

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.35.57.005

УДК 550.834.05

© Е.А. Уткаев, С.В. Соколов, М.А Таюрский, 2023

Е.А. УТКАЕВ

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: utkaev@mail.ru

С.В. СОКОЛОВ

канд. техн. наук,
научный сотрудник
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: sokolovsviuu@bk.ru

М.А. ТАЮРСКИЙ

ведущий инженер
ИУ ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: voutling@mail.ru

МОНИТОРИНГ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГЛЕПОРОДНЫЙ МАССИВ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ШАХТ

В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности направленного гидровоздействия на труднообрушаемую основную кровлю выемочных участков действующих угольных шахт. Для решения поставленной задачи предложено применение геофизического мониторинга на различных этапах гидроразрыва. Описан опыт применения сейсмического просвечивания для оценки геомеханического состояния кровли до и после ее разупрочнения. Представлены полученные результаты интерпретации сейсморазведочных данных. Предложен подход к оценке эффективности выполненных мероприятий по направленному гидроразрыву кровли.

Ключевые слова: НАПРАВЛЕННЫЙ ГИДРОРАЗРЫВ, СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ, ДОБЫЧА УГЛЯ, ТРУДНООБРУШАЕМАЯ КРОВЛЯ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ВОЛНА, ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ.

Наличие труднообрушаемой кровли в теле отработываемого выемочного столба является фактором, осложняющим процесс угледобычи [1, 2]. Зависание протяженных консолей основной кровли, представленных прочными, монолитными породами, само по себе активизирует негативные процессы, связанные с перераспределением горного давления в массиве горных пород, а их последующее неконтролируемое обрушение может являться причиной возникновения динами-

ческих явлений: выбросов угля, газа, горных ударов [3]. Направленный гидроразрыв является методом, способным снизить негативный эффект воздействия труднообрушаемой кровли, успешно применяется, в том числе на угольных шахтах Кузбасса [2]. Особенность метода заключается в формировании в кровле на основе закачивания жидкости разрыва направленных искусственных трещин, обеспечивающих ее расчленение на отдельные блоки [3–6].

Эффективность мероприятий по направленному гидроразрыву кровли во многом зависит от схемы его проведения, которая, в свою очередь, разрабатывается с учетом комплекса действующих горно-геологических условий [4–8]. Основным источником горно-геологической информации в этом случае являются разрезы по разведочным скважинам и оконтуривающим выработкам [3, 4]. При этом данные о строении и состоянии породных слоев значительной части выемочного столба отсутствуют [9].

Сейсмическое просвечивание — геофизический метод исследования углепородного массива, основанный на анализе характера прохождения в нем упругих сейсмических волн, скорость которых находится в зависимости от физико-механических свойств слагающих его горных пород [9, 10, 11]. Измерения выполняются в параллельных друг другу горных выработках выемочных столбов, в одной из которых осуществляется возбуждение, а во второй регистрация сейсмических волн, что позволяет оценить геомеханическое состояние на различных участках, залегающих между ними угольного пласта и пород кровли [9, 10]. Это свидетельствует о перспективности применения сейсмического просвечивания в качестве источника дополнения горно-геологической информации, используемой при разработке схемы проведения направленного гидроразрыва. Кроме того, определение геомеханического состояния породных слоев в теле выемочного столба в рамках его повторного сейсмического просвечивания после выполнения направленного гидроразрыва может, в результате сопоставления с первичной сейсморазведочной информацией, иллюстрировать эффективность проведенных мероприятий.

С учетом имеющегося опыта использования сейсмической томографии для информационного обеспечения процессов гидрододействия на углепородный массив [4, 9, 12, 13] коллективом ученых ФИЦ УУХ СО РАН проведены исследовательские работы по геофизическому мониторингу мероприятий по направленному гидроразрыву участков труд-

нообрушаемой кровли на опытном участке действующего выемочного столба угольной шахты Кузбасса. Исследования выполнены с целью систематизации полученных ранее результатов для последующего интегрирования работ по сейсмическому просвечиванию углепородного массива в комплекс мероприятий по направленному гидроразрыву кровли. В процессе сейсмических измерений использован следующий комплект аппаратуры: для регистрации данных — одноканальные автономные сейсмические регистраторы «Р-1» (1) с подключенными к ним геофонами GS-20DX (2); для возбуждения сигнала — механический ударный источник колебаний (кувалда) (рис. 1) [13, 14].



