

УДК 550.834

А.В. Чугаев

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОНИТОРИНГА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН*

На Верхнекамском месторождении калийных солей, в связи с аварийными событиями последних нескольких лет, определены наиболее опасные участки, по которым ведутся различные мониторинговые исследования, в том числе сейсморазведочные. Проведен анализ серии измерений, полученных в процессе мониторинговых исследований аварийного участка шахтного поля затопленного рудника с помощью поверхностных волн. Сделано заключение об изменении скоростной характеристики приповерхностной части горного массива во времени, что в свою очередь является индикатором наличия негативных процессов ослабления прочностных характеристик в горном массиве. Установлена связь между уровнем грунтовых вод и значением скорости поперечных волн, эмпирически определен коэффициент связи.

Ключевые слова: многоволновая сейсморазведка, геофизический контроль, отраженные волны, поверхностные волны, мониторинг, техногенная катастрофа, безопасность горных работ, статистический анализ.

Интенсивные техногенные процессы, происходящие в горном массиве на подработанных территориях, обуславливают необходимость регулярного мониторинга, направленного на контроль состояния инженерно-активной зоны, влияющей на устойчивость зданий и сооружений.

На Верхнекамском месторождении калийных солей, в связи с аварийными событиями последних нескольких лет, определены наиболее опасные участки, по которым ведутся различные мониторинговые исследования [1, 2]. Для оценки значимости регистрируемых изменений необходимо определить критерии, позволяющие фиксировать наличие изменения физико-механических свойств изучаемого интервала породного массива.

Проведен анализ серии измерений, полученных в процессе монито-

ринговых исследований аварийного участка шахтного поля затопленного рудника с помощью поверхностных волн. Серия состояла из 14 наблюдений по повторяющемуся профилю. Исследования проводились с одинаковой системой расстановки и аппаратурой, время между первым и последним измерением – 20 месяцев. Результатом одного измерения является скоростное распределение по разрезу $V(x,h)$, получаемое с помощью анализа дисперсии поверхностных волн. Глубины исследований поверхностными волнами составляют от 0 до 40 метров (рис. 1). Принимая во внимание многократное повторение наблюдений, в нашем распоряжении имеется трехмерный куб данных $V = f(x,h,t)$, где V – скорость поперечных волн, x – пикет на профиле, h – глубина, t – дата исследования

