

7. Tsarev R. I. The rationale for selecting the geological environment model in the seismic CDP survey forward solution on the Verkhnekamskoye salt deposit. *Geofizika*. 2018. No. 5. pp. 18–23.
8. Jackson M. P. A., Hudec M. R. Salt Tectonics. Principles and Practice. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 498 p.
9. Golubev B. M. Structure of salt strata in the Upper Kama deposit : thesis of Dissertation ... of Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences. Perm, 1972. 31 p.
10. Kudryashov A. I. Verkhnekamskoe salt deposit. 2nd enlarged edition. Moscow : Epsilon Plus, 2013. 368 p.
11. Ivanov A. A., Voronova M. L. Upper Kama Potash Salt Deposit: Stratigraphy, mineralogy and petrography, tectonics, genesis. *Transactions of the All-Union Scientific Research Geological Institute. New Series*. Leningrad : Nedra, 1975. Vol. 232. 217 p.
12. Sanfirov I. A. Mine objectives of seismic exploration by the common depth point. Yekaterinburg : Izdatelstvo UrO RAN, 1996. 165 p.
13. Sanfirov I. A., Yaroslavtsev A. G., Akhmatov A. E. et al. Pulsed powder elastic wave source. Patent RF, No. 2439620. Applied: 15.06.2010. Published: 10.01.2012. Bulletin No. 1.
14. Boganik G. N., Gurvich I. I. Seismic exploration. Tver : AIS, 2006. 744 p.
15. Cherepovskiy A. V. Next technological level of surface seismic. 2nd revised edition. Moscow : EAGE Geomodel LLC, 2017. 252 p.
16. Buryak S. V., Vakulenko S. A. Reliability of observed reflection boundaries in stacked sections of engineering method of the common reflection point at depth. *The 8th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 2012*. Gelendzhik, 2012. DOI: 10.3997/2214-4609.20146038
17. Dondurur D. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Amsterdam : Elsevier, 2018. 606 p.
18. Kharitonov T. V., Oborina E. V., Popov A. G. et al. Generation of composite geological and hydrogeological maps of the Upper Kama Potash Salt Deposit, Scale 1:100 000. Perm, 2002. Book 1.
19. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Pushkareva I. Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *GJAB*. 2019. No. 4. pp. 121–136.
20. Tsarev R. I. Capacities of S-wave exploration in mines. *Engineering and Mining Geophysics 2019 : Proceedings of the 15th Conference and Exhibition*. Gelendzhik, 2019. Vol. 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901765

УДК 550.834

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ И ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ С ПОМОЩЬЮ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ СПОСОБОМ ПВРО



**А. М. ПРИГАРА<sup>1</sup>**,  
ведущий научный сотрудник,  
канд. техн. наук



**А. А. ЖУКОВ<sup>1</sup>**,  
заведующий лабораторией  
геофизики, канд. техн. наук,  
Aleksandr.Zhukov@uralkali.com



**Р. И. ЦАРЕВ<sup>1</sup>**,  
старший научный сотрудник



**Ю. А. КАШНИКОВ<sup>2</sup>**,  
зав. кафедрой, д-р техн. наук

Оценены возможности способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений для решения задач эксплуатационной разведки на примере Верхнекамского месторождения солей. Внедрение разработанного способа в практику эксплуатационной разведки позволяет существенно повысить ее эффективность. С учетом схожести условий подземной и открытой добычи полезных ископаемых с позиций доступа к плотным горным породам аналогичных результатов следует ожидать и в условиях карьеров.

**Ключевые слова:** сейсморазведка, поперечные волны, разделение отражений, сейсмогеологическая модель, безопасность рудников, подсчет запасов, геомеханические параметры.