Рис. 1. Регистрирующее оборудование, применяемое для сейсмического просвечивания кровли: 1 — одноканальные автономные сейсмические регистраторы «Р-1»; 2 — геофон GS-20DX

В соответствии с разработанным планом исследований на первом этапе выполнено сейсмическое просвечивание углепородного массива в пределах опытного участка действующего выемочного столба до гидроразрыва. По результатам измерений определено геомеханическое состояние кровли, проведен анализ ее строения, оценены ее характеристики по устойчивости, управляемости и нагрузочным свойствам. На основе зарегистрированной информации построен горизонтальный геофизический разрез изменения скоростных характеристик в области активной кровли (рис. 2).

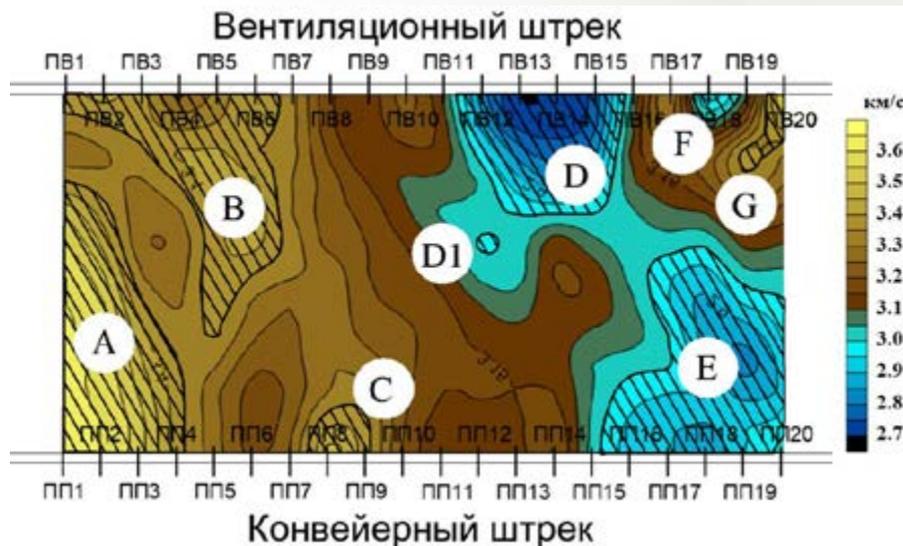


Рис. 2. Результаты сейсмического просвечивания активной кровли опытного участка до выполнения гидроразрыва

При определении геомеханического состояния активной кровли отмечена его неоднородность в пределах исследованной области. В соответствии со скоростными характеристиками состояние непосредственной кровли, преимущественно представленной породами алевролита, спрогнозировано как переходное между среднеустойчивой и неустойчивой, основная кровля, представленная переслаиванием алевролита и песаника, определена как среднеобрушающаяся. В пределах опытного участка выделено 8 характерных зон, характеризующихся контрастными изменениями скоростей распространения сейсмических волн, в площади которых предполагались изменения физико-механических параметров кровли.

Состояние зон снижения скоростей распространения сейсмических волн: D, D1, E, F — оценено как менее прочное, по сравнению с прочими зонами исследованной области, состояние пород активной кровли, вызванное, по всей вероятности более высокой ее трещиноватостью, обусловленной естественными геологическими факторами, действующими в площади выемочного столба. В пределах зон возрастания скоростей A, B, C, G спрогнозировано наличие более прочных пород активной кровли в напряженном относительно других участков состоянии. Характер взаимного расположения зон возрастания и

снижения скоростей распространения сейсмических зон в площади опытного участка свидетельствует о преобладании в активной кровле прочных пород. Также проявляющаяся системность регистрации зон A, B и C позволила сделать предположение о наличии участков труднообрушающейся основной кровли в интервале ПВ1-ПВ8 по линии вентиляционного штрэка, ПП1-ПП10 по линии конвейерного штрэка.

