

УДК 550.832.9:622.245.542

Михаэль Альбрехт

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ СКВАЖИНЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СДВИГОВОГО СМЕСТИТЕЛЯ

Гидравлический разрыв при создании подземных резервуаров в трещиноватых структурах вызывает возникновение трещин сдвига. В статье рассмотрен новый метод определения параметров плоскостей сместителей за счет регистрации сейсмических волн, как непосредственно приходящих от него на сеймоприемник в нагнетательной скважине, так и образующихся в ней при воздействии таких волн на ее стенки, так называемых скважинных волн. Это дает повышение разрешающей способности при определении параметров образующихся трещин, что позволяет оптимизировать разработку и создание таких резервуаров.

Ключевые слова: гидроразрыв, скважина, сейсмический мониторинг, срезывающая трещина, поверхность сместителя, скважинные волны, дисперсия.

Семинар № 3

Создание резервуаров с помощью гидравлического разрыва может быть улучшено на основе детальной информации о них и об эффективности воздействия. Гидравлический разрыв среди прочего вызывает возникновение трещин сдвига, местоположение которых можно определить различными классическими методами. Нахождение соответствующей плоскости сместителя требует обширного охвата области воздействия сейсмоприемниками. Помимо соответствующих затрат на создание такой сети мониторинга, большие расстояния между сейсмоприемниками и нагнетательной скважиной приводят к тому, что большинство разрывов остаются вне наблюдения. Информация попросту теряется. Только использование сейсмических данных, полученных путем измерений в нагнетательной скважине, дает информацию высокого пространственного разрешения о резервуаре. С то же время преимущества такой информации не ис-

пользуются при существующей характеристике резервуаров. В настоящей статье описывается метод, позволяющий определять положение поверхности сместителя для срезывающих трещин только по регистрации упругих волн внутри стимулирующей скважины.

1. Скважинные волны, генерируемые при сдвиге

Генерация вызванной сейсмичности при создании резервуара с помощью гидравлического разрыва может наблюдаться посредством скважинного зонда внутри нагнетательной скважины, как описано в [1]. Положение зонда вблизи зоны разрыва позволяет регистрировать как поперечные трещины сдвига, так и продольные трещины отрыва. Согласно Хаяши (Hayashi K. [2]) регистрируемые продольные разрывы имеют сейсмическую интенсивность в 10^{-3} - 10^{-4} раз меньше интенсивности трещин сдвига. Это подтверждается наблюдениями Пирсона (Pearson C. [3]), Кэша (CashD. и др. [4]), Каеды (Kaieda H. [5]),

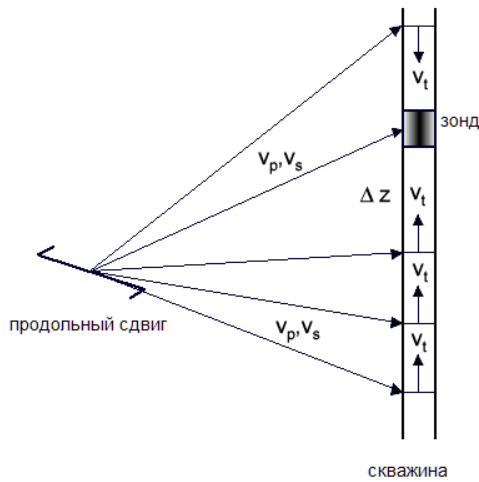


Рис. 1. Воздействие на скважину упругих волн, излучаемых трещиной сдвига и анализ их отдельных компонентов, регистрируемых скважинным зондом

Хауса (House L. и др. [6]), Талеби (Talebi S. и др. [7]), Фелера (Fehler и др. [8, 9]) и Уиллса (Wills и др. [10]). Можно предположить, что при своем образовании продольные разрывы соединяются с зонами, ослабленными естественными трещинами, приводя к большему падению напряжений вдоль существующих поверхностей сдвига.