**DOI:** 10.17580/gzh.2021.04.02

непрерывную информацию о геологическом строении отрабатываемых участков [1–7]. На месторождениях солей в процессе эксплуатационной разведки, помимо уточнения пространственного положения, мощности и строения отрабатываемых пластов, обязательно следует получать сведения о строении и свойствах водозащитной толщи [8]. Строение и состояние последней определяют безопасность действующих рудников. При этом, как считают ряд авторов, «при фактически применяемых методах разведки соляных месторождений получить необходимые данные о качественных и количественных параметрах аномальных зон практически невозможно» [9].

Для исправления этой ситуации авторами статьи разработан способ сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [10], обеспечивающий построение сейсмогеологической модели среды с высокой детальностью и достоверностью. Теоретические расчеты, опытные работы в реальных условиях и геологическая проверка подтвердили большой потенциал способа при решении геологоразведочных и геотехнических задач

<sup>1</sup>АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### Введение

Эксплуатационную разведку на месторождениях полезных ископаемых проводят с целью планомерного систематического получения достоверных исходных данных для планирования горных работ, а также контроля за полнотой и качеством отработки запасов. Ее осуществляют в течение всего периода разработки месторождения. Важную роль при этом играют геофизические методы, поскольку они позволяют получать практически

[11, 12]. Для более глубокого понимания возможностей способа он был опробован на ряде участков Верхнекамского месторождения солей, результаты опробования рассматриваются ниже.

### Методика выполнения работ

Работы выполнены способом сейсморазведки ПВРО, который базируется на широко известной методике общей глубинной точки (МОГТ), которая, в свою очередь, основана на методе отраженных волн (МОВ) [13]. Основные особенности способа заключаются в следующем [10]:

- для исследований используют поперечные волны;
- для возбуждения упругих колебаний применяют источник типа «сосредоточенная сила», для которого направленность поперечных волн в условиях горных выработок близка к перпендикулярно по отношению к направлению ударов;
- сейсмоприемники выбирают таким образом, чтобы их ось чувствительности была параллельна направлению воздействия источника упругих волн, т. е. для исследований в горизонтальной плоскости применяют вертикальные удары и вертикально ориентированные сейсмоприемники и, наоборот, для исследований в вертикальной плоскости используют горизонтальные удары и горизонтально ориентированные сейсмоприемники;
- для разделения отражений, относящихся к линии приема из разных полупространств, используют двухэтапный подход: на полевом этапе наблюдения выполняют по двум параллельным линиям, разнесенным друг от друга на расстояние, равное четверти длины волны, а на камеральном этапе полученные два массива данных позволяют разделить отражения с помощью специально разработанной процедуры.

Благодаря использованию поперечных волн, обладающих значительно большей амплитудой в условиях горных выработок, чем продольные волны, и разработанной авторами процедуры разделения отражений качество и детальность получаемых результатов выведены на новый, недостижимый ранее уровень.

### Результаты исследования

Для определения практических возможностей способа ПВРО по решению задач эксплуатационной разведки были выполнены работы на нескольких участках Верхнекамского месторождения солей (ВКМС). Работы проводили с целью получения с помощью способа ПВРО следующих данных:

- мощность и состав водозащитной толщи (ВЗТ), от которой критически

зависит безопасность действующих рудников, наличие и характер в ней внутрисоляных деформаций (ВСД);

- физико-механические свойства (ФМС) пород для планирования горных работ.

Рассмотрим один из наиболее показательных результатов, полученных с помощью способа ПВРО в горной выработке на ВКМС, расположенной на склоне поднятия перпендикулярно его оси. Известно [14], что на поднятиях залегание солей осложняется наличием интенсивной складчатости, растворением солей в верхней части поднятия и уменьшением мощности ВЗТ. Кроме того, при обеспечении некоторой критической скорости поднятия солей может быть достигнут предел текучести, и появляется высокая вероятность возникновения в них трещин, что резко повышает риски при проходке горных выработок на участках поднятий. Все указанные явления оказались сконцентрированными на одном разрезе (рис. 1). До выполнения здесь работ способом ПВРО на основе результатов бурения и проходки горной выработки была построена геологическая модель (см. рис. 1, а), которая претерпела значительные изменения по результатам геофизических исследований (см. рис. 1, б).

