

## РЕШЕНИЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ МЕТОДАМИ ГЕОФИЗИКИ

А. А. Жуков<sup>1</sup>, А. М. Пригара<sup>1</sup>, Р. И. Царев<sup>1</sup>, В. А. Ворошилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия, vniig@uralkali.com

**Аннотация:** Описан опыт изучения горно-геологических условий в районе проектируемых гидроизолирующих сооружений в шахте одного из рудников Верхнекамского месторождения солей методами геофизики. Комплексные геофизические исследования проведены методами георадиолокации и сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений. Использованный комплекс позволяет оперативно и с высокой детальностью изучать целевой интервал геологического разреза, тем самым получать исходные данные для проектирования и решения горнотехнических задач. Выполненные исследования позволили определить гипсометрию пласта маркирующих глин, залегающего на относительно небольшой глубине от подошвы штреков по пласту подстилающей каменной соли, в районе которых проектируются гидроизолирующие сооружения. В процессе работ методом георадиолокации выявлены основные негативные факторы, влияющие на получение кондиционных данных. Они связаны с поверхностными условиями, присутствием влажного штыба и луж рассола. Поэтому, для решения поставленной задачи был выбран метод сейсморазведки, основанный на других физических принципах. На геофизических разрезах выделяется интенсивная складчатость пласта маркирующих глин. Корреляция пикировок кровли маркирующих глин по георадару и сейсморазведке составляет 0,99. По результатам исследований установлено, что применение выбранного комплекса геофизических методов для решения горнотехнических задач весьма перспективно.

**Ключевые слова:** верхнекамское месторождение солей, горнотехнические задачи, гидроизолирующие сооружения, геофизика, комплексирование методов, шахтная сейсморазведка, поперечные волны, георадарные исследования, центральная частота антенны.

**Для цитирования:** Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Ворошилов В. А. Решение горнотехнических задач на месторождении калийных солей методами геофизики // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5–1. – С. 82–91. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_51\_0\_82.

### Solution of mining engineering problems at a potassium salt deposit using geophysical methods

A. A. Zhukov<sup>1</sup>, A. M. Prigara<sup>1</sup>, R. I. Tsarev<sup>1</sup>, V. A. Voroshilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Joint Stock Company «VNII Galurgii», Perm, Russia, vniig@uralkali.com

**Abstract:** the article presents the experience of research of mining-geological conditions in the area of projected waterproofing constructions in the mine of one of the mines of the Verkhnekamskoye salt deposit by methods of geophysics. Complex geophysical surveys were carried

out by methods of GPR and seismic survey on shear waves with separation of reflections. The complex used makes it possible to study the target interval of the geological section quickly and with high detail, thereby obtaining initial data for designing and solving mining engineering problems. The research performed allowed us to determine the hypsometry of the layer of marking clays, which lies at a relatively shallow depth from the bottom of the drifts along the underlying bed of rock salt, in the area where the waterproofing constructions are designed. In the course of works by the method of GPR, the main negative factors affecting the obtaining of conditioned data were identified. They are related to surface conditions, the presence of a damp pile and puddles of brine. Therefore, the seismic survey method based on other physical principles was chosen to solve the task. Intensive folding of the marker clay bed stands out on the geophysical sections. The correlation between the picks of the marker clay top by GPR and seismic survey is 0.99. According to the results of the research, it is established that the use of the selected complex of geophysical methods for solving mining and technical problems is very promising.

**Key words:** verkhnekamskoe salt deposit, mining engineering problems, waterproofing constructions, geophysics, method combination, mine seismic survey, shear waves, GPR surveys, antenna central frequency.

**For citation:** Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Voroshilov V. A. Solution of mining engineering problems at a potassium salt deposit using geophysical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–1):82–91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_51\_0\_82.

---

### Объект исследований

Объектом исследований является породный массив в верхней части подстилающей каменной соли Верхнекамского месторождения солей в непосредственной близости от проектируемой гидроизолирующей перемычки. Гидроизолирующие перемычки представляют собой сооружения в шахтных выработках, устанавливающиеся для быстрого и надежного отделения ликвидируемого участка от рабочей части шахтного поля. Для конкретных горнотехнических условий предварительно определяют тип и количество стандартных гидроизолирующих элементов, образующих перемычку. Затем производят контрольно-монтажную сборку перемычки во врубе, закрепляют в нем твердеющим материалом гидроизолирующие элементы, расположенные по контуру выработки. Могут быть возведены две параллельные перемычки с заполнением пространства между ними твердеющим материалом [1].

