

УДК 550.8.07/.08:681.518.54:622.02

## Теория и практика применения метода виброакустического контроля расслоения массива горных пород при камерно-столбовой отработке гипсовых месторождений

Паламарчук Т. А., Усаченко В. Б., Амелин В. А.

*Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины, Днепрпетровск, Украина*

---

### Аннотация

В статье рассмотрены теоретические и экспериментальные вопросы использования метода виброакустического контроля расслоения в массиве горных пород при камерно-столбовой отработке гипсовых месторождений.

---

Применение геофизических методов как для исследований, так и для диагностики состояния геомеханических структур позволяет значительно снизить трудоемкость работ и обеспечить оперативный экспресс-контроль исследуемых объектов. Использование геофизических методов основано на изучении физических процессов, происходящих в породном массиве, и взаимодействия различных физических полей с массивом горных пород.

Наиболее широкое применение находят акустические методы, к которым относятся сейсмический метод – диапазон частот до 200 Гц, сейсмоакустический метод – диапазон частот 0,2–2 кГц, звуковой – 2–20 кГц и ультразвуковой – диапазон частот, превышающих 16–20 кГц [1].

Виброакустический метод наиболее эффективен для контроля скрытых отслоений и заколов кровли горных выработок, а также отслоений других геомеханических структур и конструкций. Амплитуда и длительность колебаний, возбуждаемых в объекте с помощью механического удара на резонансной частоте при существовании отслоения, значительно больше амплитуды и длительности колебаний в объекте при отсутствии нарушения. Преимущественное применение ударных методов связано с простотой реализации, высокой мощностью возбуждаемых колебаний и, что весьма важно, малой энергоемкостью используемой аппаратуры. В зависимости от характера взаимодействия крепи с массивом система «крепь–массив» как колебательная система, может быть рассмотрена или как единичный элемент, или как взаимодействующие элементы, или как совершенно независимые элементы конструкций. При возрастании нагрузки на крепь увеличивается жесткость системы «крепь–массив», что, при возбуждении колебаний в системе, например, с помощью удара, приведет к снижению их амплитуды. Частота вынужденных колебаний системы определяется резонансными явлениями в системе, длина их волны соизмерима с размерами колеблющихся элементов конструкции. При возбуждении колебаний ударным методом в ненарушенной крепи, которая представляет собой весьма жесткую конструкцию, амплитуда ее отклика на удар будет минимальная. Однако недостаточно проработанными до настоящего времени остаются вопросы, связанные с методическим обеспечением диагностики сложноструктурных объектов геотехнических систем, а также горнотехнических, мелиоративных и объектов капитального строительства [1, 2].

Развитие деформационных процессов в породном массиве в камерных выработках больших пролетов, их сопряжениях, а также в лавах сопровождается формированием балочных конструкций, консолей и плит различных размеров и с различными условиями их зацепления. В связи с этим с целью теоретического обоснования применения виброакустического метода для оперативного контроля состояния горных выработок, а также выявления наиболее информативных параметров метода рассмотрим в первом приближении нормальный удар упругого шара (в нашем случае ударника) об упругую плиту (кровлю). Время, в течение которого происходит удар, можно разбить на два периода. В течение первого периода шарик сплющивается, а плита под ним прогибается. Благодаря этому возникают упругие силы, которые тормозят движение шара (ударника) и он останавливается. Первый период окончен. Теперь упругие силы в шаре и стенке стремятся восстановить их прежнюю форму. Если в первом

приближении принять ударник и кровлю идеально упругими (как мы и предполагаем), то силы, действующие во втором периоде, в точности равны силам, действующим в первом периоде.

Определим импульс, который испытал ударник за время удара. После удара скорость не изменилась по величине, но изменила знак на обратный

$$\begin{aligned} V' &= -V, \\ P &= mV' - mV = -2mV. \end{aligned} \quad (1)$$

А импульс, полученный за время удара кровлей, должен быть по величине равен и противоположен импульсу, испытанному ударником, т. е.

$$\vec{P}' = 2m\vec{V}. \quad (2)$$

В то же время  $\vec{P}' = \vec{F}\Delta t$ , где  $F$  – средняя сила удара ударника о кровлю;  $\Delta t$  – время соударения, которое приблизительно равно продолжительности акустического импульса.

