УДК 550.8:553.6

СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В ПРЕДЕЛАХ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

И. А. САНФИРОВ, *директор, проф., д-р техн. наук, sanf@mi-perm.ru*
А. И. БАБКИН, *зав. сектором, канд. техн. наук*
А. Г. ЯРОСЛАВЦЕВ, *зав. сектором, канд. техн. наук*
А. И. НИКИФОРОВА, *научный сотрудник, канд. техн. наук*

Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

Представлен комплекс сейсморазведочных исследований, направленный на обеспечение безопасной разработки малоглубинных месторождений твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: *малоглубинная шахтная инженерная сейсморазведка, сейсмоакустика, комплексирование, геомеханика, геофизика, безопасность рудников.*

DOI: *10.17580/gzh.2018.06.01*

Введение

Сейсмические методы являются основным инструментом поисков и разведки месторождений углеводородного сырья, но их широкое внедрение на месторождениях твердых полезных ископаемых сдерживается целым рядом факторов. Бóльшая часть таких месторождений характеризуется малой глубиной залегания залежи, тонкослоистым строением, незначительными размерами структурных элементов. Указанные особенности геологического строения не позволяют напрямую использовать здесь высокоинформативные нефтяные сейсморазведочные технологии. В связи с этим для решения разного рода задач, связанных с подземной разработкой подобных месторождений, и с учетом имеющегося мирового опыта [1–7], сформирован комплекс малоглубинных сейсморазведочных технологий, получивший наибольшее распространение на крупнейшем в Европе Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС).

Сейсморазведочные исследования, в соответствии со стадийностью освоения ВКМКС, выполняют в три этапа: опережающие наземные исследования при подготовке к вскрытию отдельного участка шахтного поля; подземные, наземные и наземно-подземные исследования при проведении в шахте разведочных и подготовительных работ; мониторинговые наблюдения в ходе и после выполнения очистных работ. На сегодняшний день существуют следующие виды сейсмических исследований [8]: невзрывная малоглубинная сейсморазведка высокого разрешения методом общей глубинной точки (МОГТ); шахтная сейсморазведка МОГТ; шахтные акустические исследования; скважинные сейсмические исследования.

В рамках каждого из них для конкретной стадии освоения решают конкретные задачи в соответствии с технологией и возможностями, зависящими от детальности, дистанционности, трудоемкости и мобильности. Комплексирование позволяет объединить достоинства всех перечисленных видов и тем самым существенно расширить спектр решаемых проблем. Задачи, решаемые наземной сейсморазведкой, многообразны: картирование геологических неоднородностей; контроль состояния массива в процессе его отработки, включая аварийные ситуации; параметрическое обеспечение геомеханических расчетов. При наблюдениях уже при наличии выработанного пространства изучают особенности геологического строения водозащитной толщи (ВЗТ); оценивают состояние блоков, панелей, междукамерных целиков различными модификациями сейсмического просвечивания. Скважинные сейсмические исследования предназначены для изучения объектов, требующих повышенной разрешенности результатов, например – зоны вертикальной трещиноватости на участках ускоренных оседаний.

Методика сейсмических исследований

Методические особенности проведения сейсморазведочных исследований определяются физико-геологическими особенностями строения надсоляных и соляных пород в пределах ВКМКС. Принципиальное значение для организации сейсмических исследований в пределах отдельного рудника имеют: вертикальные размеры целевого интервала, наличие тонкой слоистости, контрастность латеральной изменчивости физических параметров, гипсометрия и акустическая контрастность отражающих границ, наличие наземной инфраструктуры.

Содержание аппаратурной составляющей направлено на максимально возможное повышение разрешающей способности сейсморазведочных данных. Применяют системы наблюдений с короткими годографами (не более 400–500 м), невзрывные источники малой мощности с энергией импульса до 1200 Дж, в том числе пороховые и электроискровые, а также телеметрические портативные цифровые сейсмостанции. Наземные сейсморазведочные работы в основном ведут с применением профильных или площадных 2D-систем наблюдений. На отдельных участках шахтных полей можно использовать пространственную 3D-сейсморазведку, хотя опыт ее применения в малоглубинной геофизике весьма ограничен [9–11].