Начало профиля находится практически на оси поднятия, в связи с чем от пикета (ПК) 0 до ПК 1300 верхние пласты

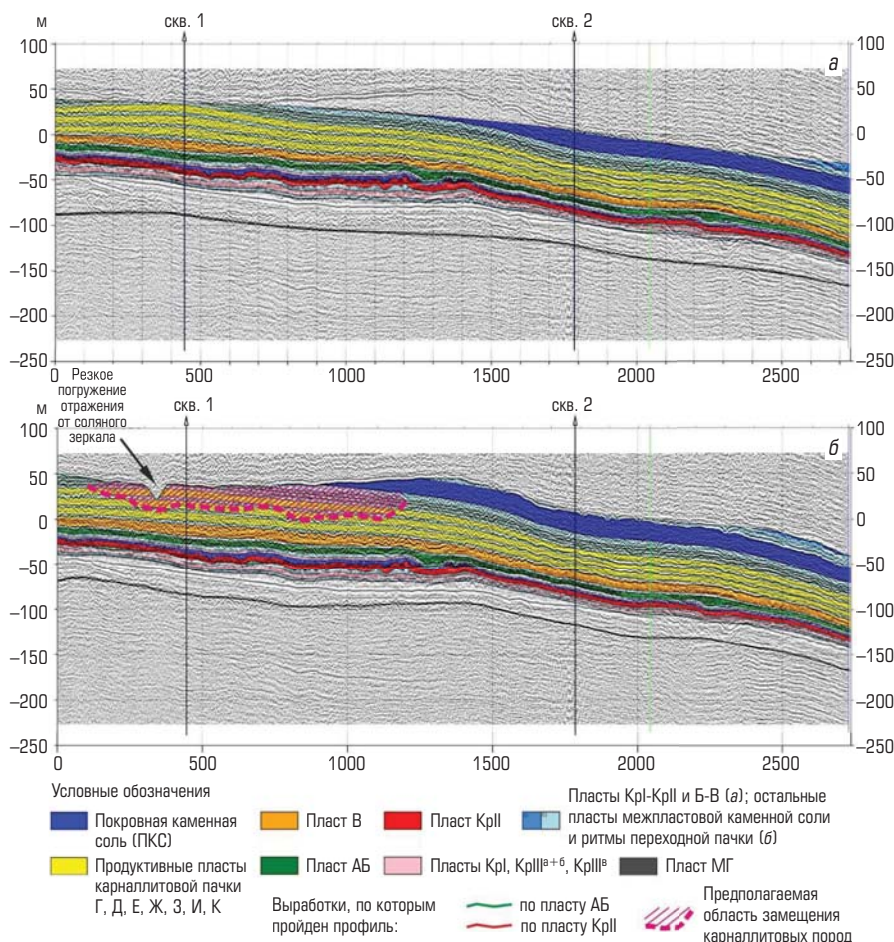


Рис. 1. Сейсмический разрез, полученный способом ПВРО с наложением:

а — исходной геологической модели, полученной по скважинным данным;

б — геологической модели после коррекции по данным сейсморазведки

соли вплоть до верхних карналлитовых пластов полностью растворены, поэтому мощность ВЗТ там значительно меньше, чем в конце профиля. Кроме того, обращают на себя внимание изменения в характере складчатости внутри карналлитовой и сильвинитовой пачек на протяжении профиля — до ПК 1600 она весьма интенсивная, амплитуда складок достигает 10 м и более, а после ПК 1600 складки становятся едва различимыми, за исключением отдельных случаев (рис. 2). Данное явление связано с интенсивностью стекания солей: там, где оно было наиболее активным, сформировалась и наиболее интенсивная складчатость.