По второму закону Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a} = \rho V \vec{a}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность горных пород;  $V$  – объем отслоения;  $a$  – ускорение, полученное горными породами кровли, которое можно определить акселерометром.

Плотность энергии, передаваемой в результате удара ударника о кровлю, равна

$$W = \frac{P^2}{2\rho} = \frac{\rho^2 a^2 (\Delta t)^2}{2\rho} = \frac{\rho}{2} (a\Delta t)^2. \quad (4)$$

Обозначим через  $K$  коэффициент соударения, равный отношению плотности энергии упругого удара к плотности энергии колебания кровли

$$K = \frac{W_{уд.}}{W_{кол}} = \frac{\rho(a\Delta t)^2}{2\rho A^2 \omega^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{a\Delta t}{A\omega} \right)^2. \quad (5)$$

Таким образом, наиболее информативными параметрами, характеризующими соударение ударника и кровли, является, с одной стороны, амплитуда и частота колебания кровли, а с другой – ускорение ударника и время соударения.

В кровле с отколом ускорение будет меньше, чем в ненарушенной кровле. Это связано с тем, что при разрушении кровли происходит ее разгрузка. А частота акустического сигнала будет более низкой для кровли, имеющей отслоения и заколы, чем в случае, когда сигнал распространяется в сплошной кровле.

Возможен также подход, при котором заколы и отслоения в кровле и стенках горных выработок рассматриваются в виде плит с различными условиями закрепления их сторон [3–5]. При таком подходе уменьшение количества жесткости закрепленных сторон и толщины плиты и увеличение ее длины и ширины соответствуют ослаблению механической связи нарушенного участка кровли с ненарушенным массивом горных пород.

Рассмотрим удар какого-либо тела, например шара, о прямоугольную плиту со сторонами  $a$ ,  $b$ , толщиной  $d$  и следующими условиями закрепления плиты: 1) со свободными сторонами; 2) жестко закрепленная по одной стороне; 3) по двум противоположным; 4) по двум смежным

сторонам; 5) по трем сторонам; 6) по четырем ее сторонам. Воспользовавшись приближенной теорией и рядом допущений о недеформируемости при изгибе срединной части плиты из уравнения равновесия [6], получим следующие значения амплитуды и частоты колебаний кровли горных пород, которую моделируем в виде плиты:

$$\begin{aligned}\omega_i &= \alpha_i V_p d \sqrt{\beta_i}; \\ A_{cmi}^{\max} &= \frac{\gamma_i}{V_p^2 \beta_i d^2},\end{aligned}\tag{6}$$

где  $V_p$  – скорость распространения продольной волны.

Подставляя в уравнение (6) выражение для скорости распространения продольной упругой волны в напряженных горных породах [7] без учета вязких свойств среды, получим зависимость частоты и амплитуды колебаний кровли горных выработок от величины начальных механических напряжений в массиве

$$\begin{aligned}\omega_i &= \alpha_i V_p^0 d \sqrt{A \beta_i \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K}\right)}; \\ A_{cmi}^{\max} &= \frac{\gamma_i}{V_p^{02} d^2 A \beta_i \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K}\right)},\end{aligned}\tag{7}$$

где  $A$  – акустический коэффициент трещиноватости;  $\sigma_{zz}^0$  – компоненты начальных напряжений;  $K$  – модуль всестороннего сжатия;  $\beta_i$  – коэффициент формы отслоения в кровле, зависящий от условий закрепления отслоения; (знак "–" соответствует сжатию, а знак "+" – растяжению).

Кластерно-иерархическая структура массива горных пород учитывается заменой в формулах (7) модуля сдвига  $K$  на  $K^*$  аналогично [8]

$$K^* = \frac{2\Delta U}{66,63R^3 \varepsilon^2 (1 - 2\nu)}.\tag{8}$$

А для максимальных напряжений в плитах вдоль направлений  $x$  и  $y$  имеем следующие выражения:

$$\begin{aligned}\sigma_{ix}^{\max} &= \frac{\xi_i (a^2 + vb^2) \pi^2 \rho}{\beta_i da^2 b^2}; \\ \sigma_{iy}^{\max} &= \frac{\xi_i (b^2 + va^2) \pi^2 \rho}{\beta_i da^2 b^2}.\end{aligned}\tag{9}$$

Необходимым условием устойчивости кровли является непревышение максимальных напряжений предела прочности кровли горных пород на растяжение:

$$\sigma_{\max} < \sigma_p.\tag{10}$$

Предел прочности на растяжение плиты может быть определен, например, с помощью ультразвукового метода.