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №12-05-31102

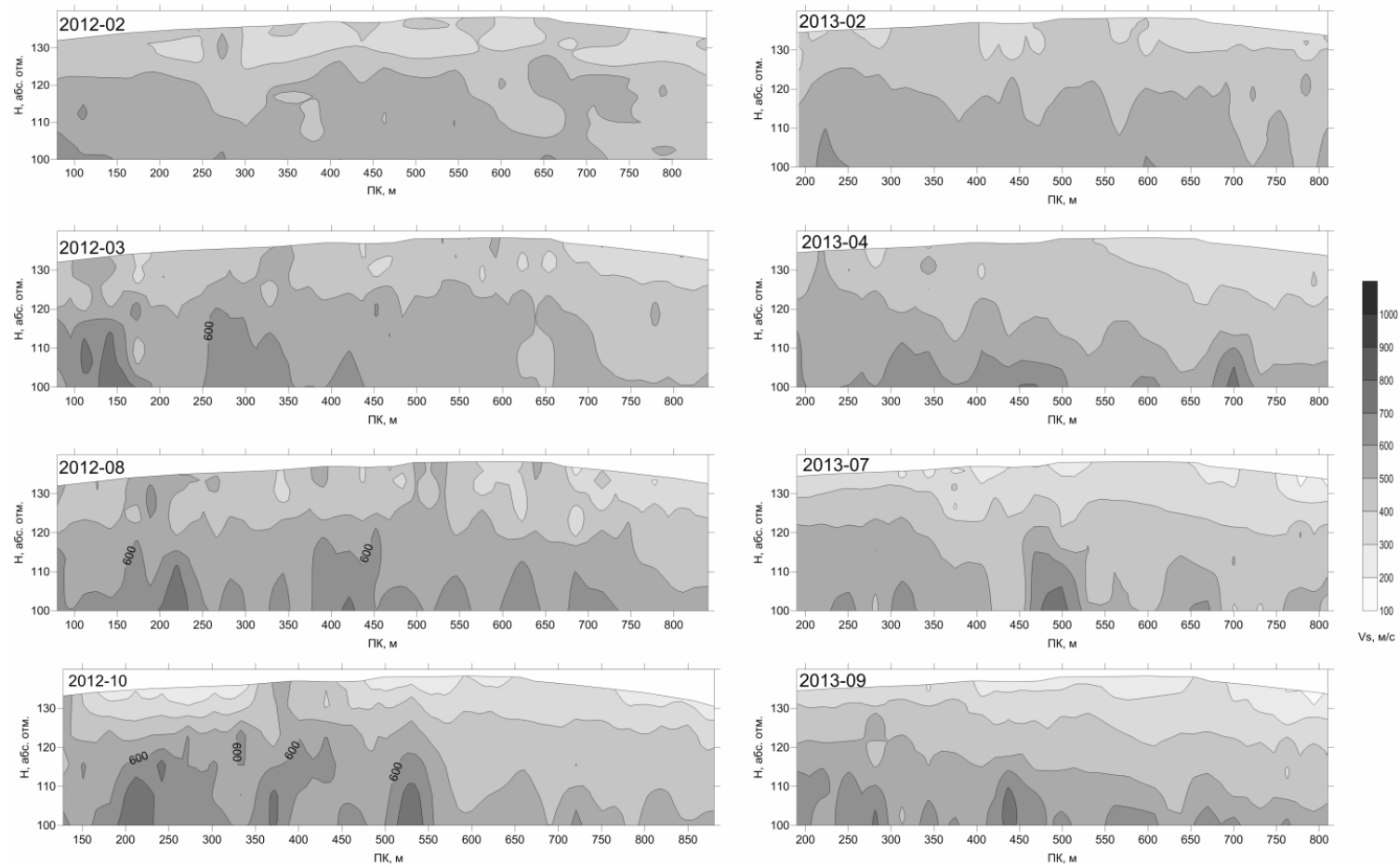


Рис. 1. Глубинные скоростные разрезы по поверхностным волнам

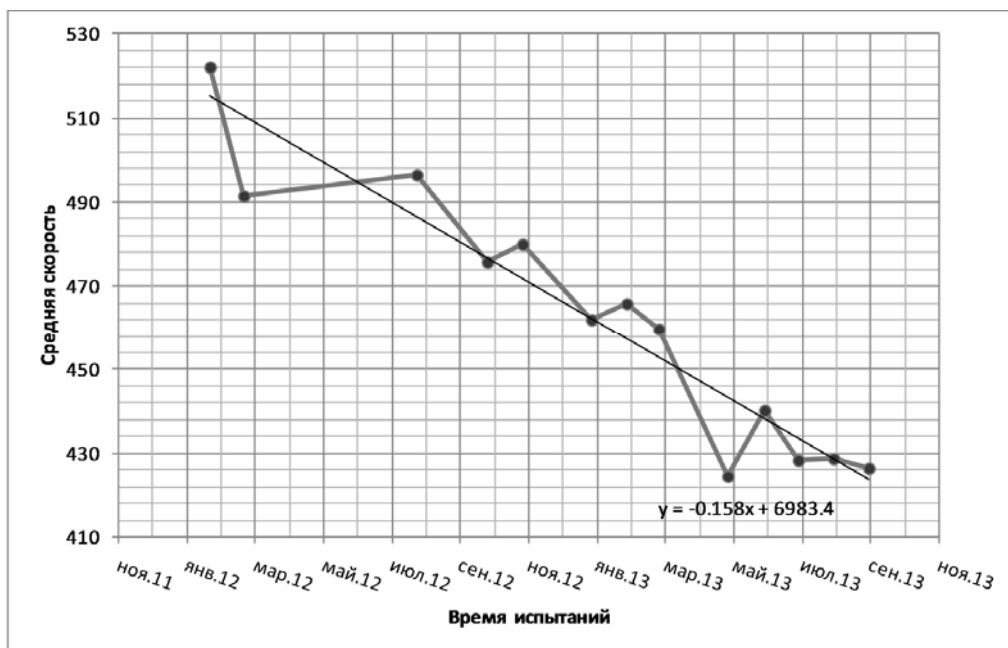


Рис. 2. Изменение медианы скорости поперечных волн по разрезу со временем

Для визуализации и последующего анализа данных предложено несколько подходов:

1. Интегральная оценка одного измерения и построение регионального тренда, позволяющего оценить влияние локальных глубинных аномалий на территорию в целом.

