

УДК 550.837.2 : 622.831.6 (477.63)

Свистун В.К.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ПУСТОТ В ОДНОМ ИЗ ГОРНЫХ МАССИВОВ г. КРИВОГО РОГА

*Рассмотрены возможности комплексного использования геоэлектрических и резонансно-акустических методов для выявления процессов образования воронок над подземными пустотами в массивах горных пород. Показано, что использовавшиеся геофизические методы позволили спрогнозировать конкретные места образования вторичных воронок, оценить изученную территорию по степени опасности. Предложено применение расширенных мониторинговых геофизических исследований для составления в короткие сроки оптимальных вариантов решения экологических проблем, связанных с отработкой рудных залежей, обеспечения безопасности жителей города.*

**Введение.** Днепропетровской геофизической экспедицией «Днепрогеофизика» выполнялись геофизические изыскания с целью выявления пустот и прогноза образования воронок в массиве горных пород на площади 1,5 га по ул. Урицкого в г. Кривом Роге. Использовался комплекс геофизических методов [2, 3]: аудимагнитотеллурическое зондирование (АМТЗ), аудимагнитовариационное зондирование (АМВЗ) и резонансно-акустическое профилирование (РАП).

Изученный участок расположен на месте закрытых к настоящему времени карьера «Червоная Балка» и подземных горных выработок шахты им. ГПУ (рис. 1). Карьер был отработан на глубину 35 м и засыпан породами разного состава. Подземные выработки под карьером проходились до гипсометрического горизонта -197 м (180 м ниже поверхности кристаллических пород) и были прекращены в 1955 году. Подземная выемка руды производилась камерами с оставлением потолочин, междукамерных целиков и частичной закладкой выработанного пространства. Согласно

имеющимся материалам, под дном карьера был оставлен рудный целик вертикальной мощностью 10 м. Данных о заполнении выработанного подземного пространства не имеется. Под оставленными потолочинами возможно сохранение пустот.

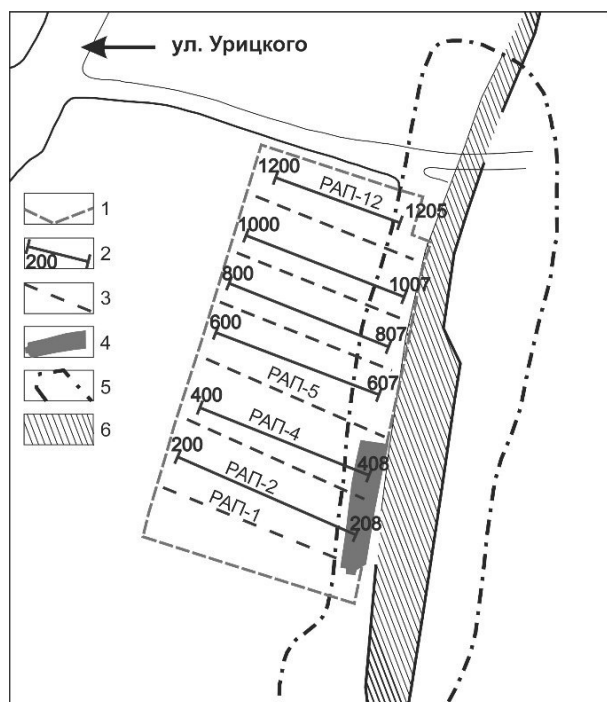
Предметом исследований было выявление в изученном горном массиве пустот, которые могут вызвать обрушение поверхности.

**Геологическая характеристика участка.** Геологический разрез участка слагают:

– толща осадочных пород кайнозойского чехла общей мощностью 15-20 м, залегающая практически горизонтально, сложенная су-глинками, песчано-глинистыми образованиями, плотными песчанистыми красно-бурыми глинами;

– расположенный под осадочным чехлом массив кристаллических пород раннего протерозоя, представленный графит-хлорит-кварцбиотитовыми, кварц-серицитовыми и близкого состава сланцами, выветренными (охристыми) их разновидностями, линзовидными телами бурого железняка, залежью богатых железных

руд Червоного пласта.