Как показано на рис. 1, происходит не только излучение волны от трещины прямо по направлению к скважинному зонду, но также следует принимать во внимание и воздействие упругих волн на стенку скважины под воображаемым углом 180° к ее оси. Такое воздействие сейсмической волны на стенку скважины вызывает радиальное смещение u_r стенки [1]. Это смещение создает поршнеобразный источник волны. Когда исследуется трещина вблизи скважины, ее воздействие на стенку скважины под широким спектром углов приводит к интегральному росту волн в скважине.

192

Согласно Уайту (White J. E., [11]), это приводит к колебанию скорости, что описывается уравнением (1) при глубине сейсмоприемника z_s .

$$v(t, z_s) = \frac{1}{b} \left\{ \int_{z_o}^{z_s} \left[\frac{\partial u_r}{\partial t}(t, z) \right] dz - \int_{z_s}^0 \left[\frac{\partial u_r}{\partial t}(t, z) \right] dz \right\}, \quad (1)$$

где z_s - глубина сейсмоприемника; z_o - максимальная глубина скважины; $u_r(t, z)$ - радиальное смещение стенки скважины

Согласно уравнению (2) радиальное смещение стенки скважины определяется геометрической функцией $\Pi(z)$, функцией Грина для скважины $G(f, z)$, а также радиальным напряжением $P_r(t)$, представленными уравнениями (3), (4), (5) [12] соответственно:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t}(t, z) = \Pi(z) \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \cdot P_r \odot(f) e^{i2\pi ft} df, \quad (2)$$

$$\Pi(z) = \frac{b}{2\mu} \left[1 - 2 \left(\frac{v_s}{v_p} \cos \gamma(z) \right)^2 \right], \quad (3)$$

где $\gamma(z)$ - угол падения сейсмической волны по отношению к скважине;

$$G(f, z) = e^{-\left(i \frac{2\pi f}{c_r(f)} + \alpha_r(f) \right) |z - z_o|}, \quad (4)$$

$$P_r(t) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r(t)}{\partial r} + 2\lambda \frac{u_r}{r} + \frac{\lambda}{r} \times \left(\frac{\partial u_v}{\partial v} + \frac{1}{\sin v} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \cot v \cdot v \right) \quad (5)$$

Чтобы рассчитать поле дальней зоны, обусловленное образованием трещины сдвига, геометрически плоскость сдвига описывается, как показано на рис. 2, с помощью падения δ , простираения ϕ_s и направления скольжения λ на поверхности разрыва. Направление излучения сейсмического луча задается азимутом ϕ и амплитудой η [13].

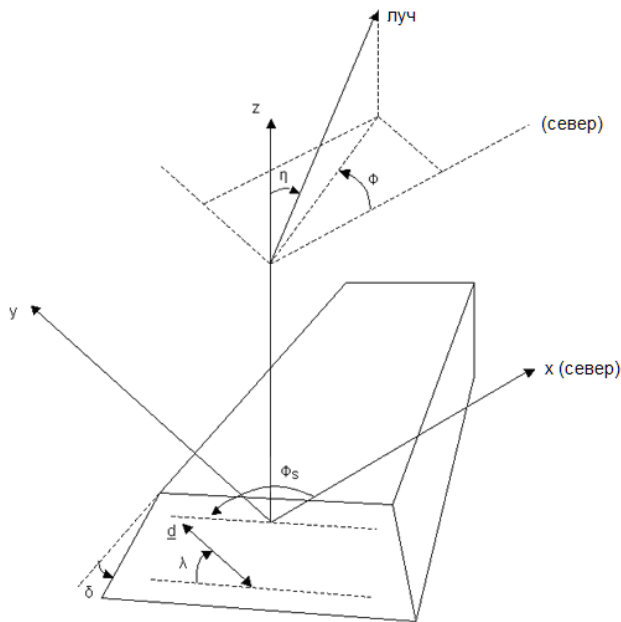


Рис. 2. Геометрическая схема разрыва, иллюстрирующая падение δ , простирание ϕ_s и скольжение λ поверхности разрыва, а также описание направления сейсмического луча с помощью азимута ϕ и амплитуды η

