

УДК 550.834

А.И. Бабкин, И.А. Санфи́ров

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ
ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ МЕТОДАМИ
ШАХТНОЙ СЕЙСМОАКУСТИКИ**

Представлены результаты шахтных сейсмоакустических исследований, проводимых для решения горно-технических задач: дистанционный прогноз физико-механических свойств горного массива; оперативный контроль состояния междукамерных целиков; мониторинг состояния затюбингового пространства шахтных стволов и др.

Ключевые слова: Шахтная сейсмоакустика, метод отраженных волн, метод сейсмического просвечивания, геофизический прогноз физико-механических свойств горного массива.

В настоящее время на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) преобладающую роль среди шахтных геофизических методов играют сейсмоакустические исследования. При изучении тонкослоистых сред, в сложных геологических условиях, характерных для калийных месторождений пластового типа, применяются высокоинформативные интерференционные системы регистрации в рамках методики общей глубинной точки (МОГТ). Геофизические наблюдения, проводимые в пределах шахтных полей ВКМКС, как на земной поверхности, так и во внутренних точках среды, осуществляются, в первую очередь, для контроля целостности водозащитной толщи (ВЗТ) и техногенного воздействия на горный массив в процессе его разработки. При проведении сейсмоакустических исследований в подземных условиях необходимо учитывать не только особенности геологического строения изучаемых толщ, но и множество горно-геологических, горнотехнических и технологических факторов.

Проводимые на ВКМКС шахтные сейсмоакустические исследования направлены на решение горно-геологических и горнотехнических задач, перечень которых представлен на рис. 1.

Для решения поставленных задач проектируются системы наблюдений в соответствии с частотным составом, скоростными характеристиками полей отраженных волн и требованиями методики многократных перекрытий с позиций получения заданной разрешающей способности, глубинности исследований и качественной избирательной селекции целевых волн [6]. При проведении исследований во внутренних точках среды возможно изучение горного массива в любых плоскостях с использованием волн различного класса и типа, что расширяет круг решаемых задач.

Из представленного на рис.1 перечня рассмотрим вопросы, касающиеся решения горнотехнических задач. К таковым в первую очередь относится параметрическое обеспечение геомеханических расчетов, проводимых для оценки прочностных



Рис. 1. Задачи, решаемые шахтной сейсмоакустикой на ВКМКС

свойств горного массива и динамики возможных его изменений под влиянием добычных работ. Точность данных расчетов во многом зависит от достоверности исходной расчетной модели среды, учитывающей реальную геологическую обстановку и прогнозные физико-механические свойства слагающих горных пород. Дистанционный прогноз физико-механических свойств горного массива возможен на основе многоволновой шахтной сейсмоакустики [5, 8]. На основе сейсмических исследований определяются параметр γ , представляющий собой отношение скоростей распространения поперечных и продольных волн $\gamma = V_S / V_P$, и коэффициент Пуассона $\sigma_{II} = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}$.

В качестве примера геофизического опережающего прогноза физико-механических свойств горных пород

ВЗТ приведем результаты многоволновых наблюдений МОГТ в горных выработках калийного рудника [5]. На представленных временных разрезах (рис. 2) выделен ряд отражающих горизонтов, приуроченных к акустически наиболее контрастным отражающим границам (ОГ). В процессе решения обратной задачи для обоих типов волн отмечены незначительные расхождения структурных построений, укладывающиеся в пределы разрешающей способности метода.

Неоспоримым преимуществом используемых в МОГТ интерференционных систем наблюдений является их высокая информативность, в том числе в определении скоростных параметров отраженных волн (рис. 3). В общем случае, их распределение характеризуется отчетливой слоистой структурой, в пределах которой выделяются локальные участки как понижения, так и повышения значений