Расчет параметров систем наблюдений базируется на теоретических положениях об особенностях формирования поля отра-

женных волн в интервале малых глубин. Установлено [12], что в сейсмогеологических условиях Соликамской впадины влияние кратных волн и неидеально упругого поглощения ограничено. Здесь основной вклад в структуру записи обеспечивает слоистость и скоростная дифференциация среды, определяющие содержание регистрируемых интерференционных пакетов отраженных волн, на которые накладываются поверхностные волны и случайные шумы. Таким образом обеспечивается возможность расчета параметров систем регистрации отраженных волн, исходя из конкретного содержания поставленных задач, определяемого только глубиной и размерами объектов поиска. Основными критериями служат необходимые для их решения вертикальная (длина волны) и горизонтальная (зона Френеля) характеристики разрешенности сейсмической записи и уровень помех, определяемый отношением сигнал/шум.

Значительный фон техногенного шума по всему спектру сейсмической записи при наблюдениях во внутренних точках среды обусловливает необходимость применения нестандартных систем наблюдений как при исследованиях ВЗТ, так и состояния отдельных блоков и панелей. Для детализации особо интенсивных аномалий, выделенных в результате шахтных сейсморазведочных работ, возможно применение исследований по методике Акусто-ОГТ с «суперуплотненной» системой регистрации (шаг наблюдений <1 м), обеспечивающей килогерцовый диапазон частот.

Для параметрического обеспечения наземных сейсморазведочных наблюдений применяют прямое и обратное вертикальное сейсмическое просвечивание (ВСП) с шагом наблюдений 1–2 м. В целях локализации негативных особенностей строения породного массива выполняют межскважинное просвечивание и скважинное профилирование по методике многократных перекрытий [13].

Этап интерпретации

Информационной базой этапа интерпретации являются конечные результаты цифровой обработки сейсморазведочных данных – временной разрез МОГТ, скоростные и амплитудные параметры. В рамках интерпретационного этапа первоочередной задачей является стратификация отражающих горизонтов. В качестве примера на **рисунке** приведен окончательный временной разрез (*а*) и его атрибуты по одному из профилей в пределах центральной части ВКМКС. В разрезе в интервале глубин от 100 до 400 м выделяются отражающие горизонты (ОГ).

При проведении работ во внутренних точках шахты за счет изменения частотного диапазона возможно выделение дополнительных ОГ внутри соляной залежи. Целевой интервал при наблюдениях в верхнее полупространство, как правило, не превышает 150 м.

Дальнейшая количественная интерпретация основана на программно-реализованной процедуре подбора физико-геологической модели среды, выполняемой с учетом особенностей геологического строения интервала малых глубин и применяемых полевых сейсморазведочных технологий. При ее проведении широко используют процедуры динамического анализа по оценке амплитудного и частотного состава результирующих записей. На участках с предполагаемым флюидо- и газонасыщением исследуемых интервалов геологического разреза выполняют AVO-анализ и дают экспертные оценки относительного ухудшения прочностных свойств в потенциально опасных зонах на основе совместного анализа упругих характеристик (см. рисунок, *б*). и комплексного атрибутивного параметра (см. рисунок, *в*).

Результирующая модель среды в профильном варианте (см. рисунок, *г*) представляет собой основной информационный элемент дальнейших площадных и пространственных построений распределения структурно-физических параметров исследуемого интервала породного массива. Подобная информация является определяющей при составлении горно-геологических заключений о возможности и целесообразности отработки породного массива. Точность и достоверность данной информации зависят от множества факторов, и в первую очередь – от качества аппаратурно-методического обеспечения и сложности геологического строения.