**Рис. 1.** Схема изученного участка.

1 – границы участка работ; 2 – профили АМТЗ и номера точек; 3 – профили РАП и их номера; 4 – аномальная зона; 5 – контур бывшего карьера; 6 – границы рудной залежи.

Мощность рудной залежи от 2 до 15 м. Руды гематитовые, слабо устойчивые, коэффициент крепости по шкале М.М.Протодяконова 2-3. Мощность пластов сланцев 17-25 м, коэффициент крепости 2-4. Бурые железняки более плотные и крепкие по сравнению с рудами, мощность их тел около 0,5 м. Падение пластов кристаллических пород и рудной залежи северо-западное под углом 60-65°.

В приповерхностной части, до глубины 45-60 м, породы интенсивно выветрены, дезинтегрированы, трещиноваты. Ниже глубины 70 м породы более устойчивые, прочные. Вблизи выработанного пространства горный массив разрушен на всю глубину разработки.

**Методика полевых работ.** Работы методом АМТЗ выполнялись с использованием станции MTU-5A канадской фирмы «Феникс» по сети 20×10 м. Учитывая, что около 70%

изученной площади покрыто бетонными плитами, для обработки было выбрано два профиля в модификации АМТЗ; остальные профили обрабатывались в модификации АМВЗ (рис. 1). Всего было обработано 60 физических точек, из них 56 координатных точек и 4 контрольных для оценки качества работ. По данным контрольных измерений погрешность определения импеданса составила 4,1%. Шаг наблюдений составил 10 м. Регистрировались пять компонент электромагнитного поля (Ех, Еу, Нх, Ну, Нг). Датчиками электрического поля служили линии MN длиной 10 м, заземленные латунными электродами; датчиками магнитного поля – магнитные датчики МТС-30. Длительность одной записи составляла 15 минут. Азимуты датчиков поля были равными  $\alpha = 0^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ . Магнитные датчики выставлялись по уровню и буссоли БГ-1, линии электрических датчиков выкладывались по буссоли БГ-1. Плановое и высотное положения точек АМТЗ определялись встроенным в измеритель MTU-5A приемником GPS.

Измерения методом РАП были проведены по 12 профилям с шагом измерений 2 м. Регистрация сигнала осуществлялась аппаратурным (измерительным) комплексом РАП-2008, разработанным в процессе совершенствования первых модификаций аппаратуры и внедренным в производство компанией ИнтерГеоРАП (с 2008 г. GEOEXPLORE) в 2009 году. Комплект аппаратуры РАП-2008 включает в себя:

- датчик (геофон) с широким частотным диапазоном (VPL-2008);
- электронный блок, разработанный на базе процессора компании AnalogueDevice и осуществляющий запись сигнала, зарегистрированного датчиком, его «сканирование», оцифровку и сохранение;
- компьютер «Notebook», используемый для управления параметрами регистрации сигнала в электронном блоке и записи зарегистрированной информации, передаваемой с электронного блока.

Датчик VPL-2008 размещался на заранее подготовленной площадке и для более надежного контакта прижимался к поверхности проведения измерений. Измерения были выполнены на частоте дискретизации сигнала 8000