Из этого условия полагаем, что при  $b > a$  вес плиты не должен превышать величины

$$p < \frac{\psi_i \sigma_p \beta_i a^3 b^3 d^2 g}{\pi^2 (b^2 + \nu a^2)}; \quad (11)$$

а для  $a > b$

$$p < \frac{\psi_i \sigma_p \beta_i a^3 b^3 d^2 g}{\pi^2 (a^2 + \nu b^2)}, \quad (12)$$

где  $\alpha_i$ ;  $\beta_i$ ;  $\gamma_i$ ;  $\xi_i$ ;  $\psi_i$  – коэффициенты для различных случаев закрепления плит ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ).

Коэффициенты для определения частоты, амплитуды, максимальных напряжений и условий устойчивости кровли для различных условий защемления определяются по табл. 1.

Оценим полученные параметры, выраженные в относительных единицах для квадратных плит с единичными сторонами.

Табл. 1. Значения коэффициентов

№ п/п	$\alpha_i$	$\beta_i$	$\gamma_i$	$\xi_i$	$\psi_i$
1	2,85	$\frac{(a^2 + b^2)^2}{a^4 b^4}$	1,2	0,6	1,67
2	2,85	$\frac{b^4 + 2,333a^2 b^2 + 2,441a^4}{a^4 b^4}$	0,2	0,6	1,67
3	2,85	$\frac{b^4 + 2,566a^2 b^2 + 2,441a^4}{a^4 b^4}$	1,2	0,6	1,67
4	4,45	$\frac{b^4 + 1,115a^2 b^2 + 2,138a^4}{a^4 b^4}$	0,49	0,245	4,08
5	9,16	$\frac{b^4 + 2,908a^2 b^2 + a^4}{a^4 b^4}$	0,23	0,115	0,69
6	9,16	$\frac{b^4 + 0,605a^2 b^2 + a^4}{a^4 b^4}$	0,23	0,115	8,69

Анализ полученных формул и зависимостей показывает, что на частоту собственных колебаний участков кровли оказывают влияние три фактора: тип породы, условия закрепления, размеры плиты. Из результатов, приведенных в табл. 2, на рис. 1–2, следует, что с уменьшением степени свободы плиты наблюдается тенденция к возрастанию частоты собственных колебаний, уменьшению статического прогиба и возникающих при этом максимальных напряжений, что свидетельствует об увеличении устойчивости кровли, т. е. система стремится к достижению минимума потенциальной энергии, наблюдаются процессы самоорганизации.

Кроме того, о возрастании устойчивости кровли свидетельствуют увеличение скорости упругих волн, уменьшение размеров кровли и коэффициента Пуассона, т. е. степени ее трещиноватости (скорость продольной волны в горных породах в зависимости от литотипа изменяется в пределах от 2000 до 6000 м/с, в 3 раза изменяется частота колебаний).

Табл. 2. Численные значения информативных параметров в относительных единицах ( $a = b = 1$ )

№ п/п	$\omega_i/\omega_0$	$A_i/A_0$	$\sigma_x/\sigma_0$	$p/p_0$
1	19,7	0,30	0,15	1,1
2	23,2	0,10	0,10	1,6
3	29,1	0,14	0,07	2,4
4	32,8	0,11	0,05	3,0
5	56,3	0,04	0,01	9,1
6	36,1	0,09	0,04	3,8

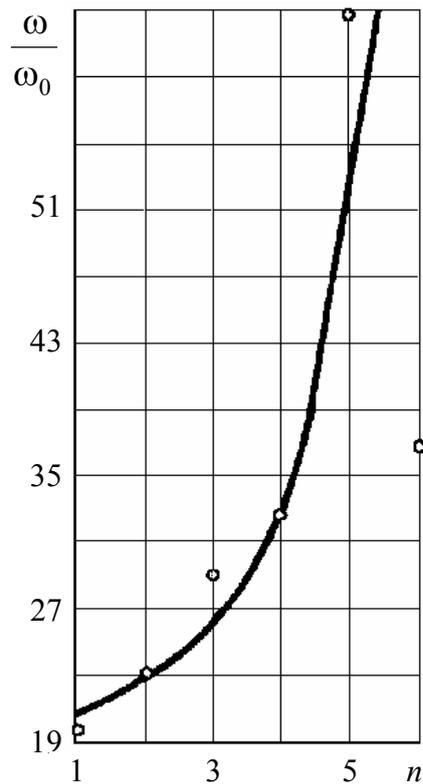


Рис. 1. Зависимость относительной частоты собственных колебаний кровли от степени ее свободы