2. Поиск участков разреза с наиболее неустойчивым определением скоростной характеристики.

3. Поиск участков разреза с наиболее интенсивным изменением скоростей поперечных волн.

4. Построение пространственно-временных диаграмм, позволяющих оценить поведение скоростной характеристики во времени.

Интегральная оценка и определение устойчивости результатов.

Рассчитаны медианы скоростей \bar{V} по разрезу для каждого из наблюдений и определена линейная регрессия (рис. 2). Среднеквадратическое от-

клонение σ_t для функции $F = \bar{V}_i(t)$ составило 26 м/с.

Как известно, в рыхлых грунтах поперечные волны чувствительны к влагонасыщенности пород, и при повышении влажности, за счет размягчения минерального скелета породы, скорость поперечных волн снижается [3]. Этот эффект оказался существенным при проведении мониторинговых исследований. Поскольку влажность грунтов напрямую не измерялась, использован косвенный способ определения водонасыщенности грунтов. Непосредственно на изучаемом профиле в гидрогеологической скважине проводится мониторинг уровня грунтовых вод (УГВ). УГВ имеет четкие сезонные колебания с локальными максимумами в весенние и осенние месяцы, и минимумами зимой и летом.

Сравнение графиков изменения скорости поперечных волн и уровня грунтовых вод выявило обратную за-

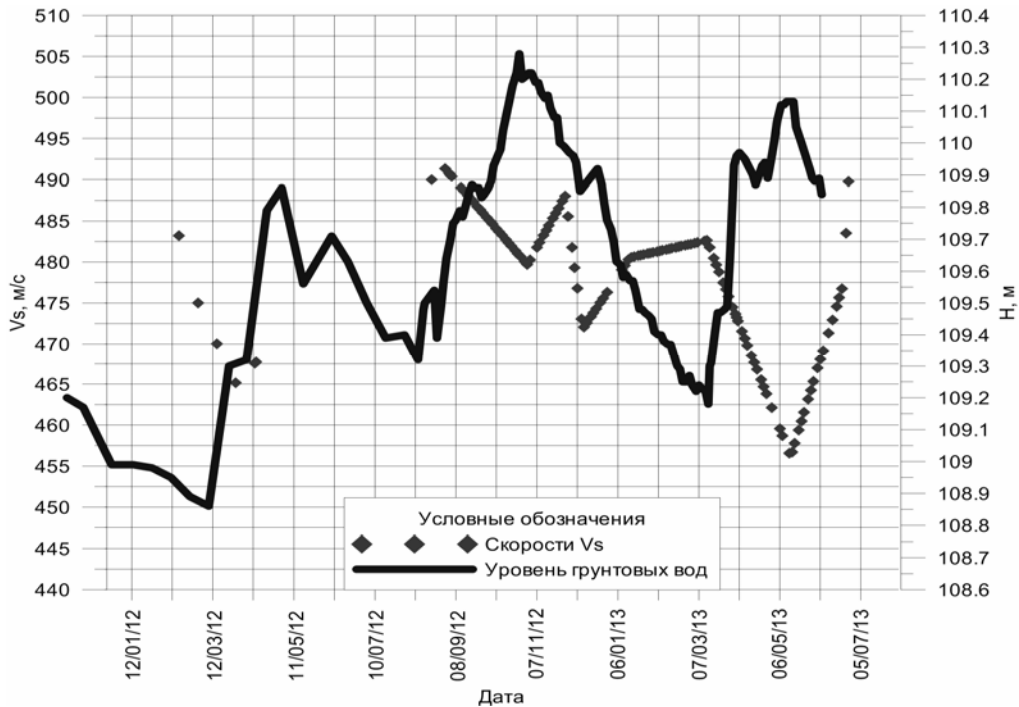


Рис. 3. Сопоставление скоростей поперечных волн с уровнем грунтовых вод

висимость УГВ и скоростей поперечных волн, с некоторым запаздыванием уровня грунтовых вод во времени, что логично объясняется, ведь выпавшие осадки, фильтруясь через рыхлые приповерхностные отложения, не сразу достигают водоносных горизонтов терригенно-карбонатной толщи. На основе сравнения графиков, запаздывание оценено как 20 дней и учтено в последующих построениях (рис. 3).