Сооружение перемычки связано с проходкой врубов в массиве, в котором присутствует вероятность просачивания рассолов вблизи гидроизолирующего сооружения, поэтому изучение массива по контуру выработки имеет очень важное значение. Массив близ проектируемого гидроизолирующего сооружения должен быть достоверно изучен и характеризоваться отсутствием геологических неоднородностей. В частности, при строительстве перемычек в выработках пласта подстилающей каменной соли (ПдКС) необходимо учитывать гипсометрию пласта маркирующих глин (МГ), залегающего в верхней части ПдКС на всей площади месторождения ВКМС [2, 3]. Поскольку физические свойства пласта МГ сильно отличаются от вмещающих солей, а глины, которыми он сложен, характеризуются высокой проницаемостью, по нему может происходить просачивание рассолов. Строительство гидроизоляционного сооружения в непосредственной близости от пласта МГ может свести к нулю все усилия.

## **Актуальность и цель работы**

Обычно, геологические исходные данные для проектирования получают по средствам прямых методов исследований, в данном случае бурения скважин и шпуров. Такой подход имеет явные недостатки и ограничения, характерные для прямых методов изучения массива: бурение скважин с плотным шагом — это долгий, сложный и дорогостоящий подход. Для получения оперативной и непрерывной информации хорошо подходят методы геофизики. Целью проведения исследований является принципиальная оценка применимости геофизических методов для решения горнотехнических задач, связанных с изучением строения и состояния участков массива, где планируется установка гидроизолирующих перемычек.

## **Методика**

Изначально для решения поставленной задачи выбран метод георадарных исследований. В ходе проведения работ установлено, что получить кондиционный материал получается не по всем профильным линиям, что связано с увлажненным соляным штыбом и скоплением рассола на поверхности наблюдений. Подобные условия критически влияют на распространение электромагнитной волны [4]. В случае, когда использование георадара осложнено поверхностными условиями, использовалась сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) по методике общей глубинной точки (МОГТ) на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО) [5, 6]. Комплексирование методов позволило получить исчерпывающие данные о строении массива на участке проектирования гидроизолирующей перемычки, и тем самым решить поставленную задачу.

Для проведения георадарных исследований применен аппаратурнопро-

граммный комплекс SIR-3000 (GSSI, США) [7, 8]. При выполнении работ использовался парный антенный блок с частотой 100 МГц, одна антенна которого является источником, вторая — приемником, что позволяет разнести их для увеличения глубины проникновения электромагнитной волны. Георадарные исследования проведены по трем профильным линиям в транспортном (TS1), конвейерном (BS1) и закладочном (VS1) штреках (рис. 1).

Шахтные сейсморазведочные исследования проведены на двух профилях. По транспортному штреку (TS1) сейсморазведка выполнена с целью оценки сходимости результатов георадиолокации и сейсморазведки, как методов, основанных на различных физических принципах. По конвейерному штреку (BS1) целью работ было определение гипсометрии кровли пласта МГ, поскольку по результатам георадарных исследований был получен неудовлетворительный результат. В качестве источника упругих волн использовалась кувалда весом три килограмма, удары выполнялись в стенку выработки в горизонтальном направлении.

Для зондирования использовались сейсмоприемники с горизонтальной осью чувствительности, которые устанавливались в отверстия, просверленные в стенке выработки. В шахтных условиях поперечные волны имеют максимальную амплитуду в направлении, радиальном относительно оси удара, поэтому при субгоризонтальном залегании слоев на одном и том же разрезе будут присутствовать интерферирующие отражения, приходящие сверху и снизу от выработки, а также вдоль нее [9, 10].