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0} = n^2 + 19; \varepsilon \leq 15 \%\right)$$

При уменьшении количества закрепленных сторон отслоения от четырех до одной происходит снижение частоты ее собственных колебаний. Частота колебания плиты пропорциональна ее толщине и обратно пропорциональна второй степени ее длины, то есть, при уменьшении толщины и увеличении площади отслоения или закола кровли частоты собственных колебаний отслоений уменьшаются.

Таким образом, частота и амплитуда собственных колебаний участка кровли характеризуют его состояние, т. е. степень устойчивости.

С целью исследования возможностей виброакустического метода, степени его эффективности, определения наиболее информативных параметров, а также проверки результатов теоретических исследований проведена геофизическая диагностика состояния сложноструктурного породного массива и различных геомеханических систем, в частности, в зонах провальных обрушений, образующихся при разработке Артемовского гипсового месторождения.

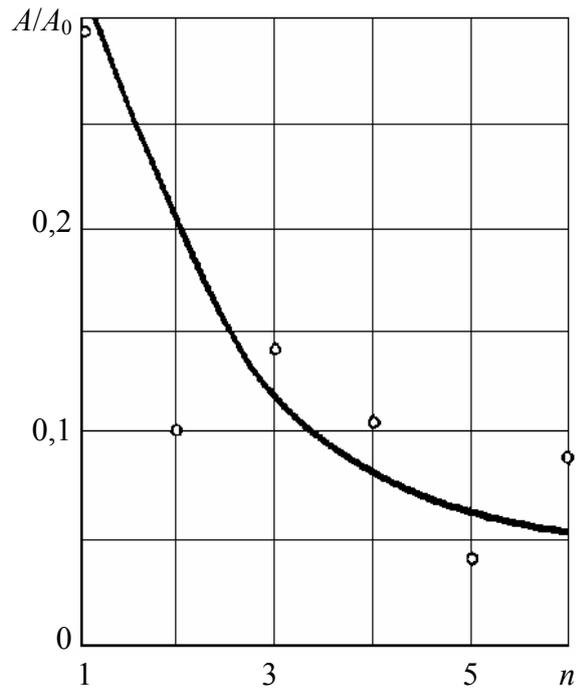


Рис. 2. Зависимость относительной амплитуды колебаний кровли от степени ее свободы ( $\frac{A}{A_0} = \frac{0,37}{n}$ ;  $\varepsilon \leq 13\%$ )

При разработке Артемовского месторождения гипса камерно-столбовой системой в потолочине 10 камеры V панели было встречено геологическое нарушение карстового типа, основным признаком которого было интенсивное поступление геомассы в подземное пространство шахты. В результате этого на поверхности горного отвода образовалась воронка диаметром 28,0 м и глубиной 18,0 м [9].

Для создания цельной картины процессов, происходящих в грунтово-породном массиве на участке геологической нарушенности и прилегающих к нему, использовались методы виброакустической диагностики (основной, для измерений применялся индикатор «ДИКОН») и регистрации естественного импульсного электромагнитного излучения поля Земли (метод ЕИЭМПЗ) (вспомогательный) (применялся дистанционный радиоволновой индикатор-определитель зон хрупкого разрушения «ДЭМОН»).

Также к вспомогательным методам относилась геодезическая съемка в шахте и на поверхности, которая была выполнена при технической помощи маркшейдерского отдела ЗАО фирмы «Стромгипс». Схема расположения точек диагностики нарушенного участка в 10 камеры V панели приведена на рис. 3.