Особого внимания заслуживает резкое локальное погружение отражения от «соляного зеркала» (СЗ) — самого верхнего по разрезу слоя соли, относительно которого определяют мощность ВЗТ (см. рис. 1, б, рис. 3, ПК 350). Наличие указанного погружения вызвано эрозионным врезом, сформированным пресными водами, получившими доступ к солям в результате их интенсивного поднятия. В настоящее время обнаруженный эрозионный врез не представляет опасности для рудника, поскольку мощность ВЗТ ниже него остается достаточной — более 50 м, а очистные работы на данном участке не ведут. Однако важно понимать, что это первый в истории ВКМС надежно закартированный эрозионный врез такого масштаба — не настолько обширный, чтобы быть обнаруженным бурением, но при этом достаточно значительный, чтобы представлять потенциальную угрозу для рудников. Судя по тому, что на ВКМС существуют и другие участки со схожим геологическим строением, врезы подобного масштаба можно ожидать и на них. Ранее их зафиксировать не удавалось ввиду недостаточной эффективности применяемых методик разведки [9].

Еще одна особенность, зафиксированная в результате выполнения работ способом ПВРО на данном участке, — потеря корреляции отражений в интервале верхних карналлитовых пластов в области рассмотренного эрозионного вреза (см. рис. 1, б, рис. 3). Судя по всему, он способствовал проникновению рассолов внутрь соляной толщи, в результате чего произошло замещение карналлитов на значительной площади. Участки замещения характеризуются высокой вероятностью газодинамических явлений (ГДЯ), в связи с чем возможность выделения таких зон с помощью способа ПВРО является весьма актуальной.

Таким образом, по результатам геофизических работ рассмотрена гипсометрия СЗ, причем изменения его отметок составили до 30 м; как следствие, уточнена мощность ВЗТ, добавилась информация об эрозионном врезе и предполагаемой зоне замещения карналлитов (см. рис. 1, б). Обобщение геологической и геофизической информации по профилям общей длиной более 10 км, полученной на рассматриваемом участке, обусловило значительные корректировки исходной геологической модели, построенной изначально исключительно по данным бурения и проходки горных выработок. Указанные изменения позволили выполнить обоснованную корректировку планов горных работ.

Следующий пример получения новой геологической информации на основе способа ПВРО касается изучения особенностей строения ПдКС. На одном из профилей шахтной сейсморазведки был обнаружен участок, где поведение пласта МГ вызвало сомнения. Ранее взгляды на его гипсометрию базировались исключительно

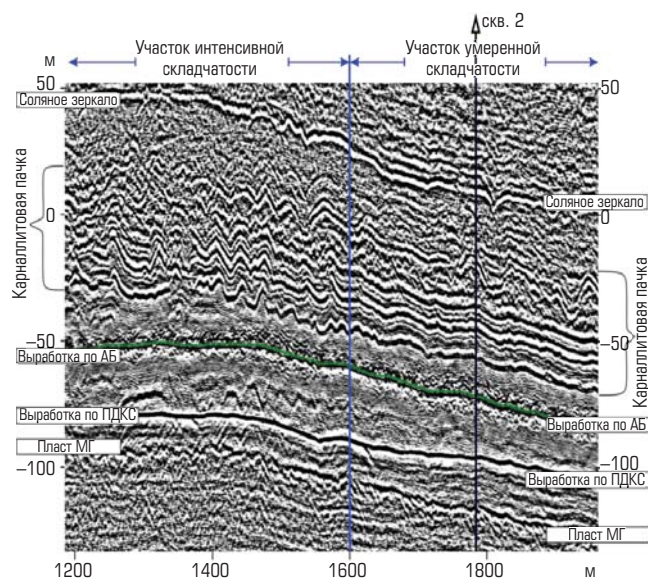


Рис. 2. Увеличенный вид сейсмического разреза в области смены характера складчатости