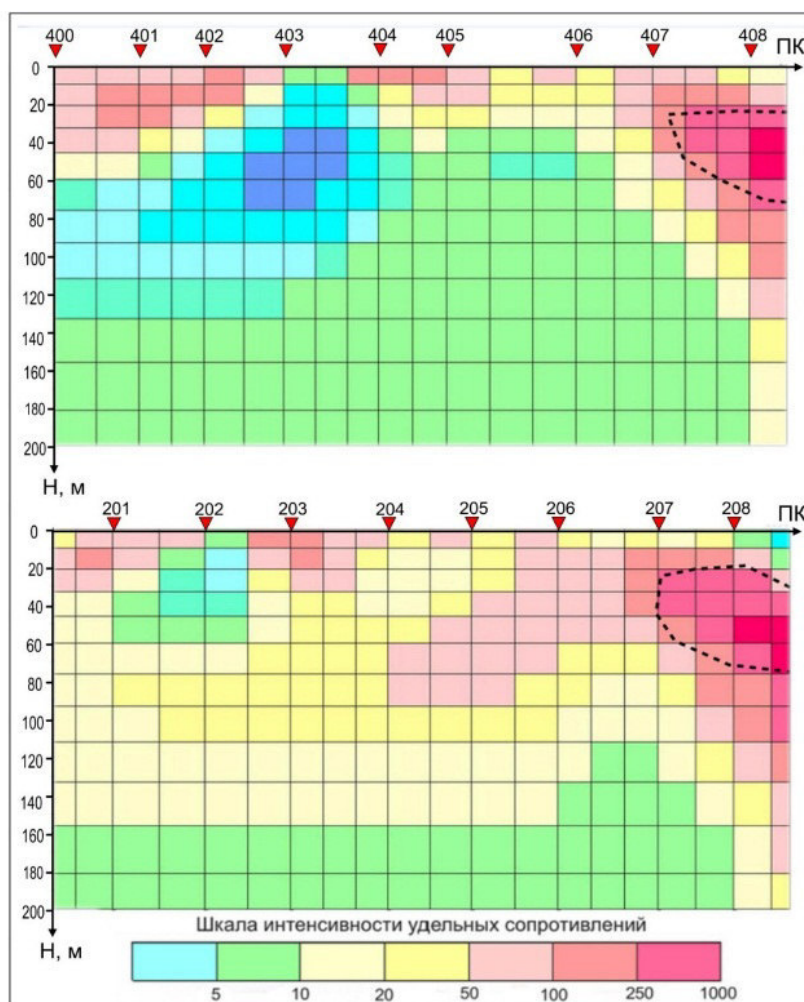
Гц, длина записываемого сигнала составляла 8192 отсчета.

Общее количество полевых измерений на объекте составило 450 точек. Для оценки качества работ на 15 пунктах были выполнены повторные (контрольные) измерения. По их результатам, погрешность определения глубин не превысила 2,5%.

**Обработка результатов полевых исследований.** По результатам качественной обработки полученных данных, была выполнена геологическая стратификация среды и построена ее модель, которая позволила получить дополнительную информацию о приповерхностных и глубинных структурах.

Затем была проведена полуколичественная

обработка данных. Она заключалась в проведении вейвлет-анализа, который является очень удобным для изучения нестационарных процессов и применяется для анализа сложной информации и ее отображения на масштабнo-временную плоскость. Благодаря этому появляется возможность обнаружить разные признаки сложного сигнала, которые не видны при обычном представлении в режиме реального времени. Данные вейвлет-анализа использовались для построения модели первого приближения с последующим проведением одномерной и двухмерной инверсии (программы: msu\_mt1d, MTS\_Prof inv, MT-2Dtools) (рис. 2) с применением симлет-ортогональных вейвлетов с компактным носителем.



*Рис. 2. Модели разрезов удельных сопротивлений по профилю 2 (вверху) и 4 (внизу).*

В результате были получены вертикальные разрезы поведения типперов (магнитных векторов) и электромагнитного поля с глубиной (рис. 2).

Типпер – комплексный магнитный вектор (переводит горизонтальные компоненты магнитного поля в вертикальные), который дает наглядное представление о горизонтальном градиенте электропроводности. Фаза типпера характеризует соотношения между фазой избыточных электрических токов, порождающих вертикальное магнитное поле, и фазой горизонтального магнитного поля. Если фаза отрицательная или близкая к нулю то преобладают синфазные (или противофазные) активные токи. В областях, где фаза положительна, преобладают реактивные токи. Эта информация используется при геоэлектрическом районировании и структурной классификации. В нашем случае было определено, что отрицательным значениям типперов соответствуют интервалы механически более ослабленных горных пород изученного разреза. Т.е. одним из основных преимуществ теории вейвлетов является то, что она позволяет выделить хорошо локализованные изменения в поведении электромагнитных сигналов, присущих изменению геологической среды.