Результаты виброакустической диагностики показали, что потолочина 10 камеры в районе точек 1–7 находится в удовлетворительном состоянии. В то же время результаты вибродиагностики боковой стенки вдоль профиля, определяемого положением точек 11–12, 13–18, свидетельствует о нарушенности массива. Очевидно, что геологическое нарушение, вызвавшее вывал в кровле соединительной выработки, распространяется в целик. Учитывая, что визуальные проявления нарушенности в камере 10 отсутствуют, можно предположить ориентацию нарушенной зоны вдоль камеры № 10. Хрупкого разрушения потолочины по данным метода ЕИЭМПЗ не наблюдается.

С целью комплексного изучения нарушения над камерой № 10 были выполнены исследования и на земной поверхности. Исследуемый участок разбит профильными линиями на квадраты со стороной 20 м. Измерения выполнялись в вершинах каждого из квадратов за исключением точек, недоступных для контроля. Измерения выполнялись методом: ЕИЭМПЗ.

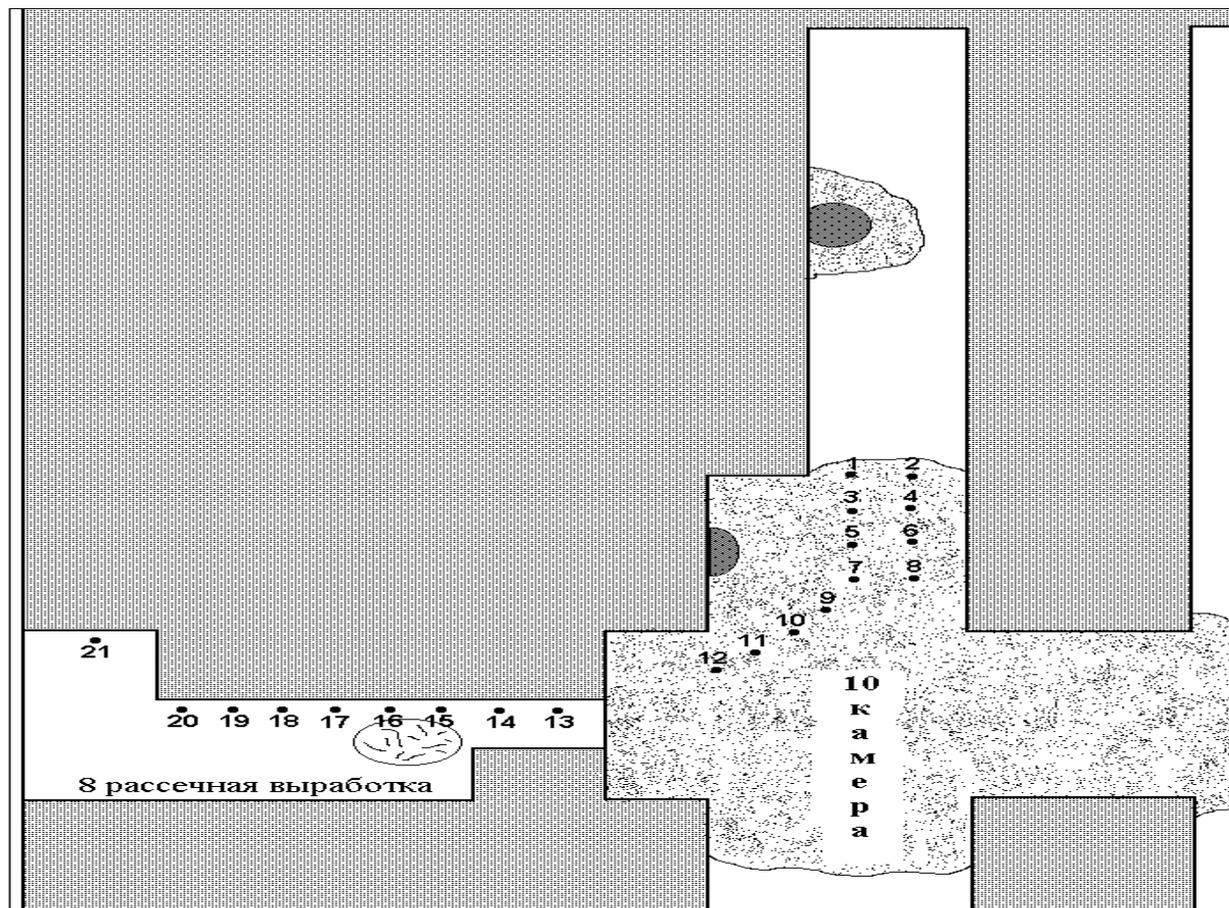


Рис. 3. Схема расположения точек выполнения диагностики потолочины 10 камеры V панели и 8 рассечной выработки Артемовской гипсовой шахты

Обобщенные результаты измерений по методу ЕИЭМПЗ приведены на рис. 4.