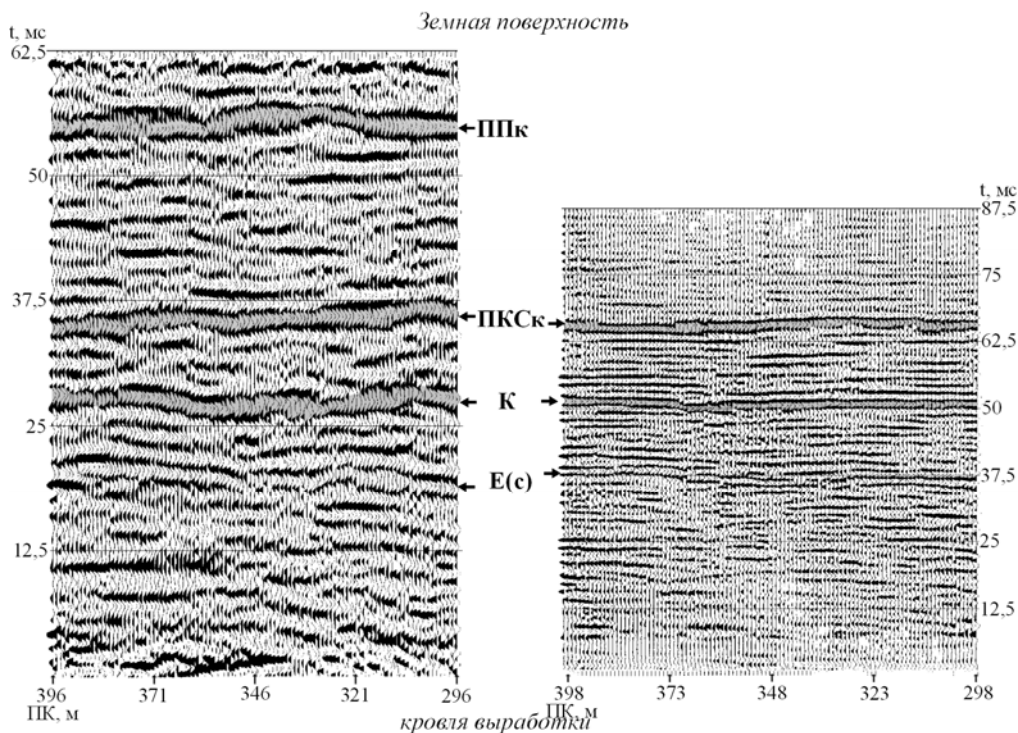


Рис. 2. Временные разрезы МОГ для P-волн (а) и S-волн (б)

скоростей. Положительная аномалия в пределах ОГ «E(c)» и «ПКСк», отмеченная на скоростной характеристике поперечных волн, совпадает с областью понижения скоростей продольных волн.

Наиболее наглядна выделенная область в пересчете в физико-механические параметры (рис.4). Разрезы параметра γ и коэффициента Пуассона σ отражают выдержанное слоистое строение по всему профилю с устойчивой аномалией в его центре. Коэффициент Пуассона весьма чувствителен к изменению литологических свойств геологической среды. Анализ особенностей распространения σ позволяет предположить наличие в интервале соляной толщи «E – ПКСк» на участке пикетов 330-370 зоны, неблагоприятной для распространения продольных волн. Возмож-

ные причины тому – газо-насыщение или повышенная трещиноватость.

Достоинства многоволновой сейсмоакустики при дистанционном прогнозе физико-механических параметров геологической среды в условиях горных выработок могут успешно использоваться в решении задач оперативного контроля состояния междукамерных целиков (МКЦ) [7]. Одной из них является прогноз остаточного срока службы МКЦ, основанный на информации об ослаблении прочностных свойств пород в приконтурной части целика [3].

Основной причиной возникновения закономерностей в распределении параметров, характеризующих свойства пород вокруг выработки после ее проходки, является перераспределение горного давления в массиве (рис.5) [4].