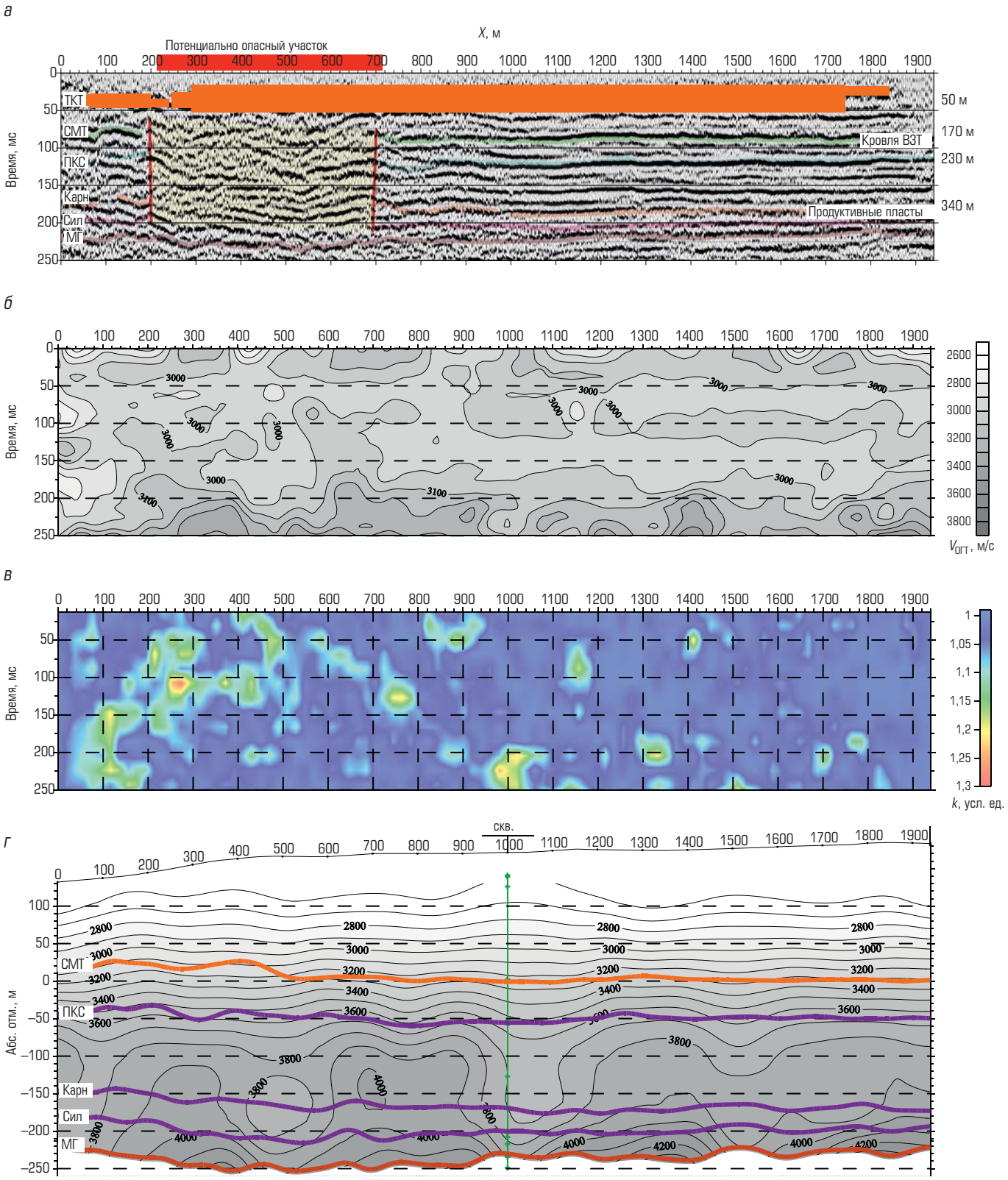
Оценка достоверности результатов исследований

Наиболее объективная оценка точности и достоверности сейсморазведочных исследований возможна по результатам последующего бурения геологоразведочных скважин. В пределах ВКМКС за десятилетия сейсморазведочных исследований сформировался ряд участков, где реализована подобная схема заверки сейсморазведочных данных. Рассмотрим ее результаты на одном из них, расположенном в пределах неотработаннной части месторождения.

Основной особенностью, затрудняющей проведение сейсморазведочных работ для данной территории, является значительная литофациальная изменчивость строения соляной и надсоляной толщ. В соляной толще установлен ряд тектонических элементов. В центральной части площади выделен прогиб, включающий две брахисинклинали. К западу и востоку от него закартированы соляные купола. Переходная пачка довольно широко развита в пределах синклинали и отсутствует на поднятиях. Мощность изменяется от 0 до 80 м. Покровная каменная соль распространена на большей площади, чем переходная пачка. Мощность ее изменяется от 0 до 30 м, достигая максимума в синклинали. Мощность карналлитовой зоны колеблется от 0 до 130 м; максимальная мощность приурочена к северным частям куполов. Мощность сильвинитовой зоны – от 0 до 30 м.

