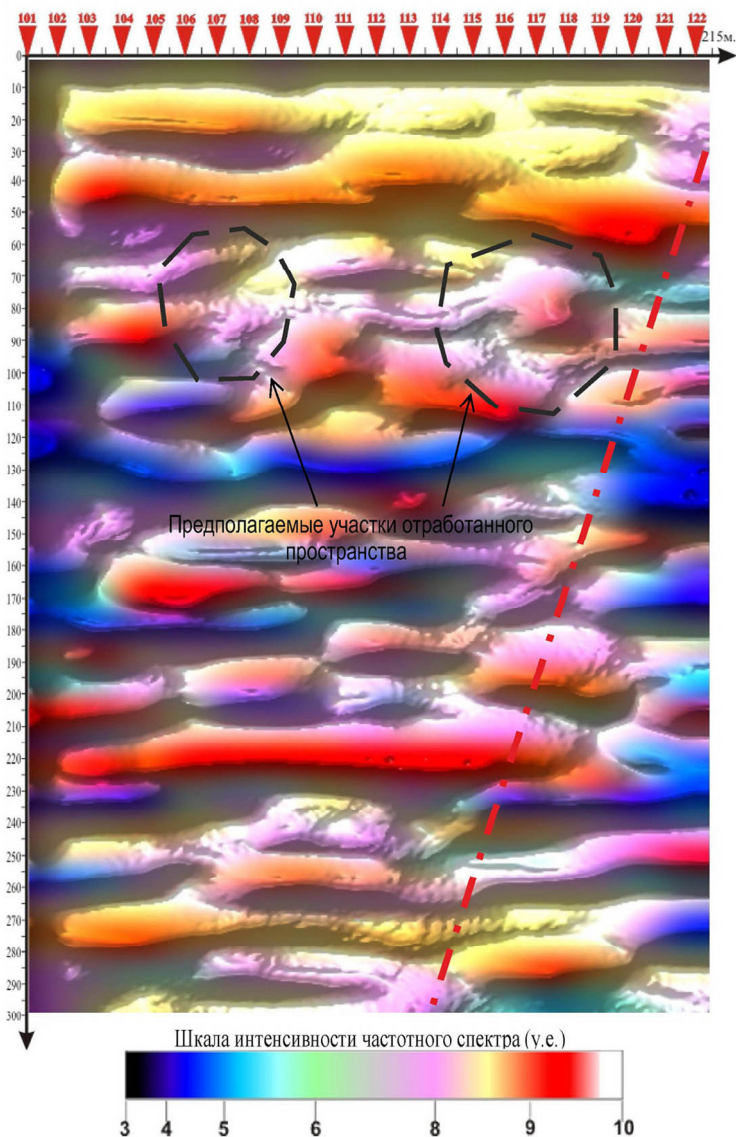


Рис. 6. Частотноспектральный РАП-разрез по профилю 1 (до 300 м).

На профиле 2 (рис. 7, 8) предполагаются две зоны воронкообразования и один участок отработанного пространства. Первая (северная) из зон воронкообразования прогнозируется в интервале пикетов 201-203, северная часть второй зоны весьма отчётливо проявляется южнее пикета 204.

В интервалах глубин 140-190 метров между пикетами 202-203 выделяется аномалия до 250 Ом·м, интерпретируемая как участок отработанного пространства. Судя по его проявленности на РАП-разрезах, профилем пересечено его краевую часть.

На участке профиля между пикетами 203-204 отчётливо фиксируется вертикальная структура, представленная сопротивлением от 40 до 80 Ом·м и изображенная на РАП-разрезе серией локальных аномалий в интервале глубин от 20 до 150 метров. Она прерывается на участке отработанного пространства. Можно предположить, что эта структура образовалась за счет инфильтрационных и суффозионных процессов. Локальные аномалии амплитуд частотного спектра в этом случае можно рассматривать как «промежуточные камеры», в которых происходит временное накопление тонкозернистого материала, транспортируемого в процессе суффозии из верхних горизонтов разреза.

При «разгрузке» этих промежуточных камер в результате перемещения материала на более глубокие горизонты могут «запуститься» процессы воронкообразования. Завершение вышеописанного многоступенчатого (циклического) процесса вероятно только в случае полного заполнения высокопористым материалом отработанных горных выработок и перехода среды в равновесное состояние.