**Обработка и интерпретация материалов РАП.** Метод РАП использует для получения информации собственно акустическое поле Земли, а именно – поле акустического резонанса, возникающего в толщах горных пород под действием разных внешних факторов. К ним относятся источники сейсмической активности земной коры, механические колебания, возникающие в результате напряжений в земной толще, движения планет и многое другое. Под влиянием внешних факторов в слоистой толще возникают поперечные упругие колебания.

Обработка первичных материалов РАП осуществлялась с использованием комплекса программ “РАП-СПЕКТР”, разработанного в компании GEOEXPLORE.

Программный комплекс “РАП-СПЕКТР” составлен с использованием специальных программ компаний “National Instruments” и

“Analog Devices”, специализирующихся на разработке и производстве аналого-цифровых процессоров и программного обеспечения с широким спектром охвата решаемых задач – от управления режимами их функционирования до обработки, фильтрации, визуализации и интерпретации результатов измерений исходного сигнала, записанных в цифровой форме. Таким образом, была реализована задача создания «гибкой» системы компьютерной обработки первичных материалов. Эта система легко «настраивается» под решение конкретных геологических задач путем компоновки в единое «тело» разных «программных модулей», которые «собираются» в соответствии с тем или иным из выбранных алгоритмов обработки.

С учетом полной идентичности всех оцифрованных сигналов – т.н. «исходной матрицы» – эта схема их (первичных сигналов) совместной обработки представляется наиболее корректной из всех других возможных вариантов.

Обработка исходных материалов РАП была проведена по нескольким алгоритмам. После сопоставления результатов обработки всех полевых данных по «отработанным» профилям был выбран оптимальный алгоритм, по которому и проводилась окончательная обработка, «визуализация» результатов и составление цветотеневых РАП-разрезов до глубины 200 метров (рис. 3).

**Результаты работы.** Целью анализа полученных материалов было выяснение влияния отработанных горных выработок на процессы, способствующие образованию ослабленных зон и появлению воронок.