Эмпирически определен коэффициент обратной связи скорости поперечных волн и уровня грунтовых вод, в значения скорости введена поправка за колебания влажности пород. Это позволило сократить разброс значений скоростей поперечных волн от 26 м/с до 22 м/с.

Поскольку нас больше всего интересует изменение параметров во времени, построено распределение

среднеквадратического отклонения по разрезу $\sigma(x,h)$. Для этого массив $V(x,h,t)$ разбивается на набор одномерных кривых $V_{x,h} = f(t)$, каждая из которых аппроксимируется линейной функцией, после чего определяется среднеквадратическое отклонение $\sigma_{x,h}$ (рис. 4).

На этом распределении выделяются области повышенных значений: у поверхности и на глубине. Поверхностные вариации объясняются сезонными колебаниями влажности, промерзанием почвы, движением приповерхностных вод.

Что касается сильных вариаций связанных с глубиной, то их можно объяснить погрешностями определения скорости на предельных глубинах исследования поверхностными волнами. Исключив на этом основании нижнюю часть разреза (порядка 7 метров), и пересчитав среднеквадра-

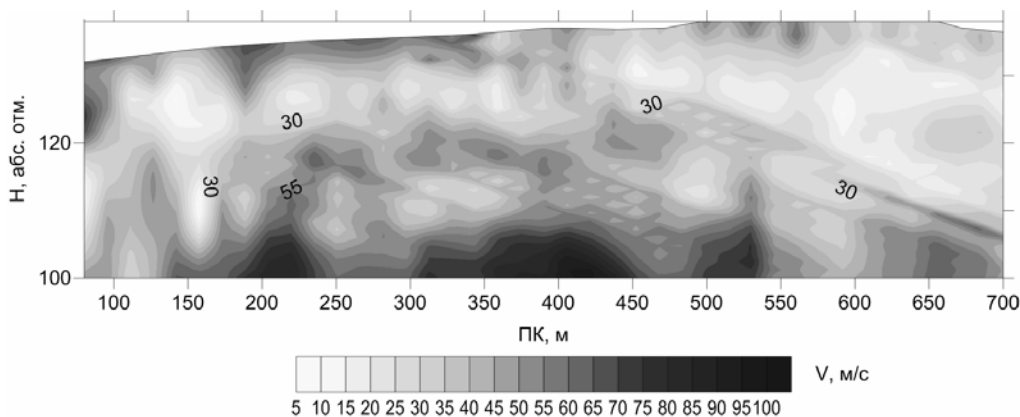


Рис. 4. Распределение среднеквадратического отклонения по разрезу $\sigma(x, h)$

тическое отклонение, получим уменьшение σ_t еще на 25 %. В итоге среднеквадратическое отклонение σ_t , рассчитанное по средним значениям скорости составило 16 м/с или 3% от абсолютного значения.

Кроме оценки среднеквадратического отклонения среднего значения скорости σ_t , сделана оценка среднего значения на распределении $\sigma(x, h)$. Это значение, естественно, оказалось существенно выше – 33 м/с, ведь отклонение по средним значениям $\bar{V}(t)$ уменьшается за счет накопления данных и уменьшения погрешности.

Используя правило «двух сигм» [4] можно говорить с вероятностью 95%, что изменение скорости во времени является достоверным для среднего значения скорости по профилю на величину большую 32 м/с и на 66 м/с в конкретной точке на профиле.

По данным отраженных волн на протяжении профиля выделены зоны аномалий волнового поля, выражающихся в изменении скоростей продольных волн, преобладающей частоты и амплитуд. Аномальные зоны 1 и 2 – пикеты соответственно 200 – 350 и 550-700, «нормальная» зона – пикеты 350-550.