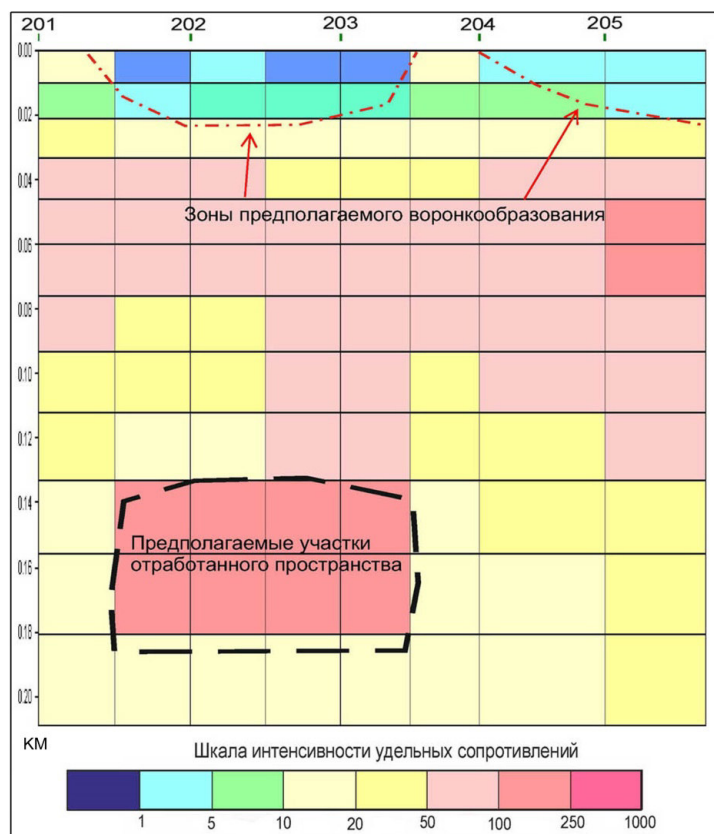


Рис. 7. Геоэлектрическая модель разреза по АМТЗ-данным по профилю 2.

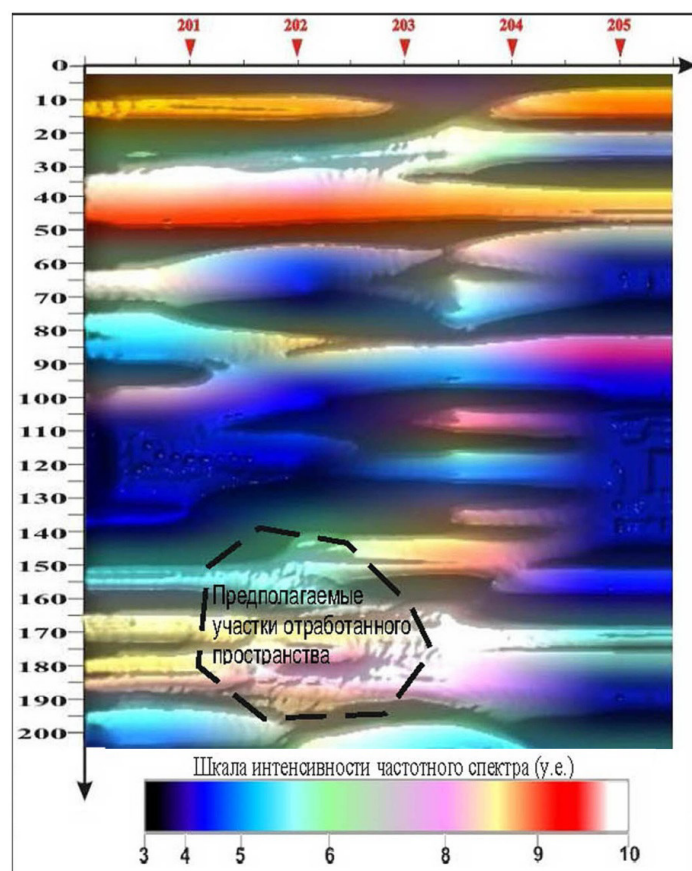


Рис. 8. Частотноспектральный РАП-разрез по профилю 2.

Что касается остальных профилей, которые не приведены на рисунках, то на третьем профиле предполагаются три зоны воронкообразования и один участок предположительно отработанного пространства.

Предполагаемая область участков отработанного пространства прослеживается по всему профилю в интервале глубин от 175 до 245 метров.

В центральной части профиля (между пикетами 301 и 304) на глубинах от 40 до 110 метров отчетливо обнаруживается аномалия до 500 Ом·м, аналогичная ранее описанной по профилю 2. По сравнению с ней, пространственные размеры локальных аномалий в РАП-разрезе по профилю 3 в два раза превышают размеры аналогичных аномалий, выделенных на профиле 2. Природа этих аномалий может быть обусловлена как влиянием участков отработанного пространства, так и инфильтрационно-суффозионными процессами. Масштаб проведенных исследований не позволяет произвести их однозначное истолкование.