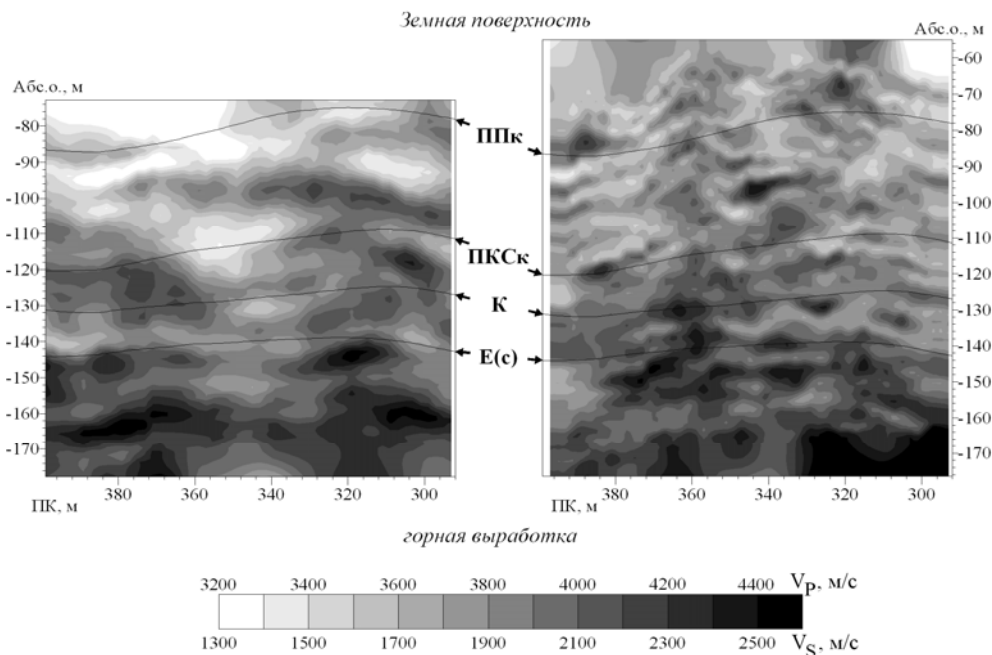


Рис. 3. Распределение скоростных характеристик P-волн (а) и S-волн (б).

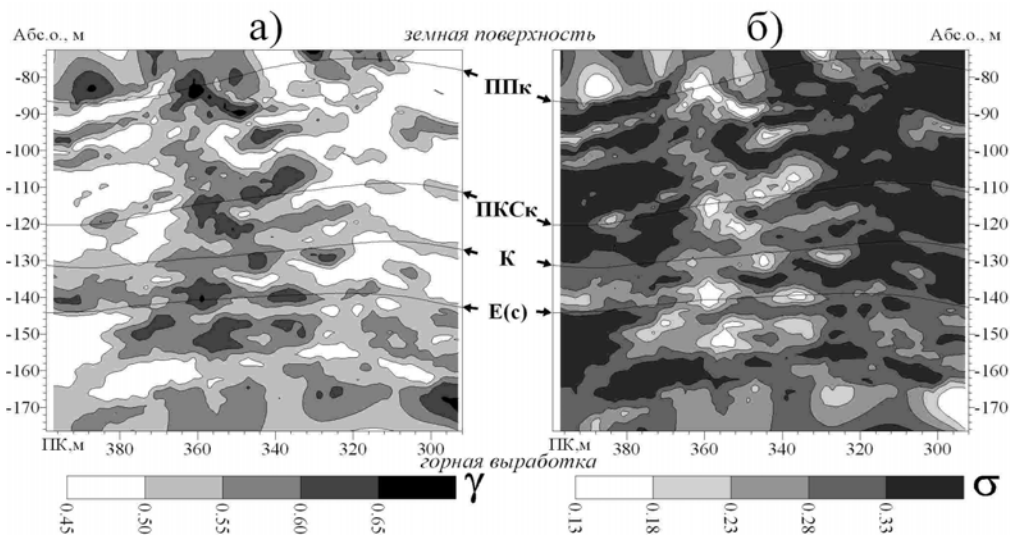


Рис. 4. Разрезы распределения параметра γ (а) и коэффициента Пуассона σ .

Область массива, не попадающая под влияние горных работ (5), находится в состоянии упруго напряженного равновесия. По направлению к границам выработки ее сменяет зона пригрузки (4) с повышенными

напряжениями, далее у стенок выработки зона разгрузки (3) с низкими напряжениями и ослабленными породами и зона максимальной нарушенности приконтурной части массива (2). Положение границ перечислен-