В выделенных зонах рассчитаны локальные средние значения скоростей поперечных волн. Необходимо отметить, что падения скоростей в нормальной и аномальных зонах можно считать практически одинаковыми (коэффициент наклона линейной аппроксимации $kH = 0.119$ против $k1 = 0.122$ и $k2 = 0.130$), что указывает на равномерность процессов ослабления физико-механических свойств в верхней части разреза (рис. 5).

Полученный результат можно объяснить масштабным эффектом, когда локальная подземная аномалия, находящаяся в зоне выработок на глубинах 300-400 м, в приповерхностных отложениях выражается на достаточно большой площади, в результате, в приповерхностной зоне аномалия «размывается» и сглаживается. Для выявления локальных аномалий в приповерхностной зоне необходимо вводить поправку за изменение регионального фона.

Это также позволит сравнивать абсолютные значения скоростей, полученные в разное время.

Таким образом, при интерпретации данных полученных с помощью поверхностных волн, необходимо учитывать следующие факторы:

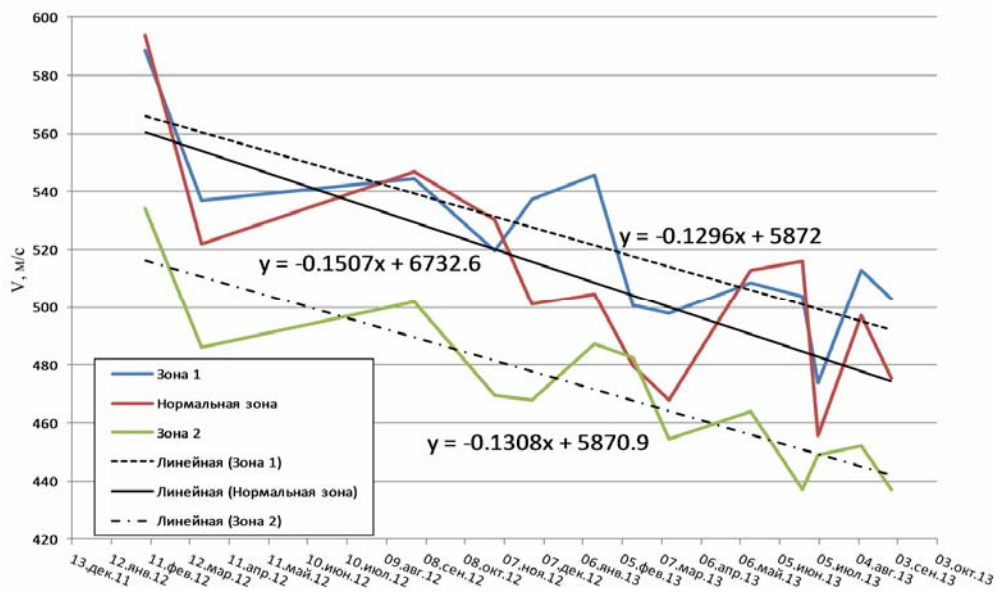


Рис. 5. Изменение скоростей поперечных волн по разрезу со временем

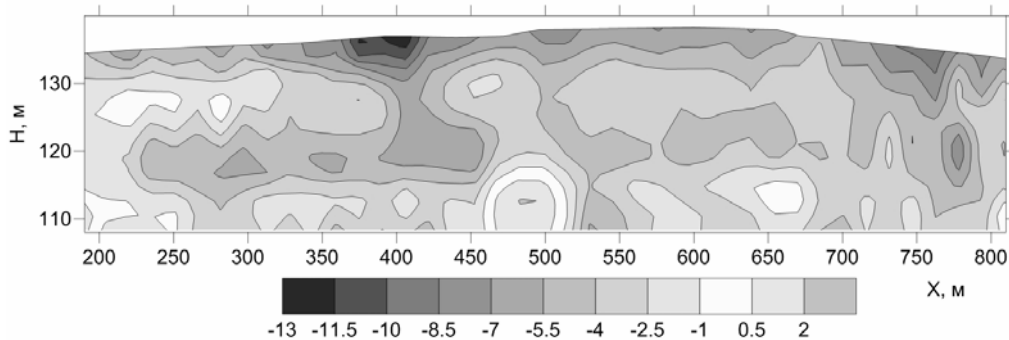


Рис. 6. Градиенты изменения скоростей поперечных волн по разрезу, м/с в месяц, январь – сентябрь 2013

- изменения влажности горных пород, обусловленные движением поверхностных вод и осадками;
- изменение регионального фона скоростной характеристики на профиле, вследствие особенностей проявления глубинных аномалий на поверхности;
- предел глубинности исследований.