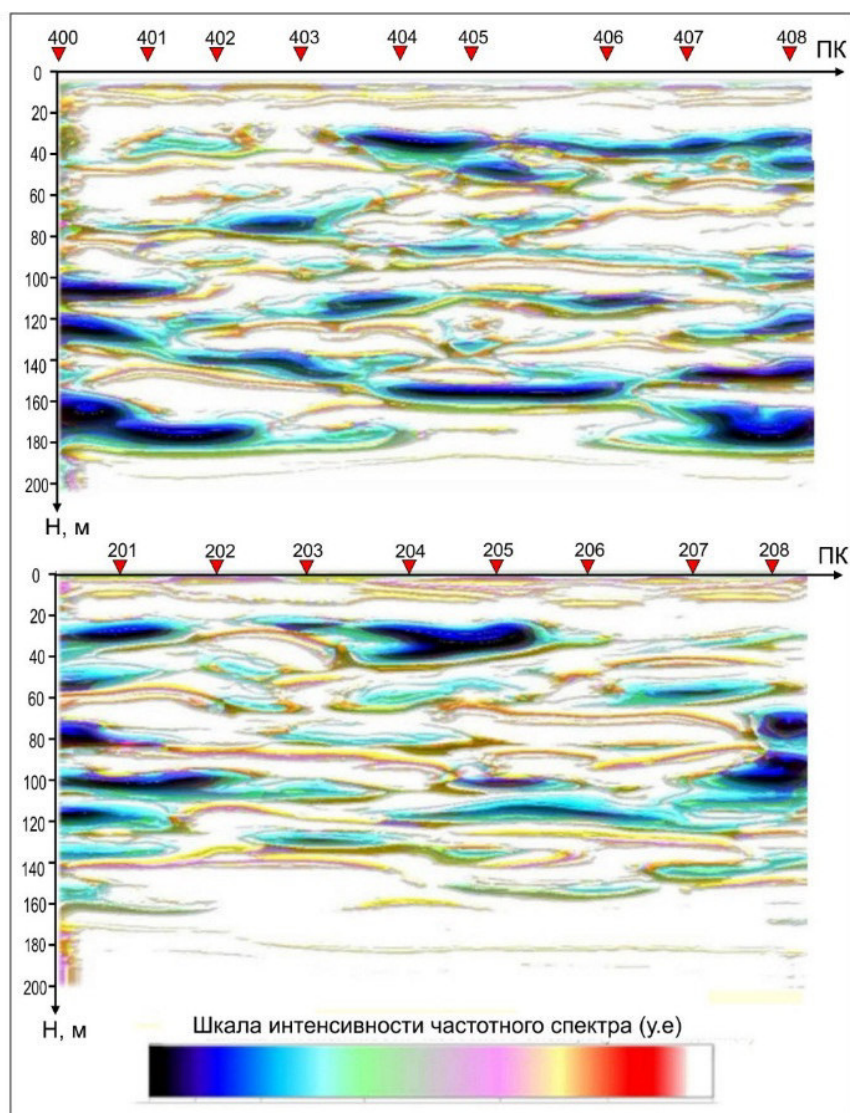
По результатам МТЗ, профили 2 и 4 (рис. 2) до глубины до 200 м характеризуются низкоомным разрезом, природу которого определяют тела графит-алюмосиликатных и кварцсерицитовых сланцев и остатки рудной залежи. В районе пикетов 208 и 408 на глубине 30-60 м выделены высокоомные аномалии, которые могут быть связаны с разуплотнением или пустотой.

По результатам МВЗ до глубины 200-250 м наблюдается дифференциация положительных

и отрицательных значений фазы типперов. Вероятно, отрицательные значения приурочены к ослабленным зонам разреза.

По акустическим (механическим) характе-

ристикам (РАП-разрезы) участок характеризуется крайне высокой степенью дифференцированности и обилием плотностных неоднородностей.



**Рис. 3.** Цветотеневые РАП-разрезы по профилю 2 (вверху) и 4 (внизу).

Наличие ослабленных зон объясняется проявлением инфильтрационных и суффозионных процессов. Локальные аномалии амплитуд частотного спектра в этом случае, предположительно, можно рассматривать как «промежуточные полости», в которых происходит временное (промежуточное) накопление тонкозернистого материала, транспорти-

руемого в процессе суффозии из верхних горизонтов разреза. «Разгрузка» этих промежуточных полостей в результате перемещения материала на более глубокие горизонты должна, в таком случае, приводить к «запуску» процессов сдвижения массива и оседанию земной поверхности. Завершение этого многоступенчатого (и циклического) процесса веро-

ятно только в случае полного заполнения высокопористым материалом отработанных горных выработках и перехода среды в равновесное состояние.

### Выводы

Горные выработки (карьер и шахта им. ГПУ) оказали интенсивное воздействие на состояние изученного геологического массива. Это обусловило развитие «неотектонических» процессов и изменило гидродинамический режим как подземных, так и грунтовых вод. Главная направленность этих процессов – заполнение выработанного пространства. Таким образом, модель эволюции изученной среды можно (утрировано) определить как развитие инфильтрационных и суффозионных процессов, ориентированных в направлении «техногенного карста» с целью заполнения «пустот» – в нашем случае, горных выработок.

Эти процессы привели к интенсивной дифференциации физических свойств среды и, как следствие, образованию ослабленных зон. В границах этих участков может произойти просадка поверхности.