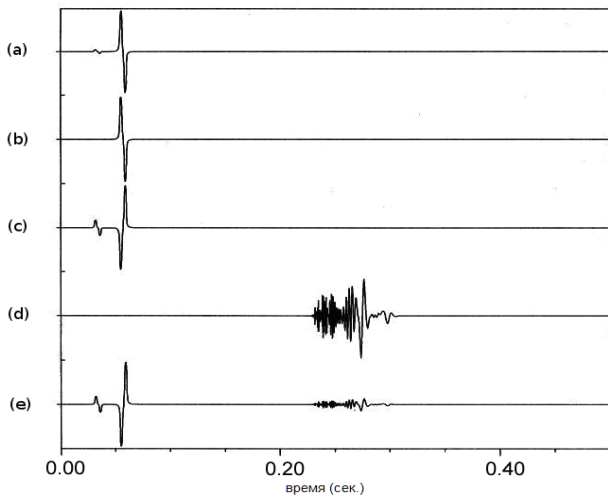


Рис. 3. Сейсмическая регистрация, обусловленная геометрией, заданной на рис. 2; (a) - (c) прямые P и S волны; (d) - чистая элементарная волна, распространяющаяся в скважине; (e) - суперпозиция волн (c) и (d) для компоненты скважинного зонда, параллельной оси скважины (компонента z)

Введенные выше параметры приводят к следующей характеристике излучения $F^P(\delta, \phi_s, \lambda, \phi, \eta)$,

$$F^{SV}(\delta, \phi_s, \lambda, \phi, \eta) \quad \text{и} \quad F^{SH}(\delta, \phi_s, \lambda, \phi, \eta), \quad \text{описанной Аки и Ричардсом [13] для смещения поля дальней зоны в полярных координатах (см. уравнения 6 - 8).}$$

$$u_r = \frac{F^P(\delta, \phi_s, \lambda, \phi, \eta)}{4\pi\rho v_p^3 r} \times \quad (6)$$

$$\times M \circledast \left(t - \frac{r}{v_p}\right)$$

$$u_v = \frac{F^{SV}(\delta, \phi_s, \lambda, \phi, \eta)}{4\pi\rho v_s^3 r} \times \quad (7)$$

$$\times M \circledast \left(t - \frac{r}{v_s}\right)$$

$$u_\phi = \frac{F^{SH}(\delta, \phi_s, \lambda, \phi, \eta)}{4\pi\rho v_s^3 r} \times \quad (8)$$

$$\times M \circledast \left(t - \frac{r}{v_s}\right)$$

Согласно уравнению (19) в [1], ниже рассматривается элементарная волна, распространяющаяся в скважине и генерируемая сейсмической волной от сдвига (простирание 270° , падение 15°). Источник элементарной волны находится на двести метров ниже скважинного зонда.

По сравнению с прямыми сейсмическими P и S волнами, элементарная волна, которая приходит с наибольшей задержкой, обнаруживает высокую дисперсию и существенно меньшие амплитуды (рис. 3, d, e).

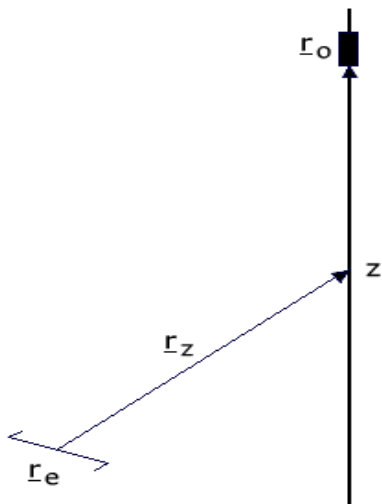


Рис. 4. Схема генерации элементарной волны, распространяющейся в скважине, при возникновении сдвиговой трещины

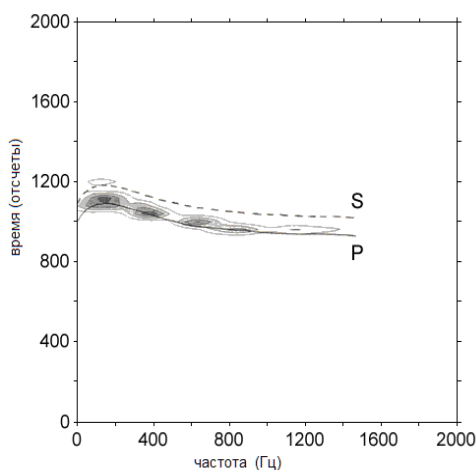


Рис. 5. Дисперсионный анализ элементарной волны, распространяющейся в скважине, показывающий разделение *P* и *S* волн, что отвечает кинематическому подходу