Полученные результаты интерпретации сейсмотомографического разреза активной кровли были использованы при разработке схемы направленного гидроразрыва. В рамках реализации схемы была запланирована сетка скважин направленного гидроразрыва, в одной из которых, расположенной в интервале ПП1, выполнены мероприятия по разгрузке массива.

На втором этапе исследования выполнено сейсмическое просвечивание углепородного массива в пределах опытного участка действующего выемочного столба после гидроразрыва. По результатам измерений выполнена оценка изменений геомеханического состояния углепородного массива. На основе зарегистрированной информации построен горизонтальный геофизический разрез изменения скоростных характеристик в области активной кровли после проведения направленного гидроразрыва (рис. 3).

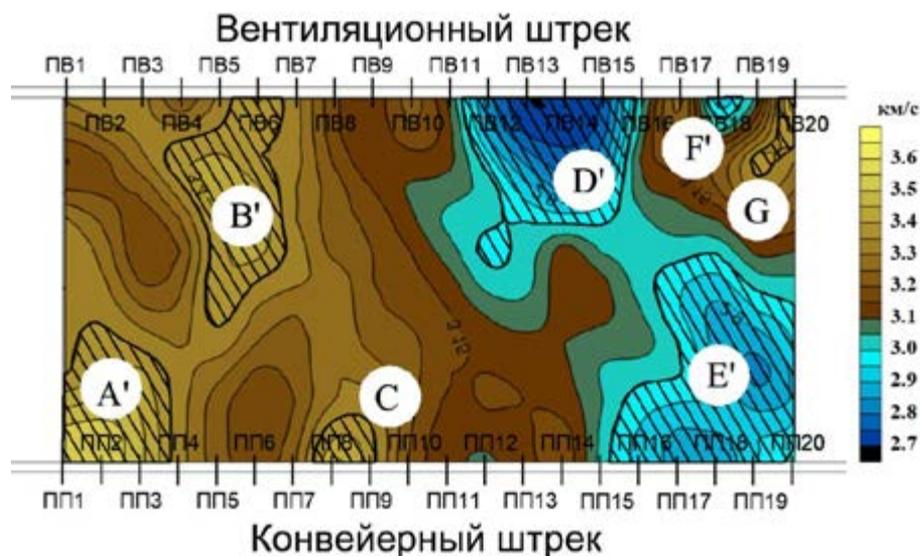


Рис. 3. Результаты сейсмического просвечивания активной кровли опытного участка после выполнения гидроразрыва

Распределение значений сейсмических характеристик в исследованной области выемочного столба в целом свидетельствует об их снижении. Установлено, что из 8 выделенных характерных зон контрастного изменения геомеханических характеристик зоны С и G выделяются отсутствием изменений площади распространения. Зоны повышенных сейсмических скоростей А и В в результате сокращения их общей площади трансформировались в зоны А' и В'. Отмечено увеличение общей площади зон снижения скоростей распространения сейсмических волн Е и F и их трансформация Е' и F'. Кроме того, определено, что изменение конфигурации системы зон снижения скоростей распространения сейсмических волн D-D1 привело к их слиянию в единую зону D'. Все вышеперечисленное охарактеризовано как следствие общей разгрузки кровли происшедшей с момента выполнения первого измерения.

Для определения численных значений ее разгрузки был введен расчетный безразмерный показатель, являющийся результатом развития, используемого в процессе выполненных ранее работ, направленных на информационное обеспечение процессов гидрододействия на углепородный массив, подхода, основанного на определении отношения ско-

ростей, фиксируемых в первом и втором измерениях [4]. Введенный показатель определяется отношением разницы скоростей распространения сейсмических волн, зафиксированных в измерениях, до и после гидроразрыва (V_n и V_{n+1}) к диапазону их возможного изменения ($\Delta V = V_{max} - V_{min}$):

$$\beta_V = \frac{V_n - V_{n+1}}{\Delta V} * 100. \quad (1)$$

При этом в расчете использованы скорости, определенные для каждого из N пикселей, на которые, в соответствии с параметрами измерительной схемы, разбит просвечиваемый участок выемочного столба из зависимости [14]:

$$t = \sum_{j=1}^N \frac{1}{V_j} d_{ij} \quad (2)$$

где d_{ij} — расстояние, пройденное лучем i ($i = \dots, n$) в пикселе j , а V_j — скорость распространения сейсмической волны в пикселе.