На профиле 4 интерпретируются две зоны воронкообразования (по данным АМТЗ только одна, в пределах 404 и 405 пикетов). В пределах всего профиля в интервале глубин 220-255м прогнозируется краевая (западная) часть отработанного пространства. Морфологические и амплитудные характеристики аномалии позволяют предположить, что в значительной мере отработанное пространство заполнено.

Выделяемая область участков отработанного пространства на профиле 5 прослеживается практически по всему профилю в интервале глубин от 180 до 265 метров. «Раздув» этой области четко проявляется в интервале пикетов 501-503. Мощность зоны резко уменьшается в южном направлении.

Субвертикальная серия локальных РАП-аномалий в интервале глубин от 25 до 170 метров трактуется нами как следствие активного проявления инфильтрационно-суффозионных процессов.

На профиле 6 область отработанного пространства предполагается на участке от пикета 601 до пикета 610 в интервале глубин от 130 до 230 метров. Эпицентр зоны находится в центральной части профиля между пикетами 604 и 607.

На профилях 7 и 8 в интервалах, обусловленных отработанным пространством, аномалий не выявлено. Локальные аномалии, зафиксированные в центральной части профиля предположительно обусловлены неоднородностями физикомеханических свойств разреза, сформировавшихся в процессе перемещения материала при «заполнении» отработанного пространства (горных выработок, расположенных к юговостоку от профиля 7).

ВЫВОДЫ

В результате почти двухсотлетнего извлечения из недр Криворожского железорудного бассейна железистых кварцитов сформировались многочисленные горные выработки, которые оказывают активное воздействие на состояние геологической среды. Они провоцируют развитие техногенно-зависимых «неотектонических» процессов и приводят к изменению гидродинамического режима как подземных, так и грунтовых вод.

По результатам выполненных опытных полевых геофизических исследований такие техногенные разуплотненные образования удалось локализовать. Их выделение проводилось на основе совместного анализа всех вариантов обработки РАП и АМТЗ в процессе изучения верхней части разреза с целью выделения участков предполагаемого воронкообразования, а также для исследования более глубокой части разреза (до 300 метров) с определением влияния отработанных горных выработок на процессы, способствующие развитию ослабленных зон. Локализация предполагаемых участков воронкообразования проводилось по пониженным сопротивлениям (1 – 10 Ом·м) в методе АМТЗ и по результатам морфоструктурного анализа РАП-разрезов – морфологии зон повышенных градиентов частотных спектров.

Выделение прогнозируемых участков отработанного пространства и появления ослабленных зон проводилось по высоким сопротивлениям от 200 до 1000 Ом·м по методу АМТЗ и как структурных особенностей частотного спектра, а также его амплитуд по методу РАП.

Таким образом, модель эволюции изучаемой среды в общем виде можно представить как развитие инфильтрационных и суффозионных процессов, ориентированных в направлении «техногенных пустот» с целью их нивелирования (заполнения). Это привело к интенсивной дифференциации физико-механических свойств среды и, как следствие, образованию множества ослабленных зон, над которыми при определенных геодинамических условиях могут спонтанно развиваться процессы обрушения их кровли на глубину до 1 – 5 метров.

По результатам выполненных геофизических исследований авторами дано заключение о нецелесообразности проведения строительных работ на этом участке.

THE USE OF GEOPHYSICAL METHODS IN THE DETECTION OF VOIDS IN THE ROCK MASS (FOR EXAMPLE, KRYVBAS, UKRAINE)

P. I. Pisulewski, V. K. Whistler, S. P. Pakhomov, V. P. Lazebnik, S. A. Kirilyuk

The possibilities of geoelectric methods in the evaluation of processes of formation of sinkholes and in searching underground cavities in massifs of crystalline rocks in the territory of Krivorozhsky of iron-ore basin were considered

Keywords: geophysical methods, audio-magnetotelluric sounding, resonant acoustic profiling, a sinkhole, a failure.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пигулевский П.И., Свистун В.К., Кирилюк А.С. О необходимости комплексных исследований геоэкологических проблем Криворожского железорудного бассейна Украины // Обеспечение безопасности в чрезвычайных ситуациях / Материалы IX Международной научно-практической конференции (г. Воронеж, 18 декабря 2013г.). Часть III. Воронеж, 2013. С.4-8.
2. Пигулевский П.И., Свистун В.К., Пахомов С.П., Каплуненко А.В., Кирилюк А.С. О возможностях геофизических методов при выявлении пустот в массивах горных пород (на примере Кривбасса) // Научное издание. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. Ч. II. С.118-122.
3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок в Криворожском железорудном бассейне. Изд. ВНИМИ, Л. 1975.- 67 с.
4. Геофизика в маркшейдерском деле. Сазонов В.А., Сосик Д.И. - М.: Недра, 1989. 120 с.