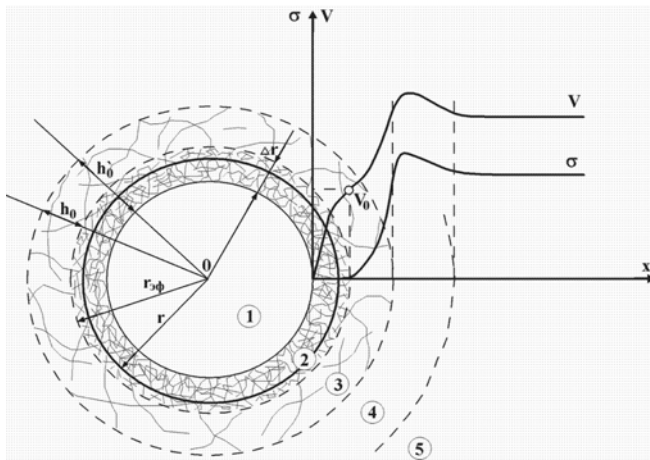


Рис. 5. Выделение зон различных напряжений в окрестности горной выработки по данным сейсмоакустических измерений (Савич Р.П., Коптев В.И., 1981г.). 1 – Полость выработки; 2 – зона интенсивного нарушения пород; 3 – ослабленная зона (разгрузки напряжений); 4 – зона повышенных напряжений; 5 – неизменная часть массива; r – радиус выработки; $r_{эф}$ – эффективный радиус выработки; Δr – радиальная деформация стенок выработки; h'_0 – суммарная мощность зоны нарушенных и ослабленных пород; h_0 – мощность зоны ослабленных пород

ных зон и дифференциация значений скоростей на них зависят от свойств пород массива, размеров и возраста выработок, величины естественных напряжений [3].

В качестве примера оперативно-го контроля состояния МКЦ для оценки его остаточного срока службы приведем результаты многоволновых наблюдений в горизонтальной плоскости тела целика. Наблюдения проводились методом сейсмического просвечивания отраженными волнами с использованием систем наблюдений многократного перекрытия. Необходимость изучения объектов с детальностью менее одного метра предопределяет проведение исследований в акустическом диапазоне частот. Минимальные размеры выделяемых неоднородностей при этом составляют 0,15 – 0,2

метра. В целом отмечается понижение скоростей в приконтурной части целика. Скоростная дифференциация продольных волн $\approx 15\%$ от максимального значения, а для поперечных волн достигает $\approx 35\%$. По результатам определения скоростных характеристик Р- и S-волн строятся распределения γ в целиках (рис. 6). Основной и очень важной с методической точки зрения особенностью данного распределения является концентрация низких значений γ в пределах зон нарушенности приконтурных частей целика, обусловленная их повышенной влагонасыщенностью.

Полученные сейсмоакустические данные, характеризующие качественные изменения скоростных свойств горных пород в пределах МКЦ, в дальнейшем используются для геомеханических прогнозных оценок прочностных свойств исследуемого массива по следующей технологической схеме: Инструментальными прямыми методами оценки физико-механических свойств массива производятся точечные измерения в горных выработках, в пределах которых также проводятся сейсмоакустические наблюдения [7]. При условии нахождения устойчивых зависимостей изменения скоростных характеристик с данными инструментальных измерений, возможна прогнозная оценка физико-механических свойств горного массива между точками измерений в пределах всего объема просвечиваемого целика [1].

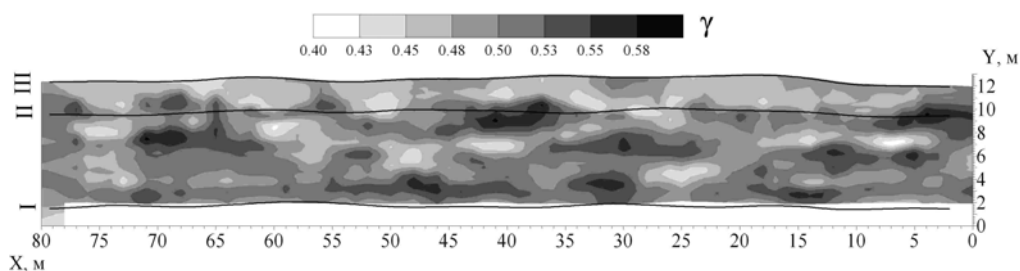


Рис. 6. Распределение параметра γ в горизонтальной плоскости МКЦ: I – Граница ближней зоны влияния выработки; II - граница дальней зоны влияния выработки; III – стенка противоположной выработки

Шахтные сейсмоакустические исследования, проводимые в горизонтальной плоскости межштрекового пространства не ограничиваются решением задач, связанных с параметрическим обеспечением геомеханических расчетов. Контроль состояния горнотехнических конструкций – еще одна важная задача, для решения которой могут применяться шахтные сейсмоакустические методы исследований. В качестве примера геофизического контроля техногенного влияния на конструктивные элементы горного массива представим результаты еще одного сейсмического просвечивания МКЦ. Наблюдения проводились на месторождении гипса, разрабатываемом подземным способом. Задача состояла в оценке степени и объема предполагаемого размыва гипсового массива, в месте аварийной восстающей подземной скважины (рис.7).