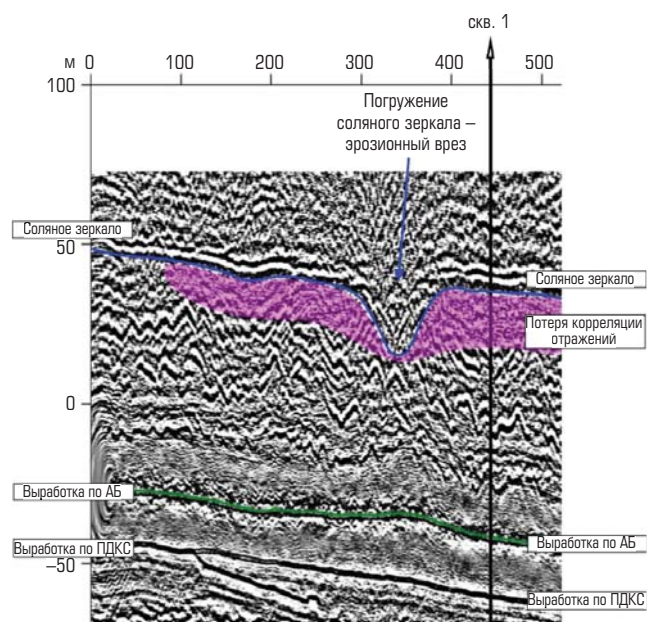


Рис. 3. Увеличенный сейсмический разрез в области эрозионного вреза и потери корреляции отражений от карналлитовых пластов

на единичных пересечениях с горными выработками и скважинами. Поэтому общепринятым считалось мнение, что пласт МГ ведет себя выдержанно, без резких изменений отметок залегания. Однако в рассматриваемом случае способом ПВРО была выявлена складка по пласту МГ с амплитудой порядка 30 м (рис. 4, а). Поскольку на разрезе, помимо отражений от геологических границ, отмечалось отражение еще и от выработки в ПдКС, удалось изучить зарисовки ее стенок. Зарисовки подтвердили корректность сейсмического разреза: в непосредственной близости от забоя выработки ею был вскрыт пласт МГ с гипсометрией, соответствующей отражению на сейсмическом разрезе (см. рис. 4, б).

Помимо определения детального строения и выделения его неоднородностей, предложенный способ шахтной сейсморазведки ПВРО позволяет получить распределение ФМС горного массива, информация о которых крайне необходима на этапе эксплуатации месторождения для расчета параметров системы разработки и оценки возможности развития водопроводящих трещин. Известно, что существует функциональная связь между ФМС и скоростями распространения упругих свойств в среде, что является предпосылкой для построения детальной модели распределения физико-механических свойств [15]. Ранее удалось на образцах керна получить устойчивые корреляционные зависимости между скоростью продольной и поперечной волн и такими параметрами, как предел прочности на одноосное сжатие, модуль упругости, угол внутреннего трения, сцепление, которые в последующем были откорректированы по данным широкополосного акустического каротажа, проведенного в скважинах в месте отбора керна [16]. Общая методика решения задачи определения ФМС массива пород и последующего решения задачи геомеханики на примере одного из рудников ПАО «Уралкалий» сводится к следующему.

1. Проведение шахтных сейсморазведочных исследований способом ПВРО и обработка данных геофизических исследований в скважине, располагающейся в районе штрека, с целью определения динамических ФМС пород ВЗТ и продуктивной толщи.

2. Определение динамических, а затем (по имеющимся формулам) статических ФМС пород ВЗТ в районе исследуемых панелей рудника на основе обработки материалов шахтных сейсморазведочных исследований.

3. Создание геолого-геомеханической модели ВЗТ и продуктивной толщи района исследуемых панелей в специализированном программном обеспечении и выделение зон в ВЗТ и продуктивной толще с различными физико-механическими свойствами. Отметим, что данную методику широко используют при создании геолого-механических моделей продуктивных объектов нефтегазовых месторождений [17].