В пределах площади детальной разведки в соляных и надсоляных отложениях присутствует разрывная тектоника. На северо-востоке, в крест простирания брахисинклинали, в интервале соляно-мергельной толщи предполагается сдвигонадвиг. На западном, более крутом, склоне одного из поднятий протрассирован надвиг. Южнее прогнозируется прохождение еще двух сдвиговых плоскостей.

Малоглубинные сейсморазведочные исследования проводили в 2009–2011 гг. В результате построены структурные, ско-



Результаты обработки данных невзрывной малоглубинной сейсморазведки в пределах ВКМКС:

а – временной разрез МОГТ; *б* – скоростная характеристика временнóго разреза; *в* – разрез комплексного атрибутивного параметра; *г* – сейсмогеологический разрез;

ТКТ – кровля терригенно-карбонатной толщи; СМТ – кровля соляно-мергельной толщи; ПКС – кровля покровной каменной соли; Карн – кровля продуктивной толщи; Сил – граница между карналлитовой и сильвинитовой пачками; МГ – интервал маркирующей глины

ростные и интерпретационные схемы, отражающие строение надсоляной и соляной толщ. Выявлены и закартированы зоны, отличающиеся по упругим свойствам от вмещающего породного массива. По комплексу сейсморазведочных параметров выделены четыре основные группы интерпретационных геологических моделей: зоны интенсивной складчатости; низкоскоростные вертикальные структурные несогласия; локальные структурные и литолого-фациальные неоднородности; горизонтальные структурные несогласия.

Опорными данными для интерпретации материалов сейсморазведки послужили результаты бурения 145 скважин. Плотность бурения составила 0,406 скв/км^2. Среднее расстояние до профиля – 580 м. При последующем геологическом доизучении участка осуществлено бурение еще порядка 30 геологоразведочных скважин, что позволило оценить характер погрешностей данных сейсморазведки. Среднее удаление скважины от профильной линии составило 500 м.

По сопоставлению абсолютных отметок залегания отражающих горизонтов, выделенных по сейсморазведке и данным бурения, установлено, что значения невязок не превышают 5 % глубины залегания ОГ. Тем не менее для каждого интервала существуют повышенные значения. Как правило, они обусловлены двумя основными факторами: значительным расстоянием между скважиной и профилем (более 400 м) и аномальными особенностями строения разреза.

Максимальная ошибка определения глубины залегания ОГ (15 %) зафиксирована в скважине, вскрывшей полное замещение сильвинитовой зоны каменной солью. Она пробурена в 1000 м от ближайшего профиля. В 450 м от профиля пробурена скважина, установившая кровлю сильвинитовой пачки глубже на 14 %, чем предполагалось по результатам сейсморазведки.

Возможности комплексирования

Дополнительные возможности повышения точности определения пространственных координат неоднородностей, осложняющих ведение горных работ, открываются совместной интерпретацией: разнонаправленных в геологическом пространстве наблюдений; волновых полей различного частотного диапазона; разноуровенных волновых полей, зарегистрированных в рамках единой полевой технологии.

Под первым подразумевается комплексное изучение пространственно совмещенных шахтных и наземных исследований. За счет анализа волновой информации, получаемой по направлению сверху вниз (с поверхности) и снизу вверх (из шахты), повышается точность вертикальной локализации геологических неоднородностей, оценки их структуры и свойств. При этом реализуется и второй вид комплексирования за счет существенного роста частотного состава при исследованиях во внутренних точках среды, что позволяет достичь дальнейшей детализации структуры и свойств геологических неоднородностей, прогнозируемых по наземным данным. Следует отметить, что подобный прогноз возможен как в вертикальной плоскости над выработками, так и в горизонтальной – между ними.

В рамках реализации третьего вида комплексирования разработана технология двухуровневых сейсморазведочных исследований. Она подразумевает последовательное применение сейсморазведочных исследований различной детальности. На первом этапе изучаются продуктивные отложения и на основании анализа полей преломленных и поверхностных волн локализуются участки с предполагаемыми нарушениями в верхней части разреза (ВЧР). На втором этапе строение этих участков оценивается на основе детальных систем наблюдений отраженными волнами по методике многократных перекрытий с параметрами, рассчитанными для изучения ВЧР. В итоге выполняется построение разноуровенных моделей реальных сред, согласованных по эффективным кинематическим параметрам, включающим времена регистрации и эффективные скорости целевых отражающих горизонтов.