По результатам расчета предложенного показателя для различных точек активной кровли опытного участка построен горизонтальный геофизический разрез, характеризующий степень ее относительной разгрузки (рис. 4).

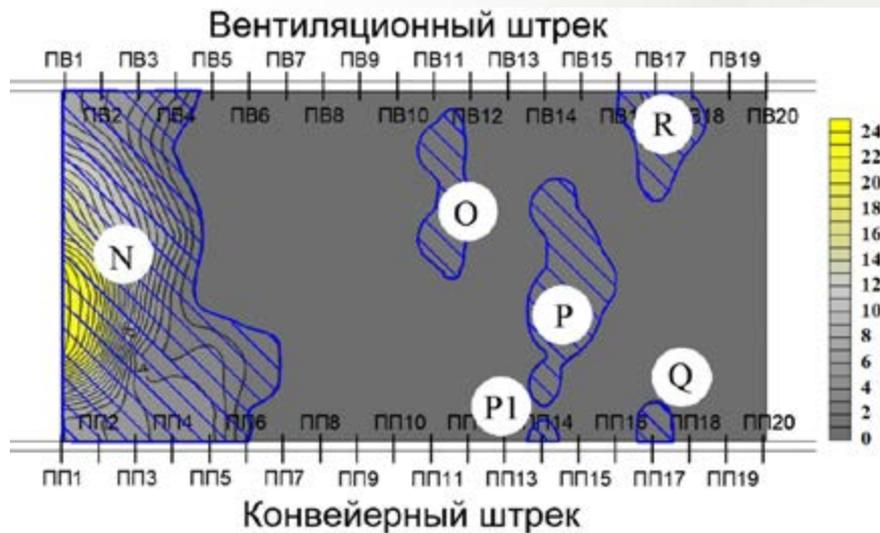


Рис. 4. Сейсмотомографический разрез, отражающий степень разгрузки активной кровли в пределах опытного участка

Результаты построений иллюстрируют, что наличие 6 зон выделяющихся изменением расчетного отношения, основной вывод, полученный в ходе сравнения скоростных разрезов активной кровли, зарегистрированных до и после гидроразрыва — в исследованной области выемочного столба значения скоростей распространения сейсмических волн в целом снизились. Взаимное расположение выделенных зон свидетельствует о наличии 2 центров разупрочнения активной кровли.

Первый, сформированный зонами O, P, P1, Q, R, расположенными в интервале пикетов ПВ10-ПВ19 по вентиляционному штреху — ПП13-ПП18 по конвейерному штреху характеризуется изменениями расчетного отношения в пределах 1-3. Соответственно, фиксируемая разгрузка определена как незначительная, вызванная, по всей вероятности, воздействием на углепородный массив участков пород с повышенной трещиноватостью, усиливающимся в результате выполнения горных работ и сопутствующих операций.

Второй, состоящий из одной протяженной зоны N, расположен в интервале пикетов ПВ1-ПВ5 по вентиляционному штреху — ПП1-ПП7 по конвейерному штреху характеризуется изменением расчетного отношения до 24, что говорит уже о значительной разгрузке кровли в данной области. При этом максимальная разгрузка зафиксирована в

зоне, соответствующей интервалу заложения скважины гидроразрыва. Таким образом, наличие участка, охарактеризованного как центр разупрочнения кровли, подтверждает эффективность выполненных мероприятий по направленному гидроразрыву. Конфигурация зоны N позволяет оценить общую площадь разгрузки и ее относительную степень в отдельных точках опытного участка выемочного столба.

В целом по результатам выполненных измерений установлена принципиальная возможность применения метода сейсмического просвечивания для оценки геомеханического состояния активной кровли в рамках разработки схемы направленного гидроразрыва. Проиллюстрирована способность метода к фиксации изменений физико-механических параметров массива, выражающихся в изменении скоростей распространения сейсмических волн, вызванных влиянием направленным гидроразрывом. Подтверждена возможность численной оценки относительной эффективности выполненного гидроразрыва на основе расчета безразмерного показателя, определяемого из отношения разницы скоростей, зафиксированных в измерениях до и после гидроразрыва к диапазону их возможного изменения. Сформированы методические основы для использования сейсмического просвечивания кровли в комплексе

мероприятий по направленному гидроразрыву кровли.

Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоре-

медиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шванкин М.В., Бондарев А.В. Особенности отработки удароопасных пластов в условиях труднообрушаемых кровель // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 2. С. 81–88.
2. Васютина В.В. Управление горным давлением в очистных забоях на крутом падении с труднообрушаемыми кровлями // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 7-й Международной научно-практической конференции. Т. 1. 2021. С. 92–96.
3. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Салихов А.Ф., Пятерикин Д.В. Разупрочнение труднообрушаемой кровли методом направленного гидроразрыва (НГР) на этапе выхода механизированного комплекса из монтажной камеры // Уголь. 2020. № 11(1136). С. 4–9.
4. Klishin V.I., Taylakov O.V., Opruk G.Y. [et al.] Geophysical and geomechanical analysis of coal mass condition during directional hydraulic fracturing (DHF) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. Vol. 377. 2019. P. 012035.
5. Bai Q., Wang F., Liu Z., Zhang C. Geometry nature of hydraulic fracture propagation from oriented perforations and implications for directional hydraulic fracturing // Journal of Contaminant Hydrology. 2020. Vol. 125. P. 103682.
6. Li L., Wu W. Directional hydraulic fracturing technology for prefabricated longitudinal guide seams in a coal mine tight sandstone roof. Energy Exploration and Exploitation. 2021.
7. Huang B.X., Wang Y.Z. Field investigation on crack propagation of directional hydraulic fracturing in hard roof // Meitan Xuebao. 2015. Vol. 40. No. 9. P. 2002–2008.
8. Bai Q., Xia B., Konietzky H., Zhang C. Directional hydraulic fracturing (DHF) using oriented perforations: The role of micro-crack heterogeneity // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 140. P. 104471.
9. Rout G.N., Sokolov S., Utkaev E.A., Kolmakova A. Analysis of seismic tomography data for definition of hydraulic fracturing parameters in underground coal mines // E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium. 2021. Vol. 315. P. 01021.
10. Сальников А.С., Канарейкин Б.А., Долгова С.В. [и др.] Технология и результаты сейсмотомографических исследований на проходящих волнах в угольных шахтах Кузбасса // Технологии сейсморазведки. 2012. № 2. С. 74–88.
11. Kanareykin B.A., Dunaeva K.A., Sagaidachnya O.M., Salnikov A.S. Seismic tomography on transmitted waves for researching of Kuznetsk Basin coal bed structure // 6th Saint Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences 2014: Investing in the Future. 2014. P. 755–759.
12. Тайлаков О.В., Makeev M.П., Соколов С.В. Повышение эффективности гидродинамического воздействия на углепородный массив на основе контроля его параметров методом сейсмической томографии // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 38–42.

13. Тайлаков О.В., Соколов С.В., Салтымаков Е.А. Определение свойств кровли в пределах выемочного столба на основе применения автономных сейсмических регистраторов в шахтных геофизических измерениях // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 437–441.

14. Тайлаков О.В., Соколов С.В. К вопросу повышения достоверности прогноза динамических явлений и контроля напряженного состояния в угольных шахтах с использованием сейсмоакустических методов // Горная промышленность. 2017. № 6(136). С. 72.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.35.57.005

UDC 550.834.05

© E.A. Utkaev, S.V. Sokolov, M.A. Tayurskiy, 2023

E.A. UTKAEV

Candidate of Engineering Sciences,
Senior Researcher
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo
e-mail: utkaev@mail.ru

S.V. SOKOLOV

Candidate of Engineering Sciences,
Researcher
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo
e-mail: sokolovsviuu@bk.ru

M.A. TAYURSKIY

Lead engineer
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo
e-mail: voutling@mail.ru

THE MONITORING OF DIRECTIONAL HYDRAULIC FRACTURING EFFECT IN COAL ROCK MASSIF OF WORKING COAL MINE

The problem of efficiency improvement of directional hydraulic fracturing to poorly caving roof of working area of coal mine was consider in article. The using of geophysical monitoring in different stages of hydraulic fracturing to solve this problem was offer. The experience of using of seismic tomography to estimate of coal roof geomechanical state before and after softening of it was describe. The results of interpretation of seismic data were present. The way to estimate an efficiency of performed events for directional hydraulic fracturing was offer.