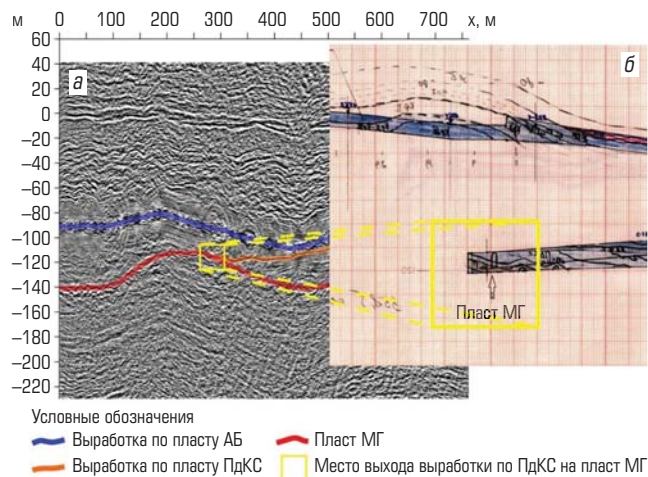
4. Оценка текущего и перспективного состояния ВЗТ в районе исследуемых панелей рудника методом математического моделирования.

В результате выполнения шахтных сейсморазведочных работ и последующей обработки данных (включая инверсионные преобразования) строят модель распределения скоростей упругих волн в среде (кинематическая модель), а также модели распределения акустического импеданса и физико-механических свойств. На **рис. 5** показано распределение предела прочности на одноосное сжатие пород ВЗТ над исследуемыми панелями.

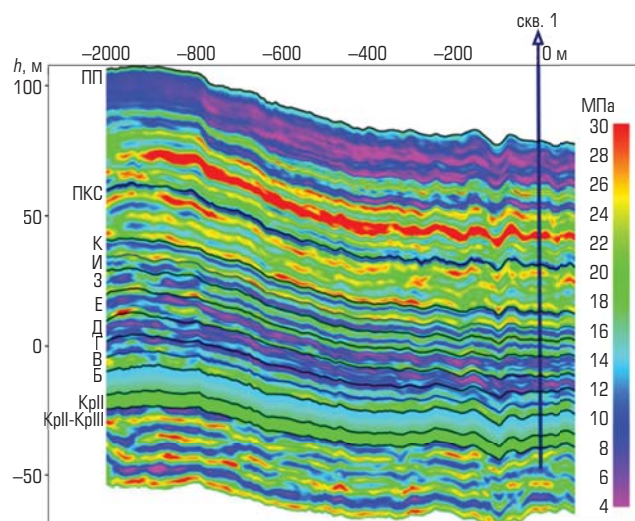
С использованием полученного распределения прочностных и деформационных свойств в ВЗТ и калийных пластах был выполнен расчет оседаний земной поверхности и численный (геомеханический) анализ возникновения зон разрушения в ВЗТ при отработке панелей при проектных параметрах системы разработки.

### Выводы

Показано, что данные, получаемые в процессе шахтной сейсморазведки способом ПВРО в условиях месторождений солей, позволяют решать следующие задачи, стоящие перед



**Рис. 4. Сейсмический разрез (а) и зарисовка стен выработки (б)**



**Рис. 5. Распределение прочности пород на одноосное сжатие по профильной линии шахтной сейсморазведки ПВРО**

геологическими и горными службами добывающих предприятий на этапах доразведки и эксплуатационной разведки:

- изучение гипсометрии геологических границ, уточнение положения СЗ;
- определение характеристик ВСД;
- обнаружение геологических аномалий, представляющих потенциальную опасность для рудников – областей уменьшения мощности ВЗТ, в том числе эрозионных врезов, областей замещения солей;
- выявление неизвестных ранее особенностей геологического строения и, как следствие, уточнение особенностей формирования месторождений;
- построение модели распределения ФМС в горном массиве, расчет оседаний земной поверхности, геомеханический анализ зон разрушения в ВЗТ;
- уточнение объемов запасов.