В соответствии с п. 2.7. действующих «Правил охраны...» [4], вторичные воронки образуются при кратности подработки  $H_b/m_b \leq 15$ , где  $H_b$  – вертикальная мощность налегающих пород (М),  $m_b$  – вертикальная мощность рудного тела (М). Т.е. в границах изученного участка в районе пикетов 208, 408 «неотектонические» процессы привели к интенсивной дифференциации среды по физическим свойствам и именно здесь может произойти просадка поверхности.

На основании изложенного можно считать, что изученный участок земной поверхности опасен на предмет воронкообразования, и в его пределы следует ограничить доступ людей, установку технических средств и коммуникаций.

Для получения более достоверной информации о развитии провально-просадочных явлений необходимо получить сведения о плотностных свойствах геологической среды, для чего целесообразно расширить предлагаемый комплекс АМТЗ и РАП высокоточной gravi-

разведкой или же для выяснения природы аномалий в районе пикетов 208, 408 провести заверочное бурение на глубину до 50-60 м.

Использовавшийся комплекс геофизических методов позволяет прогнозировать конкретные места образования вторичных воронок, оценивать изучаемую территорию по опасности, давать заключения в соответствии с действующими нормативными документами [1, 4] о возможных ограничениях деятельности человека в пределах зон образования воронок.

Системное проведение расширенных мониторинговых геофизических исследований обеспечивает разработку в короткие сроки оптимальных вариантов решения ряда экологических проблем, гарантирует безопасность жителям города от провально-просадочных явлений в зонах отработки рудных залежей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и рассыпных месторождений подземным способом* // Москва: Недра, 1977. 233 с.
2. **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. Воронеж, 18 декабря 2013 г. // Воронеж, 2013.– Часть III.– С. 4-8.
3. **Пигулевский П.И., Свистун В.К., Пахомов С.П. и др.** О возможностях геофизических методов при выявлении пустот в массивах горных пород (на примере Кривбасса) // Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2014.– Ч. II.– С.118-122.
4. *Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне* // Ленинград: Недра, 1975.– 68 с.

**СВИСТУН В.К. Результати геофізичних вишукувань по виявленню порожнин в одному з гірських масивів м. Кривого Рогу.**

*Резюме.* Дніпропетровська геофізична експедиція «Дніпрогеофізика» провела вивчення можливостей геоелектричних методів при картуванні масивів гірських порід, які зазнають утворення порожнин та формування провальних лійок. Роботи проводились у м. Кривому Розі поблизу Центрального ринку по вул. Урицького, площа вивченої ділянки складала 1,5 га. Використовувався комплекс геофізичних методів, який включав аудіомагнітотелуричне зондування (АМТЗ), аудіомагнітоваріаційне зондування (АМВЗ) і резонансно-акустичне профілювання (РАП). При обробці електромагнітних сигналів використовувались вейвлет-перетворення, що дозволило виділити добре локалізовані зміни в геологічному середовищі та дати гірничо-геологічну інтерпретацію результатів геофізичних вимірювань. У відповідності з отриманими даними, гірські виробки значно вплинули на стан дослідженого геологічного простору, стали причиною розвитку «неотектонічних» процесів, зміни гідродинамічного режиму як підземних, так і ґрунтових вод. Ці зміни викликали інтенсивну диференціацію геологічного середовища за фізичними характеристиками, утворення ослаблених зон, у межах яких може відбуватись просідання поверхні. Використаний комплекс геофізичних методів дозволяє прогнозувати конкретні місця утворення вторинних лійок, оцінювати досліджувану територію за ступенем небезпеки, за можливими обмеженнями діяльності людини в зонах утворення лійок. На конкретному прикладі виконаних вимірювань показано, що системне вивчення території міста геофізичними методами АМТЗ, РАП і високоточної гравірознавді може забезпечити оптимальне вирішення проблем, пов'язаних з наслідками відпрацювання рудних покладів, проявами провальних-просадкових процесів.

**Ключові слова:** Криворізький басейн, порожнини, провальні лійки, прикладна геофізика, аудіомагнітотелуричне зондування (АМТЗ), аудіомагнітоваріаційне зондування (АМВЗ), резонансно-акустичне профілювання (РАП), гравірознавді, вейвлет-перетворення.