Keywords: DIRECTIONAL HYDRAULIC FRACTURING, SEISMIC TOMOGRAPHY, COAL MINING, POORLY CAVING ROOF, SEISMIC WAVE, GEOMECHANICAL STATE.

REFERENCES

1. Shvankin M.V., Bondarev A.V. Features of working out of impact-prone layers in conditions of hard-to-break roofs // Bulletin of the Scientific Center of VostNII on industrial and environmental safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti]. 2019. No. 2. P. 81–88. [In Russ.].

2. Vasyutina V.V. Management of rock pressure in treatment faces on a steep drop with hard-to-break roofs // Innovative perspectives of Donbass: Materials of the 7th International Scientific and Practical Conference. Vol. 1. 2021. P. 92–96. [In Russ.].

3. Klishin V.I., Okrug G.Yu., Salikhov A.F., Pyaterikin D.V. Softening of a hard-to-break roof by the method of directional hydraulic fracturing (NGR) at the stage of the mechanized complex's exit from the mounting chamber // Coal [Ugol]. 2020. No. 11(1136). P. 4–9. [In Russ.].

4. Klishin V.I., Taylakov O.V., Opruk G.Y. [et al.] Geophysical and geomechanical analysis of coal mass condition during directional hydraulic fracturing (DHF) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources. Vol. 377. 2019. P. 012035.

5. Bai Q., Wang F., Liu Z., Zhang C. Geometry nature of hydraulic fracture propagation from oriented perforations and implications for directional hydraulic fracturing // Journal of Contaminant Hydrology. 2020. Vol. 125. P. 103682.

6. Li L., Wu W. Directional hydraulic fracturing technology for prefabricated longitudinal guide seams in a coal mine tight sandstone roof. Energy Exploration and Exploitation. 2021.

7. Huang B.X., Wang Y.Z. Field investigation on crack propagation of directional hydraulic fracturing in hard roof // Meitan Xuebao. 2015. Vol. 40. No. 9. P. 2002–2008.

8. Bai Q., Xia B., Konietzky H., Zhang C. Directional hydraulic fracturing (DHF) using oriented perforations: The role of micro-crack heterogeneity // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 140. P. 104471.

9. Rout G.N., Sokolov S., Utkaev E.A., Kolmakova A. Analysis of seismic tomography data for definition of hydraulic fracturing parameters in underground coal mines // E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium. 2021. Vol. 315. P. 01021.

10. Salnikov A.C., Kanarekin B.A., Dolgova S.V. [et al.] Technology and results of seismotomographic studies on passing waves in Kuzbass coal mines // Seismic exploration technologies [Tekhnologii sejsmorazvedki]. 2012. No. 2. P. 74–88. [In Russ.].

11. Kanareykin B.A., Dunaeva K.A., Sagaidachnya O.M., Salnikov A.S. Seismic tomography on transmitted waves for researching of Kuznetsk Basin coal bed structure // 6th Saint Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences 2014: Investing in the Future. 2014. P. 755–759.

12. Tailakov O.V., Makeev M.P., Sokolov S.V. Improving the efficiency of hydrodynamic impact on the carboniferous massif based on the control of its parameters by seismic tomography // High-tech technologies for the development and use of mineral resources [Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnyh resursov]. 2020. No. 6. P. 38–42. [In Russ.].

13. Tailakov O.V., Sokolov S.V., Saltykov E.A. Determination of roof properties within the excavation column based on the use of autonomous seismic recorders in mine geophysical measurements // High-tech technologies for the development and use of mineral resources [Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnyh resursov]. 2018. No. 4. P. 437–441. [In Russ.].

14. Tailakov O.V., Sokolov S.V. On the issue of increasing the reliability of the forecast of dynamic phenomena and control of the stress state in coal mines using seismoacoustic methods // Mining Industry [Gornaya promyshlennost]. 2017. No. 6(136). P. 72. [In Russ.].