Анализ геометрической схемы, изображенной на рис. 4, приводит к необходимости рассмотрения времени пробега для *P* и *S* волн в зави-

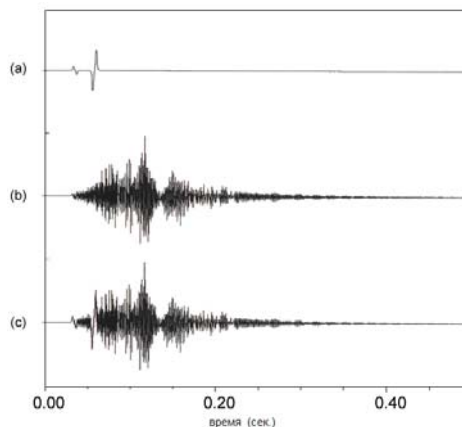


Рис. 6. Типы сейсмических волн, слагающих компоненту *z*, рассчитанных в соответствии с геометрической схемой, заданной на рис. 4: *a* - прямые волны; *b* - волны, распространяющиеся в скважине; *c* - суперпозиция волн *a* и *b*

симости от частоты, как показано в уравнениях (9) и (10).

$$t_p(\omega) = \frac{r_z}{v_p} + \frac{|z - r_{0,z}|}{u_T(\omega)} \quad (9)$$

$$t_s(\omega) = \frac{r_z}{v_s} + \frac{|z - r_{0,z}|}{u_T(\omega)} \quad (10)$$

Дисперсионный анализ кривых, приведенных на рис. 3, *d*, показывает четкое разделение компонент *P* и *S* волн, которое согласуется с кинематическим анализом времени пробега в зависимости от частоты в соответствии с уравнениями (9) и (10), результаты которого представлены на рис. 5.

Объединение всех элементарных волн согласно уравнению (1) выражается в сейсмограмме, зарегистрированной скважинным зондом. На рис. 6 показаны сейсмические компоненты *z*, генерируемая прямой волной (рис. 6, *a*), волной, распространяющейся в скважине (рис. 6, *b*), а также суперпозиция обоих типов волн (рис. 6, *c*).

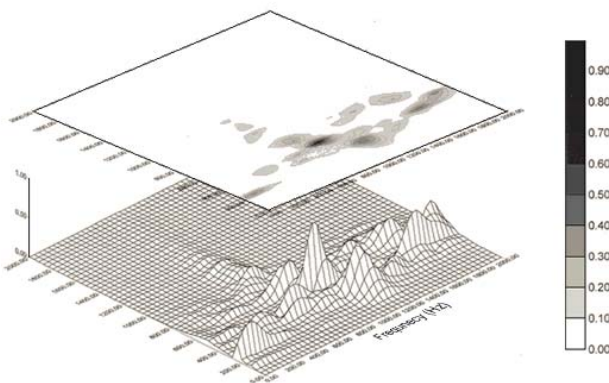


Рис. 7. Дисперсионный анализ волны, показанной на рис. 6, с, распространяющейся в скважине