**СВИСТУН В.К. Результаты геофизических изысканий по выявлению пустот в одном из горных массивов г. Кривого Рога.**

*Резюме.* Днепропетровская геофизическая экспедиция «Днепрогеофизика» провела изучение возможностей геоэлектрических методов при картировании массивов горных пород, подверженных образованию пустот и формированию провальных воронок. Работы проводились в г. Кривом Роге вблизи Центрального рынка по ул. Урицкого, площадь изученного участка составила 1,5 га. Применялся комплекс геофизических методов, который включал аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТЗ), аудиоманнитовариационное зондирование (АМВЗ) и резонансно-акустическое профилирование (РАП). При обработке электромагнитных сигналов использовались вейвлет-преобразования, что позволило выделить хорошо локализованные изменения в геологической среде и дать горно-геологическую интерпретацию результатов геофизических измерений. В соответствии с полученными данными, горные выработки значительно повлияли на состояние изученного геологического пространства, стали причиной развития «неотектонических» процессов, изменения гидродинамического режима как подземных, так и грунтовых вод. Эти изменения вызвали интенсивную дифференциацию геологической среды по физическим характеристикам, образование ослабленных зон, в границах которых может происходить проседание поверхности. Используемый комплекс геофизических методов позволяет прогнозировать конкретные места образования вторичных воронок, оценивать изучаемую территорию по степени опасности, по возможным ограничениям деятельности человека в зонах образования воронок. На конкретном примере выполненных измерений показано, что системное изучение территории города геофизическими методами АМТЗ, РАП и высокоточной гравиро-

*разведки может обеспечить оптимальное решение проблем, связанных с последствиями отработки рудных залежей, проявлением провально-просадочных процессов.*

**Ключевые слова:** Криворожский бассейн, пустоты, провальные воронки, прикладная геофизика, аудимагнитотеллурическое зондирование (АМТЗ), аудимагнитовариационное зондирование (АМВЗ), резонансно-акустическое профилирование (РАП), гравитационная разведка, вейвлет-преобразования.

### **SVISTUN V.K. Results of cavity detection geophysical survey in one of rock massifs of Kryvyi Rih city.**

*Summary. Dnipropetrovsk geophysical expedition "Dneprogeofizika" has carried out studies of geoelectric methods potentialities for mapping rocks massifs susceptible to caving and pitcraters formation. The works were fulfilled in the city of Kryvyi Rih on the area of 1.5 hectares near the Central Market and Urytskyi St. A complex of geophysical methods, which included audimagnetotelluric sounding (AMTS), audimagnetic-variation sounding (AMVS) and resonance-acoustic profiling (RAP), was used.*

*Wavelet transform was utilized for electromagnetic signals treatment, which allowed distinguishing well-localized changes in the geological environment and giving mining and geological interpretation of the results of geophysical study. According to obtained data, the mine workings have had a considerable impact on the state of the studied area and resulted in development of "neotectonic" processes, changes in water drive of both the subsoil waters and the groundwaters. These changes have caused intense differentiation of geological environment in physical characteristics, weak zones formation where surface rock subsidence may occur.*

*Involved complex of geophysical methods allows predicting the precise location of secondary caving, fulfilling hazard evaluation of the studied territory and assessment of possible human activity restrictions within zones of caving. The actual example has shown the fact that systematic study of territory of the city by geophysical methods AMTS, RAP and high-precision gravity survey can provide the optimal solution to problems connected with ore mining consequences, collapse-subsidence processes.*

**Key words:** the Kryvyi Rih basin, cavities, pitcraters, applied geophysics, audimagnetotelluric sounding (AMTS), audimagnetic-variation sounding (AMVS), resonance acoustic profiling (RAP), gravitational prospecting, wavelet transform.

*Надійшла до редакції 16 вересня 2014 р.  
Представив до публікації проф. В.Д.Євтехов.*