## Библиографический список

1. Funk C., Isbister J., Leblanc T., Brehm R. Mapping How Geophysics Is Used To Understand Geohazards In Potash Mines // *Recorder*. 2019. Vol. 44. Iss. 7.
2. Прохоров Н. Н., Ефимов А. М., Ушаповский И. Ф., Кафанова Т. П., Барбиков Д. В., Клубук А. М. Определение границы распространения обводненных пород вдоль контура выклинивания Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения геофизическими методами // *Горная механика и машиностроение*. 2019. № 3. С. 5–14.
3. Gendzwill D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // *Geophysics*. 1993. Vol. 58. Iss. 5. P. 741–748.
4. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity // *Geophysics*. 2019. Vol. 84. Iss. 1. P. 41–57.
5. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang, Zhen Yang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China // *Geophysics*. 2016. Vol. 81. Iss. 5. P. 149–165.
6. Greenhalgh S. A., Mason I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // *Geophysics*. 2000. Vol. 65. No. 6. P. 1908–1919.
7. Вагин В. Б., Ефимов А. М., Кулагов Е. В. Исследование и оценка состояния водозащитной толщи над калийными горизонтами геофизическими методами // *Горный журнал*. 2014. № 2. С. 11–15.
8. Chouteau M., Phillips G., Prugger A. Mapping and Monitoring Softrock Mining // *Geophysics and Geochemistry at the Millenium : Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. – Toronto, 1997. P. 927–940.
9. Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В., Пачгин В. В. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей // *ГИАБ*. 2019. № 5. С. 22–33.
10. Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКСМ // *ГИАБ*. 2019. № 4. С. 121–136.
11. Пригара А. М., Аптуков В. Н., Царев Р. И., Ворошилов В. А., Жуков А. А. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования // *Инженерная и рудная геофизика : сб. тезисов 16-й науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. – Пермь, 2020.
12. Глухих А. В., Царев Р. И., Жуков А. А., Морозкина Ю. Н., Пригара А. М. Геологическое обоснование результатов шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ПВРО // *Инженерная и рудная геофизика : сб. тезисов 16-й науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. – Пермь, 2020.
13. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка : учебник. – Тверь : АИС, 2006. – 744 с.
14. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. – 2-е изд., перераб. – М. : Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.
15. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th ed. – Malden : Blackwell Publishing, 2007. – 475 p.
16. Khvostantsev D., Shustov D., Ermashov A., Kashnikov Yu. The increasing of exploitation safety of potassium salt deposit based on geological-geomechanical simulation // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. – Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. Vol. 2. P. 1425–1430.
17. Zoback M. D. *Reservoir Geomechanics*. – Cambridge : Cambridge University Press, 2007. – 480 p.

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 4, pp. 23–27  
DOI: 10.17580/gzh.2021.04.02

#### Improvement of operational exploration and mining safety using the shear-wave reflection method of mine seismology

##### Information about authors

A. M. Prigara<sup>1</sup>, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

A. A. Zhukov<sup>1</sup>, Head of Geophysics Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, Aleksandr.Zhukov@uralkali.com

R. I. Tsarev<sup>1</sup>, Senior Researcher

Yu. A. Kashnikov<sup>2</sup>, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences

<sup>1</sup>VNIIGalurgii, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

##### Abstract

During the whole life of mines, the geological survey departments are faced with the critical objectives of operational exploration. These objectives are sometimes impossible to be met adequately without geophysics. Neutrality of geophysical studies is often below the desired level. The shear-wave reflection method of mine seismology, with separation of reflections, which is developed by the present authors, allows: investigating the shape, thickness and dip angles of geologic beds and ore bodies, detecting geological discontinuities such as faults, joints and cavities, as well as determining physical and mechanical properties of rocks. The capacity of the shear-wave reflection method with separation of reflections is described in a case-study of the Upper Kama Potash Salt Deposit. The seismic tests were carried out in a few underground excavations. The developed method in the test conditions is accurate to the first meters at a spacing more than 300 m. Accordingly, it is possible to study the whole thickness of the salt strata in the Upper Kama Deposit, from the salt table to the anhydrous clay roof, specifically, to assess the structure and composition of the waterproof strata, to identify mine-threatening geological discontinuities, and to build the model of physical and mechanical properties of rock mass. Introduction of the newly developed method can greatly enhance efficiency of actual operational exploration. The method has yielded the best results during or immediately after heading of permanent and development openings. Considering similarity of surface and underground mineral mining in terms of access to solid rocks, it is expected to have the same outcomes in open pit mines.

**Keywords:** seismic exploration, shear waves, separation of reflections, geological seismic model, mine safety, appraisal of mineral resources and mineral reserves, geomechanical parameters.

##### References

1. Funk C., Isbister J., Leblanc T., Brehm R. Mapping How Geophysics Is Used To Understand Geohazards In Potash Mines. *Recorder*. 2019. Vol. 44. Iss. 7.

2. Prokhorov N. N., Efimov A. M., Ushchapovskiy I. F., Kafanova T. P., Barbikov D. V., Klabuk A. M. Defining the boundaries of the distribution of watered rocks along the contour of thinning of the Third potassium horizon of the Starobin potassium deposit by geophysical methods. *Gornaya mekhanika i mashinostroyeniye*. 2019. No. 3. pp. 5–14.
3. Gendzwill D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine. *Geophysics*. 1993. Vol. 58. Iss. 5. pp. 741–748.
4. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity. *Geophysics*. 2019. Vol. 84. Iss. 1. pp. 41–57.
5. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang, Zhen Yang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China. *Geophysics*. 2016. Vol. 81. Iss. 5. pp. 149–165.
6. Greenhalgh S. A., Mason I. M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*. 2000. Vol. 65. No. 6. pp. 1908–1919.
7. Vagin V. B., Efimov A. M., Kulagov E. V. Research and assessment of status of waterproof strata over potassium horizons by geophysical methods. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 2. pp. 11–15.
8. Chouteau M., Phillips G., Prugger A. Mapping and Monitoring Softrock Mining. *Geophysics and Geochemistry at the Millenium : Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Toronto, 1997. pp. 927–940.
9. Zubov V. P., Kovalskiy E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *GIAB*. 2019. No. 5. pp. 22–33.
10. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Shustkina I. Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 121–136.
11. Prigara A. M., Aptukov V. N., Tsarev R. I., Voroshilov V. A., Zhukov A. A. Mathematical modeling-based analysis of wave propagation processes under seismic and acoustical effects on rock mass. *Geophysics in Engineering and Mining. The 16th Conference with Seminar on Geology in Engineering and Mining 2020 : Head-Notes*. Perm, 2020.
12. Glukhikh A. V., Tsarev R. I., Zhukov A. A., Moroshkina Yu. N., Prigara A. M. Geological validation of data of S-wave exploration with separation of reflections. *Geophysics in Engineering and Mining. The 16th Conference with Seminar on Geology in Engineering and Mining 2020 : Head-Notes*. Perm, 2020.
13. Bogani G. N., Gurvich I. I. Seismic exploration : Textbook. Tver : AIS, 2006. 744 p.
14. Kudryashov A. I. Verkhnekamskoe salt deposi. Second revised edition. Moscow : Epsilon Plyus, 2013. 368 p.
15. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4th ed. Malden : Blackwell Publishing, 2007. 475 p.
16. Khvostantsev D., Shustov D., Ermashov A., Kashnikov Yu. The increasing of exploitation safety of potassium salt deposit based on geological-geomechanical simulation. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. Vol. 2. pp. 1425–1430.
17. Zoback M. D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. 480 p.