Результаты количественной интерпретации комплекса сейсморазведочных данных в виде детальных физико-геологических моделей с выделением локальных неоднородностей, осложняющих ведение горных работ, применяют в качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов [14, 15]. Основанием для этого служат как теоретические предпосылки, заключающиеся в зависимости динамического модуля упругости от скорости распространения упругих волн, так и многочисленные результаты практических экспериментов, показывающие взаимосвязь особенностей распределения в массиве опорного давления и скоростей продольных волн. Получение подобных моделей на различных стадиях ведения горных работ позволяет оценивать техногенное воздействие на породный массив [16, 17]. Признаком образования участков техногенной нарушенности является падение или отсутствие роста значений скоростей сейсмических волн в расчетных зонах опорного давления. Приближенная оценка этих изменений возможна на основе количественного учета снижения сейсмических скоростей и экспертного анализа, базирующегося на изучении контрастности таких динамических характеристик упругих волн, как амплитуда, частота и когерентность. Совокупность аномалий всех перечисленных характеристик объединяется в комплексный параметр (см. рисунок, *в*) на основе алгебры логики.

В случае негативных прогнозов развития горнотехнической ситуации уровень детализации сейсморазведочной информации возрастает за счет реализации все более «тяжелых технологий». Выполняют пространственные наблюдения для изучения различных глубинных интервалов породного массива. При наличии технической возможности проводят пространственно совмещенные высокочастотные исследования в горных выработках и скважинные сейсмические работы с целью картирования пределов распространения зон техногенной нарушенности над выработанным пространством.

Заключение

Представленные информационные возможности комплекса сейсморазведочных технологий в различном наполнении уже более трех десятков лет учитывают при ведении горных работ на

Верхнекамском месторождении. Отдельные элементы сейсморазведочного комплекса реализованы и на других горнодобывающих объектах (Новомосковское месторождение гипса, Тыретский солерудник, Талнахское месторождение полиметаллов, Тюбегатанское месторождение солей).

На сегодняшний день технологии высокоразрешающей сейсморазведки представляются наиболее адаптированными и эффективными для решения широкого круга горно-геологических задач на месторождениях твердых полезных ископаемых. Их дальнейшее развитие может быть связано с использованием пространственных 3D- и 4D-технологий, которые на сегодняшний день представляются наиболее эффективным инструментом для картирования локальных природно-техногенных неоднородностей, обусловливающих развитие аварийных и предаварийных ситуаций на рудниках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-00101).

Библиографический список

См. англ. блок. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 6, pp. 8–12
DOI: 10.17580/gzh.2018.06.01

Seismic exploration package to support mining operations at the Upper Kama Potash Deposit

Information about authors
I. A. Sanfirov[1], Director, Professor, Doctor of Engineering Sciences
A. I. Babkin[1], Divisional Manager, Candidate of Engineering Sciences, aib@mi-perm.ru
A. G. Yaroslavtsev[1], Divisional Manager, Candidate of Engineering Sciences
A. I. Nikiforova[1], Junior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

[1] Mining Institute, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract
Specific geological structure of shallow hard mineral bodies hinders direct application of the informative seismic exploration technology widely used in the oil industry. In connection with this, aiming at solving of different problems connected with underground mining of hard minerals, a package of shallow seismic technologies has been compiled and found the most extensive application at the Europe's largest Upper Kama Potash Deposit.
As per stages of mining, such types of seismic surveys as non-explosive high-resolution shallow seismic prospecting, underground seismics using the common-depth-point method, underground acoustic testing and borehole seismic acquisition are applied at the deposit.
Additional improvement in precise positioning of discontinuities that complicate mining arises from joint interpretation of differently directed observations and wave fields of various frequency and level recorded in the framework of the unified full-scale technology. As a result, different-level modeling of real media is performed with the coordinated kinematic parameters of the models, including traveltimes and stacking velocities of target reflectors.
The qualitative interpretations of seismic exploration data in the form of detailed geological models with the identified local discontinuities which complicate mining operations serve a parametric framework for geomechanical modeling. Such modeling at different stages of mining allows estimating induced impact on rock mass and making appropriate design choices in case of emergency.
The information content provided by the seismic exploration package has been taken into account in mining at the Upper Kama Potash Deposit for more than thirty years.
The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 16-17-00101.