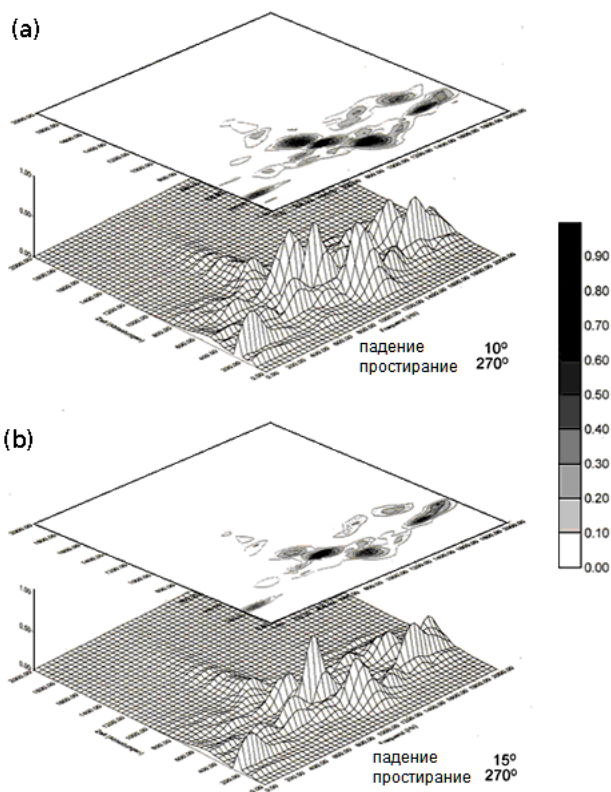


Рис. 8. Дисперсионный анализ скважинной волны при падении 10° (а) и 15° (b) и простираении 270°

Нормированный дисперсионный анализ скважинной волны (рис. 7) четко показывает максимумы и обусловленное дисперсией разделение между волнами, распространяющимися в скважине, и прямыми волнами.

2. Нахождение ориентации поверхности трещины сдвига с помощью анализа скважинных волн

Амплитуда элементарных волн, зависящая от глубины, определяется ориентацией разрыва благодаря характеристике его излучения. Согласно рис. 2 ориентация трещины задается падением δ и направлением простираения ϕ_s поверхности разрыва.

На рис. 8, а и 8, b проведено сравнение между регистрируемыми сигналами для углов падения 10° и 15° при одном и том же направлении простираения, равном 270°. Выполнение нормированного дисперсионного анализа показывает явное изменение амплитуды в отдельных частотных диапазонах. Таким образом, анализ нормированных спектральных амплитуд позволяет определить величину падения поверхности разрыва.

Варьирование азимута разрыва не проявляется сколь-нибудь значительно в нормированных спектральных амплитудах, что следует

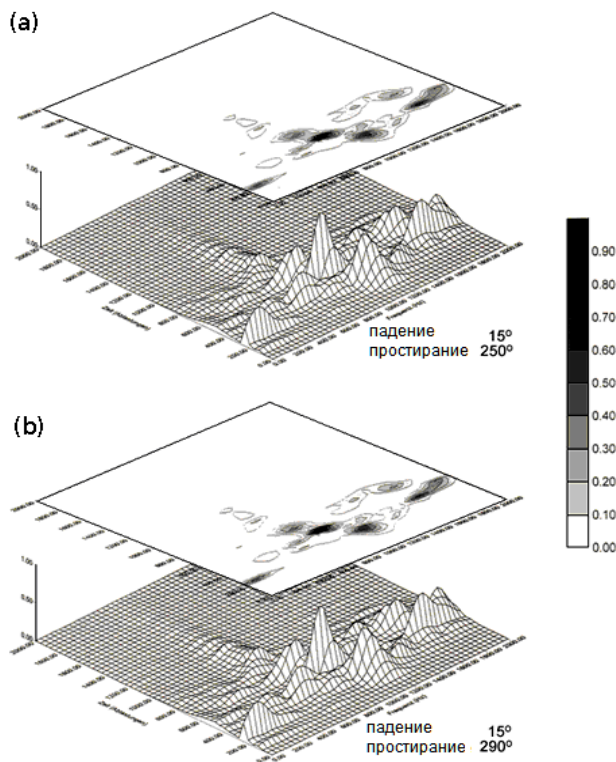


Рис. 9. Дисперсионный анализ скважинной волны при падении 15° и простирании 250° (a) и 290° (b)

из сравнения соответствующих поверхностей на рис. 9, a и рис. 9, b. Явные различия отсутствуют.

Поэтому можно заключить, что нормированный дисперсионный анализ скважинных волн позволяет определять падение, однако не позволяет определять направление простирания поверхности разрыва.