Построение распределения коэффициентов наклона

Для выявления локальных аномалий можно использовать распределение коэффициентов наклона $k(x,h)$ линейной регрессии, полученных для каждой функции $V_{x,h}=f(t)$, которое может выявить участки наибольшего изменения скоростей (рис. 6).

Построение пространственно-временных диаграмм

Еще одним способом наглядной визуализации мониторинговых исследований и контроля качества полу-

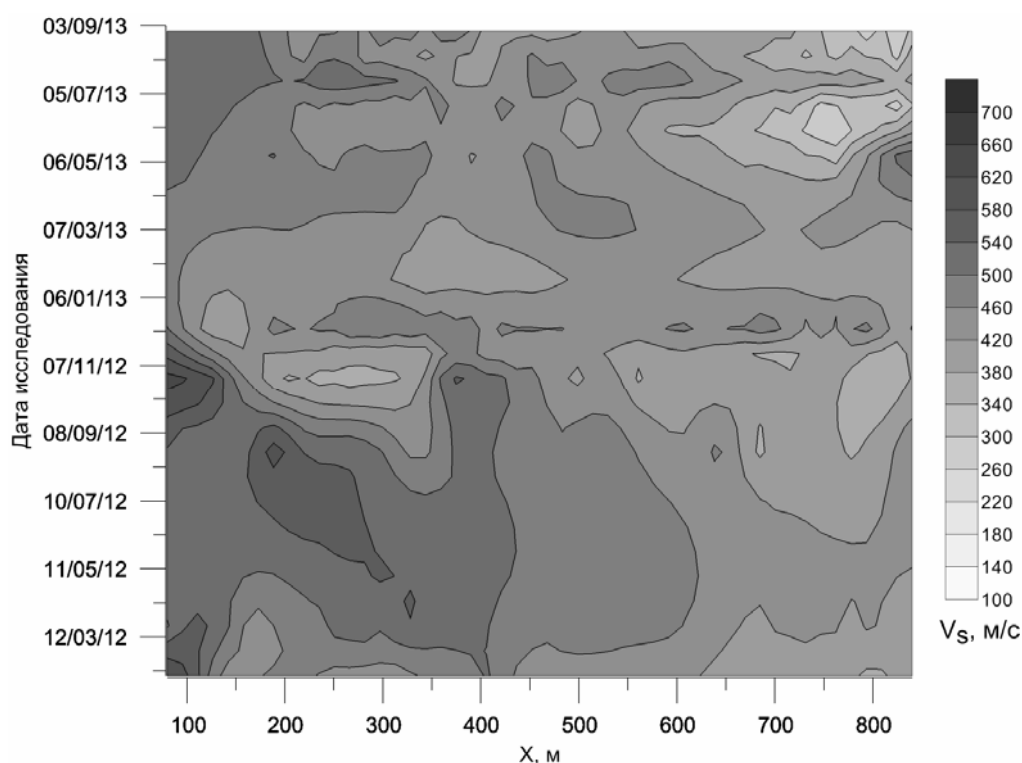


Рис. 7. Пространственно-временное распределение, глубины 0-10 м

чаемых данных является построение пространственно-временных распределений.

Разрез разбивается на определенные интервалы глубин (которые, как правило, выбираются по сейсмогеологическим либо инженерно-геологическим соображениям), скорости в этих интервалах осредняются, в результате появляется возможность строить пространственно-временное распределение скоростей $V(x,t)$, на этих распределениях можно проследить по-

ведение зон, вызывающих повышенное внимание (рис. 7). Региональный тренд исключен, для того чтобы иметь возможность сравнения абсолютных значений по всему распределению.