Анализ результатов ЕИЭМПЗ показал, что электромагнитное фоновое излучение в окрестности провальной воронки распространено равномерно. Единственная аномальная точка – № 7. Это свидетельство того, что интенсивные подвижки грунта приостановились.

Таким образом, результаты геофизической диагностики свидетельствуют о следующем:

- 1) выход геомассы в подземное пространство гипсовой шахты обусловлен снижением до критического значения мощности гипсодоломитового защитного слоя, в основном, за счет утонения верхней, 3,5-метровой защитной пачки гипса;
- 2) поле деформаций приповерхностной грунтовой толщи неоднородно и имеет связь с расположением «окон» выхода геомассы в камеры, а также с пространственной ориентацией выработок шахты.

Обобщая изложенное можно заключить, что образовавшаяся природно-техногенная система представляет собой трехступенчатую цилиндрическую конструкцию. Технические решения подчинены формированию двух основных защитных искусственных конструкций: запирающего конуса на сопряжении воронка – трубообразная полость и грузонесущей защитной конструкции над подземной камерой.

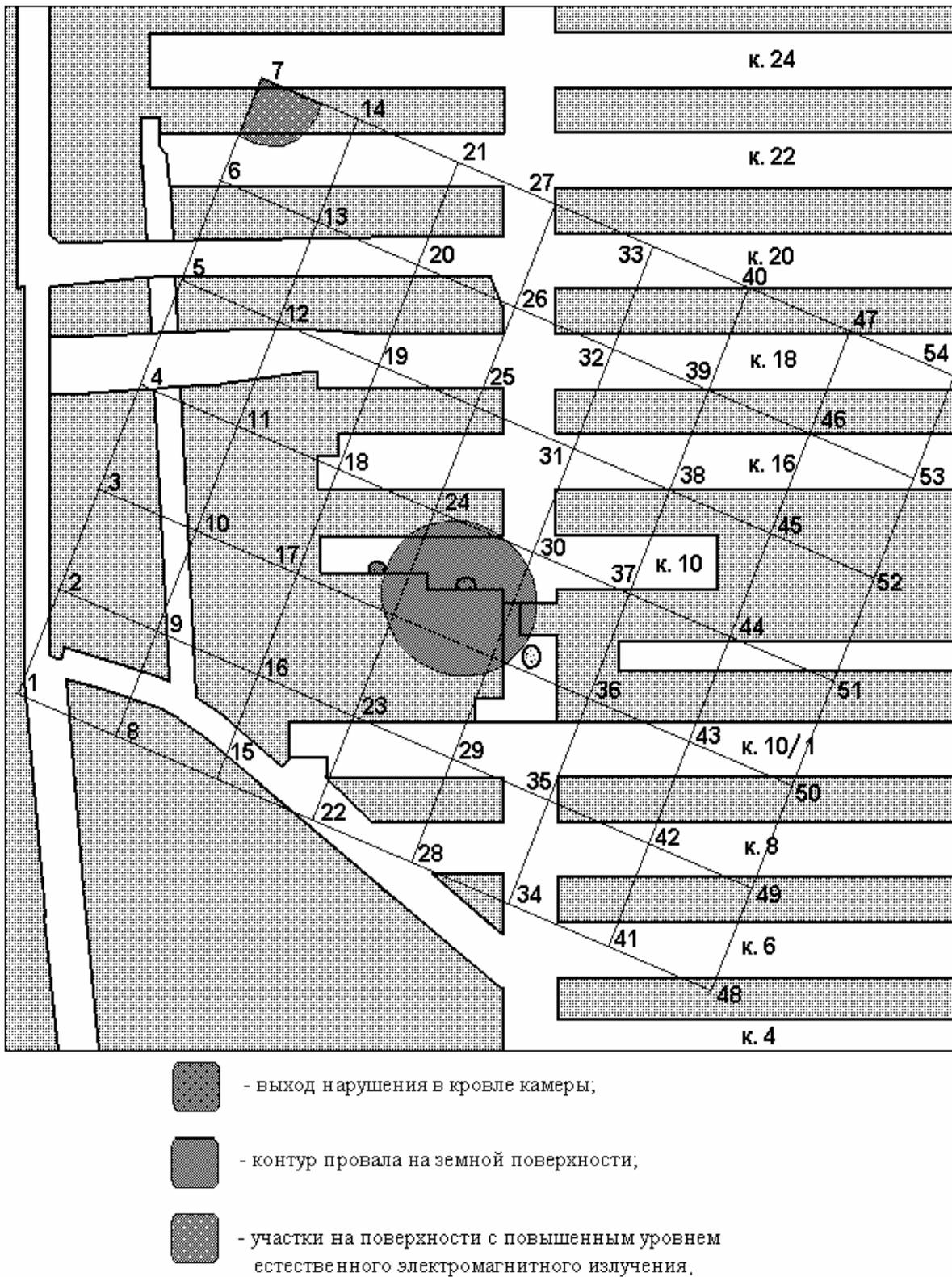


Рис. 4. Обобщенные результаты измерений интенсивности естественного электромагнитного излучения (ЕИЭМПЗ) грунтовой толщи в окрестности провальной воронки над камерой № 10 V панели

Вторая часть работ связана со стабилизацией нарушенной, пришедшей в движение литотолщи на цилиндрическом участке системы. Таким образом, идея реализации рекомендуемых работ связана с избирательным воздействием на локально-критические зоны продуктивной толщи с целью прекращения поступления геомассы в полости подземных камер, предотвращения развития зоны обрушения земной поверхности, стабилизации гидрогеологических условий и выравнивания уровня напряженного состояния в массиве пород.

Согласно научно-техническому обоснованию, предотвращение развития зон обрушений на земной поверхности, прекращение поступления геомассы в подземные выработки и выравнивание уровня напряженного состояния в массиве пород, возможно при условии создания на участках сопряжений «квазицилиндрическая полость – подземная камера», искусственной защитной пачки.

Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что метод виброакустического контроля позволяет выявить не только расслоения в сложно-структурных потолочинах подземных камер гипсовых шахт, но также служит незаменимым инструментом при диагностике состояния бетонных, набрызгбетонных, комбинированных, металлических и деревянных крепей, качества тампонажных работ и анкерования, однако этот метод не дает возможности выявлять интегральные зоны трещиноватости.

### Библиографический список

1. Паламарчук, Т. А. Элементы механосинергетики породного массива / Т. А. Паламарчук, В. Я. Кириченко, Б. М. Усаченко. - Днепропетровск: Лири ЛТД, 2006. - 307 с.
2. Паламарчук, Т. А. Теоретические основы вибродиагностики расслоения сложноструктурных потолочин подземных камер гипсовых шахт / Т.А. Паламарчук, В.Б. Усаченко // Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. - 2001. - № 30. - С. 223-229.
3. Гольдштейн, Р. В. Удар. - М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. - 448 с.
4. Яланский, А. А. Особенности контроля плоско-параллельных структур при разрушении массива горных пород и блочных структур / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, А.В. Бойко // Механика и разрушение горных пород. - К.: Наукова думка. - 1993. - С. 106-110.
5. Безухов, Н. И. Устойчивость и динамика сооружений / Н.И. Безухов, О.В. Лунин, Н.В. Колкутов. - М.: Высшая школа, 1987. - 264 с.
6. Тимошенко, С. П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - 635 с.
7. Глушко, В. Т. Про розповсюдження пружних хвиль у напруженому дрібно-шаровому середовищі / В.Т. Глушко, А. О. Яланський, Т.А. Паламарчук // Доповіді АН УРСР. - 1971. - Сер. Б. - №3 - С. 183-193.
8. Гречихин, Л. И. Взрывные технологии в шахтном строительстве / Л.И. Гречихин, О.И. Рублева // Вестник. Современные проблемы шахтного и подземного строительства. - Донецк: «Инфо-Пресс», 2006. - Вып. 7. - С. 100-110.
9. Литолого-геомеханическая оценка продуктивной толщи в зонах провальных обрушений и рекомендации по ограничению и предотвращению поступления геомассы в выработки Артемовской гипсовой шахты. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2001. - 85 с.

© Паламарчук Т. А., Усаченко В. Б., Амелин В. А., 2009 г.