Выводы

Трещины сдвига, вызванные гидравлическим разрывом, порождают волны, которые распространяются в скважине. Будучи зарегистрированными зондом внутри скважины, эти волны обнаруживают дисперсионный характер. Нормированный дисперсионный анализ позволяет определять падение соответствующей срезывающей трещины. Предложенный метод определения падения трещины позволяет на шаг ближе подойти к высококоразрешающему изображению подземных резервуаров, создаваемых с по-

мощью гидроразрыва скважин, с тем, чтобы оптимизировать их эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Albrecht M., Mansurov V.* Determination of porosity and permeability out of dispersion analyses of borhole wall displacements, 2004 EuroConference on Rock Physics and Geomechanics, Potsdam, 2004.
2. *Hayashi K.* Personal note from H. Niitsuma, Tohoku University, 1992.
3. *Pearson C.* The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks, *Journal of Geophysical Research*, 86, B9, pp. 7855-7864, 1981.
4. *Cash D., Homuth E., Keppler H., Pearson C., Sasaki S.* Fault plane solutions

- for microearthquakes induced at the Fenton Hill hot dry rock geothermal site: implications for the state of stress near a quaternary volcanic center, *Geophys. Res. Letts.*, 10, pp. 1141-1144, 1983.
5. *Kaieda H.* Hypocenter distribution and fault plane solutions of microearthquakes induced by hydraulic fracturing as determined by observations from a surface seismic network, *EOS Trans. Am. geophys. Un.*, 65, p.1011, 1984.
6. *House L., Keppler H., Kaieda H.* Seismic studies of a massive hydraulic fracturing experiment, *Trans. Geotherm. Res. Council*, 9, II, pp. 105-110, 1985.

7. Talebi S., Cornet F. H., Martel L. Seismoacoustic activity generated by fluid injections in a granitic rock mass, Proceedings fourth conference on Acoustic Emission/Microseismic activity in geologic structures and materials, Series in rock and soil mechanics, Trans Tech Publications, 17, pp. 491-509, 1985.

8. Fehler M. Stress control of seismicity patterns observed during hydraulic fracturing experiments at the Fenton Hill hot dry rock geothermal energy site, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, 3/4, pp. 211-219, 1989.

9. Fehler M., House L., Kaieda H. Determining planes along which earthquakes occur: method and application to earthquakes accompanying hydraulic

fracturing, J. Geophys. Res., 92, pp. 9407-9414, 1987.

10. Wills P. B., De Martini D. C., Vinegar H. J., Shlyapobersky J. Active and passive imaging of hydraulic fractures, Geophysics: The Leading Edge of Exploration, pp. 15-22, 1992.

11. White J. E. Underground sound - Application of seismic waves, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, ISBN 0-444-42139-4, 1983.

12. Müller G. Theorie elastischer Wellen, Lecture, Institute of Meteorology and Geophysics, University of Frankfurt, 1990.

13. Aki K., Richards P. G. Quantitative seismology - theory and methods, 1, Freeman and Company, ISBN 0-7167-1058-7, 1980. **ИДБ**

Коротко об авторе

Михаэль Альбрехт (Michael Albrecht) – президент фирмы TBA Power Inc.
Salt Lake City, Utah 84121, USA
E-mail: michael.albrecht@tbapower.com



ОТДЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ ПРЕПРИНТ

Левкин Ю.М.

МАРКШЕЙДЕРСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ВТОРИЧНОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. — 2009. — №10, —402 с. — М: издательство «Горная книга» ISSN 0236-1493

Рассмотрены технологии автоматизации маркшейдерского мониторинга при проектировании и эксплуатации угольных шахт. Основное внимание уделено мониторингу при обезвреживании и ликвидации отходов вторичного производства. Дан сравнительный анализ российских технологий и технологий, применяемых в США.

Для специалистов горного производства, может быть использована в горном образовании.

Levkin J.M.

MINE SURVEYOR MONITORING OF UNDERGROUND SPACE OF SECONDARY MULTIPURPOSE USE OF COAL MINES

There are considered the technologies of mine surveyor monitoring automation at designing and operation of coal mines. The main attention is given to monitoring by neutralization and liquidation of secondary manufacture waste. It is given the comparative analysis of the Russian technologies and the technologies applied in the USA.

For experts of mining production, can be used in mining education.