Комплекс предложенных подходов позволяет сделать заключение об изменении скоростной характеристики массива во времени, что в свою очередь является индикатором наличия негативных процессов ослабления прочностных характеристик в горном массиве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санфи́ров И.А. Сейсморазведочное обоснование инженерно-геологических исследований на территориях техногенных катастроф / И.А. Санфи́ров, А.Г. Ярославцев, А.И. Никифорова, Т.В. Байбакова, М.М. Калашникова, А.И. Шумахер // Материалы восьмой научно-практической конференции и выставки «Инженерная

геофизика 2012». Электронное издание. EAGE, г. Геленджик, 2012, <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=58086>

2. Чугаев А.В. Многоволновая сейсморазведка: возможности и практические приложения // Материалы 5-й Международной геолого-геофизической конферен-

ции «Санкт-Петербург 2012. Науки о Земле: новые горизонты в освоении недр», <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=57842>

3. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований: Введение в

общую сейсмологию // Новосибирск: изд-во СО РАН НИЦ ОИГТМ, 1997.

4. Венецкий И.Г. Теория вероятностей и математическая статистика. / И. Г. Венецкий, Г.С. Кильдишев // М: Статистика – 1975. **ИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Чугаев Александр Валентинович – кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук; chugaev@mi-perm.ru



UDC 550.834

QUALITY ESTIMATION CRITERIA OF UNDERMINED TERRITORY MONITORING BY SURFACE WAVES

Chugaev Aleksandr Valentinovich, PhD, research officer, Federal State Institution of Science Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Perm, chugaev@mi-perm.ru

Because of downfall incidents on Verhnekamskoe potash deposit there were defined most hazardous places. In this places are held different types of monitoring, including seismic. To estimate measured changes significance one must define criteria that allow indicate presence of changes in physical-mechanical properties of studied rock-mass interval.

There were held analysis of measurement series, get in the process of surface waves monitoring studies on mine field hazardous area of flooded pit. Three-dimensional data massive containing S waves velocities analyzed with different approaches: 1. Integral estimation of single survey, for example velocity value median \bar{V}

all through the line with next $\bar{V}_i(t)$ chart plot. Defining velocity median in particular zones, which helps to control most dangerous areas. 2. Partitioning of massive $V(x,h,t)$ to one-dimensional curves set $V_{x,h}=f(t)$, each curve linear approximation, and plotting standard deviation distribution by cross-section. This distribution allows revealing areas with most unstable definition of measured parameter. 3. Linear approximation of each curve $V_{x,h}=f(t)$, defining slope coefficient $k_{x,h}$ and plotting distribution $k(x,h)$. This allows marking out zones with most intensive changes of velocities in cross-plot. 4. Averaging velocities by h coordinate and plotting space-time diagram $V(x,t)$. This way also may be used averaging velocities in defined depth interval and plotting diagrams of layerwise velocities changes.

Complex of introduced methods allows making a decision about time dependent changing of velocities in rock massive shallow part, what indicates by-turn presence of negative processes weakening massif strength properties. Besides of solving main task of the research there were defined connection between level of subsoil water and value of S wave velocities, coupling coefficient empirically determined.

Key words: Multiwave seismic, geophysical control, reflective waves, surface waves, monitoring, anthropogenic disaster, mining safety, statistical analysis.

REFERENCES

1. Sanfirov I. A., Yaroslavcev A.G., Nikiforova A.I., Baybakova T.V., Kalashnikova M.M., Shumakher A.I. [2012] Seismic explanation of engineering-geological researches on the anthropogenic disaster territories. *Geomodel 2012*, Gelendzhik, Russia. <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=58086>
2. Chugayev A.V., [2012] Multiwave Seismic Possibilities and Applications, *Saint Petersburg 2012*, Saint Petersburg, Russia. <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=57842>
3. Пузырев Н.Н. [2004] Methods and objects of seismic investigations. Introduction to general seismology / Edited by I.R. Obolentseva. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, Branch "Geo".
4. Венецкий И.Г., Кильдишев Г.С. [1975] Probability theory and mathematical statistics. Moscow, Russia.