В процессе реализации наблюдений проведено сейсмоакустическое просвечивание отраженными волнами по сети горизонтально и вертикально расположенных профильных линий на долевой и торцевой стенках МКЦ. При интерпретации полученных сейсмоакустических данных оценивалось проявление неоднородностей горного массива в параметрах регистрируемых волновых полей. А именно рас-

пределение anomalно низких значений эффективных скоростей в плоскости просвечивания, наличие участков интенсивной дифракции сейсмических волн, изменения спектральной составляющей регистрируемых сигналов. Выделенные аномалии временных разрезов имеют пространственную и временную привязку, перерасчет которых в пространственные координаты исследуемого МКЦ позволил получить интерпретационную нормированную модель нарушенности целика (рис.8).

С помощью геофизических методов контроля возможно решение еще одной важной горно-технической задачи – проведение мониторинга состояния затюбингового пространства шахтных стволов. В условиях тюбинговой крепи по очевидным причинам возможно применение только сейсмоакустических методов исследований. Требуемая при этом глубинность и детальность предопределяет использование акустического диапазона частот. Наибольшая информативность акустических методов достигается также в рамках методики общей глубинной точки за счет многократности наблюдений, эффективной пространственной обработки и скоростного анализа отраженных волн [2]. Физическими предпосылками к возможности применения традиционных

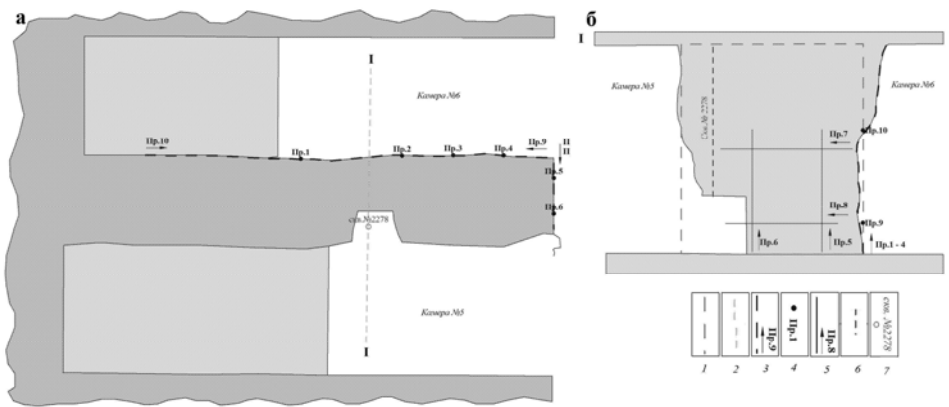


Рис. 7. Обзорная схема сейсмоакустических исследований МКЦ: А) в плане; б) в разрезе по линии I-I: 1 - Проектный контур целика; 2 – линия разреза; 3 – проекция профиля горизонтального в плане и вертикального в разрезе; 4 – проекция профиля вертикального в плане и горизонтального в разрезе; 5 – линия профиля на торцевой части целика; 6, 7 – положение восстающей скважины