Keywords: shallow underground seismics, engineering seismics, seismo-acoustics, complexing, geomechanics, geophysics, mine safety.

References

1. Hill I. A. Better than drilling? Some shallow seismic reflection case histories. *The Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.* 1992. No. 25. pp. 239–248.
2. Steeples D. W. Engineering and environmental geophysics at the millennium. *Geophysics.* 2001. Vol. 66, No. 1. pp. 31–35.
3. Steeples D. W., Miller R. D., Lambrecht J. L., Croxton N. High-resolution seismic-reflection imaging 25 years of change in I-70 sinkhole, Russell, County, Kansas. *SEG Technical Program Expanded Abstracts.* 2006. Vol. 25, Iss. 1. pp. 1411–1415.
4. Malehmir A., Durrheim R., Bellefleur G., Urosevic M., Juhlin C. et al. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: a general overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics.* 2012. Vol. 77, No. 5. pp. 173–190.
5. Jones I. F., Davison I. Seismic imaging in and around salt bodies. *Interpretation.* 2014. Vol. 2, Iss. 4. pp. 1–20.
6. Miller R. D., Peterie S., Ivanov J. Anomalies: Detect or Resolve Using 2-D Seismic Reflection Imaging. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Geophysics.* Al Ain, 2017. pp. 380–383.
7. Ragozin N., Ignatev V., Konkov A., Oshkin A. Complex of high-frequency well seismic methods for detailed study of rock mass. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Geophysics.* Al Ain, 2017. pp. 306–309.
8. Sanfirov I. A. Babkin A. I. Yaroslavtsev A. G. Priyma G. Y. Fatkin K. B. Seismic measurements of exploitation conditions of the potash deposit. *Geofizika.* 2011. No. 5. pp. 53–58.
9. Esestime P., Arti L., Cvetkovic M., Rodriguez K., Hodgson N. 3D shallow water seismic survey planning to deliver sub-salt imaging in South Gabon. *First Break.* 2017. Vol. 35, No. 12. pp. 77–81.
10. Boyarov V. M., Goncharov E. M., Egorov G. S. Effect of 3D high-resolution seismic exploration in kimberlite ore bodies in the Yakutia diamond province. *Engineering and Mining Geophysics 2018: Proceedings of the 14th scientific and practical conference.* Almaty, 2018.
11. Shi Z.-J., Tian G., Zhao W.-K., Wang Z.-H. Application on ultra-shallow 3D seismic exploration technology. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science).* 2013. Vol. 47, No. 5. pp. 912–917.
12. Sanfirov I. A., Stepanov Yu. I., Fat'kin K. B., Gerasimova I. Yu., Nikiforova A. I. Shallow geophysical exploration of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science.* 2013. Vol. 49, No. 6. pp. 902–907.
13. Chugaev A. V., Babkin A. I., Lisin V. P. A Downhole Seismic Monitoring in the Zones of Man-Made Disasters. *Proceedings of the 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics.* New York : Curran Associates, 2016. pp. 452–459.
14. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Geomechanical estimation of deformation intensity in rock mass above the flooded potash mine. *Journal of Mining Science.* 2017. Vol. 53, No. 4. pp. 630–642.
15. Baryakh A. A., Asanov V. A., Samodelkina N. A., Pankov I. L., Telegina E. A. Geomechanical provision of protection of potassium mines from flooding. *Gornyi Zhurnal.* 2013. No. 6. pp. 30–34.
16. Sanfirov I. A., Babkin A. I., Chugaev A. V., Ladeishchikov S. V. New methodical solutions for shallow-depth seismic surveying at deposits of water-soluble mineral resources. *Eurasian Mining.* 2013. No. 2. pp. 7–11.
17. Wen-Feng Du, Su-Ping Peng. 4D seismic data acquisition method during coal mining. *Journal of Geophysics and Engineering.* 2014. Vol. 11, No. 3.