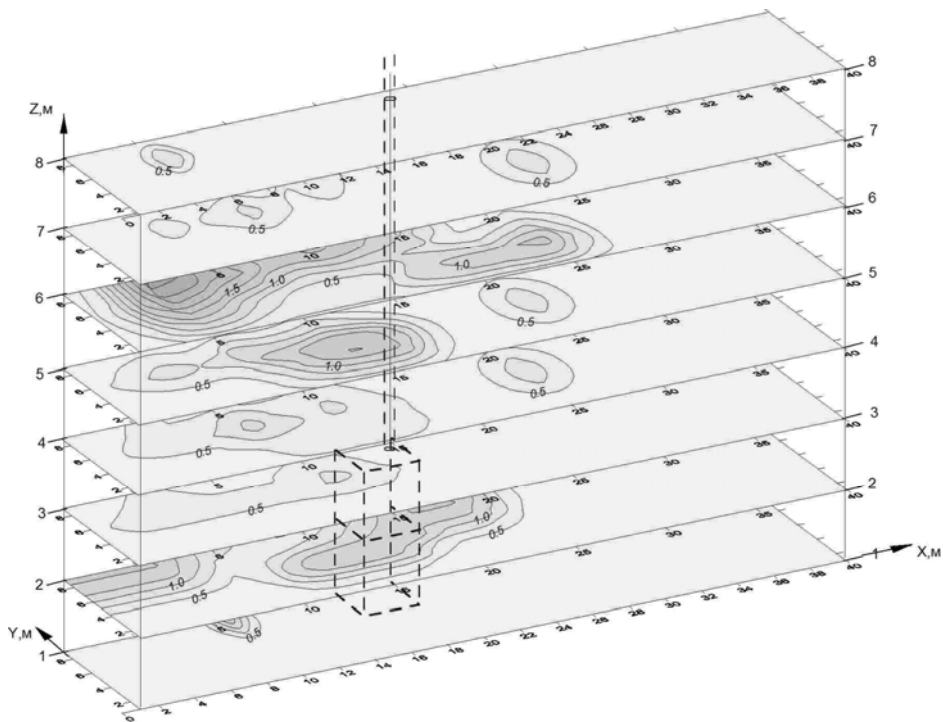


Рис. 8. Схема внутренней нарушенности целика

сейсморазведочных подходов в акустическом диапазоне частот служит физико-геологическая модель строе-

ния шахтного ствола в горизонтальной плоскости – тубинг, цементное кольцо, породный массив.

Процесс интерпретации полученных данных подразумевает проведение качественного и количественного анализа. Первый проводится на основе изучения особенностей рисунка волновой картины, пространственно-временного распределения интенсивности и когерентности суммарных сейсмозаписей. Второй – с использованием расчетных количественных значений различных атрибутов акустических сигналов. И тот и другой анализ базируется на взаимной связи рассматриваемых параметров со строением изучаемого массива.

Представленные горнотехнические приложения сейсморазведочных исследований используются сегодня на всех рудниках ВКМКС и могут быть адаптированы к любым подземным разработкам месторождений полезных ископаемых при условии акустической контрастности слагающих их разрез горных пород. Возрастающая потребность в использовании геофизических методов контроля состояния разрабатываемого массива на ВКМКС продиктована все более жесткими требованиями к безопасности горного производства в условиях его интенсификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин А.И., Ахматов А.Е. Согласование натуральных и лабораторных сейсморазведочных оценок напряженно-деформированного состояния массива / Горный информационно-аналитический бюллетень. -2006. -№6. С.100-105.
2. Бабкин А.И., Санфиоров И.А. Геофизический мониторинг затюбингового пространства / Горный информационно-аналитический бюллетень. -2011. -№1.
3. Барях А.А., Асанов В.А., Токсаров В.Н., и др. К оценке остаточного срока службы соляных междокамерных целиков / Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. -1998. -№1.
4. Савич Р.П., Коптев В.И. Изучение напряженного состояния массивов скальных пород сейсмическими методами в связи со строительством подземных гидротехнических сооружений // Труды «Гидропроекта»; Вып.78. –М.: Энергия, 1981. С.42-65.
5. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Сальников А.П. Контроль состояния горного массива методами многоволновой шахтной сейсморазведки / Горный вестник. -1998. -№6. С.94-99.
6. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. Екатеринбург: УрО РАН, 1996г. -167с.
7. Barykh A., Safirov I., Asanov V., Babkin A., Toksarov V., Geghin A., Bruev A. Tool checking of salt pillars state for prediction of their residual time working. Mining Geotechnics and Underground Building at the Beginning of the 21st Century (24th Winter School of Rock Mechanics) 12-16 march 2001. Scientific Papers of the Institute of Geotechnics and Hydrotechnics of the Wroclaw University of Technology. No. 73
8. Sanfirov I., Babkin A., Lisin V. Multicomponent subsurface seismic for the evaluation of salt petrophysics. Extended abstracts book. EAGE 64th Conference & Exhibition – Florence, Italy, 27 – 30 May 2002. European Association of Geoscientists & Engineers, 2002. **EAGE**

Коротко об авторах

Бабкин Андрей Иванович – кандидат технических наук, Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, e-mail: aib@mi-perm.ru

Санфиоров Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор, Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, e-mail: sanf@mi-perm.ru