## **Результаты исследований**

В результате обработки и интерпретации данных георадарных исследо-

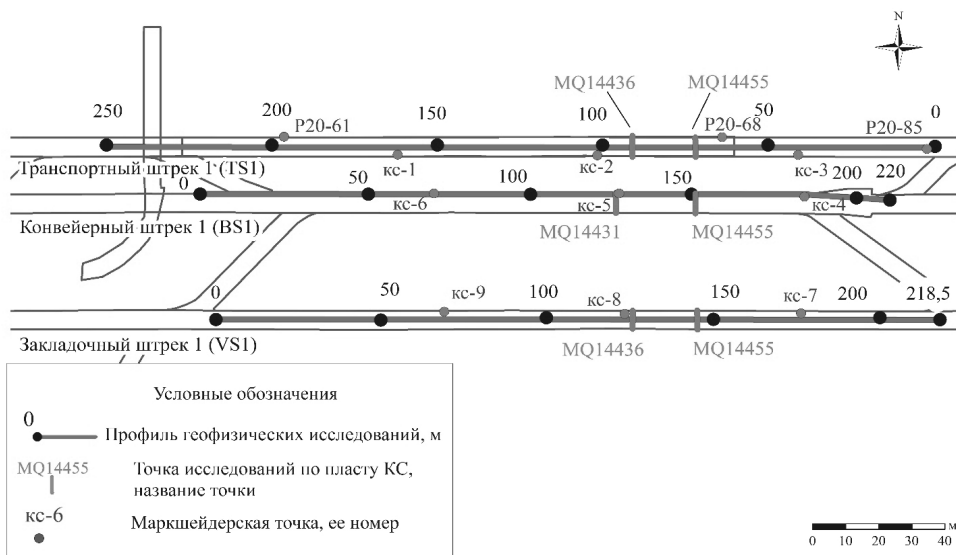
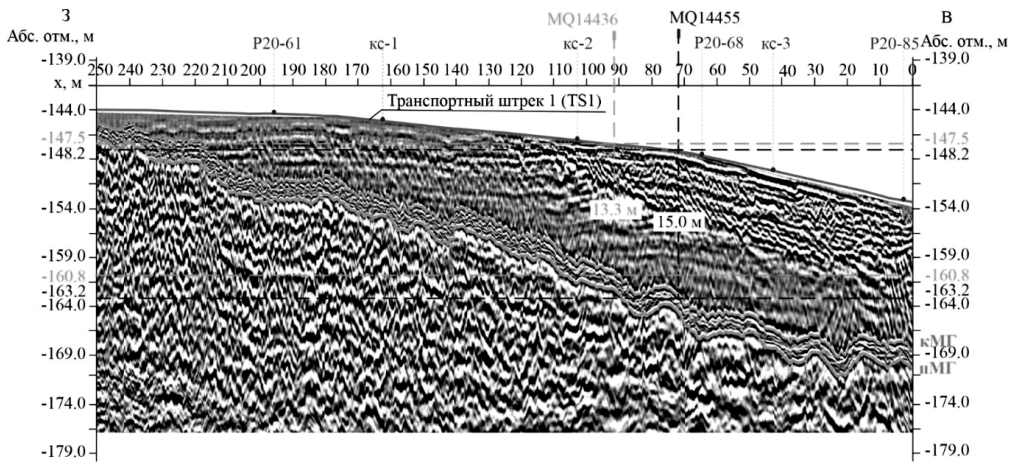


Рис. 1. Схема участка исследований  
 Fig. 1. Scheme of the research area

ваний были получены геоэлектрические разрезы, отображающие строение верхней части ПдКС. Для пересчета из временной шкалы в шкалу глубин производился скоростной анализ по годографам дифрагированных волн, образованных на шарнирах складок. Привязка осуществлялась к результатам бурения подземных скважин, находящихся в транспортном штреке, пройденном по пласту ПдКС примерно в двух километрах западнее участка исследований, для этого профильные линии были продлены от объекта исследований до скважин. При погружении пласта МГ (увеличении глубины залегания от поверхности наблюдений) процент глин в изучаемом разрезе увеличивался, что приводило к снижению средней скорости с 15 см/нс до 12 см/нс. Результаты привязки георадарных данных к скважине показали, что мощность пласта МГ составляет в среднем 1,5 м, при переводе в глубинную шкалу скорость электромагнитной волны в пласте МГ принята равной 6 см/нс.

На геоэлектрических разрезах с высокой детальностью прослеживается кровля и подошва пласта маркирующих глин (рис. 2). Локальных неоднородностей в ПдКС не выявлено. На разрезах в верхней части подстилающей каменной соли наблюдается типичная складчатость первого порядка с амплитудами складок не более одного метра при ширине не более двух метров, характерная для I структурного комплекса, выделенного известным исследователем ВКМС Голубевым Б. М. [11]. Особый интерес, с точки зрения геологии, вызывает складчатость по пласту МГ, амплитуды отдельных складок достигают 5 м при ширине складок около 10 м [12, 13]. В подобных складках могут присутствовать трещины, заполненные галитом (рис. 3).

В случае, когда поверхность наблюдения сильно увлажнена, присутствуют поверхностный слой соляного штыба и лужи рассола, происходит сильное затухание электромагнитной волны, и получить кондиционный мате-



Условные обозначения

- |  |   |  |   |
|--|---|--|---|
|  | Подошва выработки                             |  | Точки исследований, значение мощности массива (от подошвы выработки до кровли МГ) |
|  | кМГ Пласт маркирующей глины (кровля, подошва) |  | кс-1 Маркшейдерская точка, ее номер   |

Рис. 2. Геоэлектрический разрез по транспортному штреху (TS1)  
 Fig. 2. Geoelectric section along the transport drift (TS1)

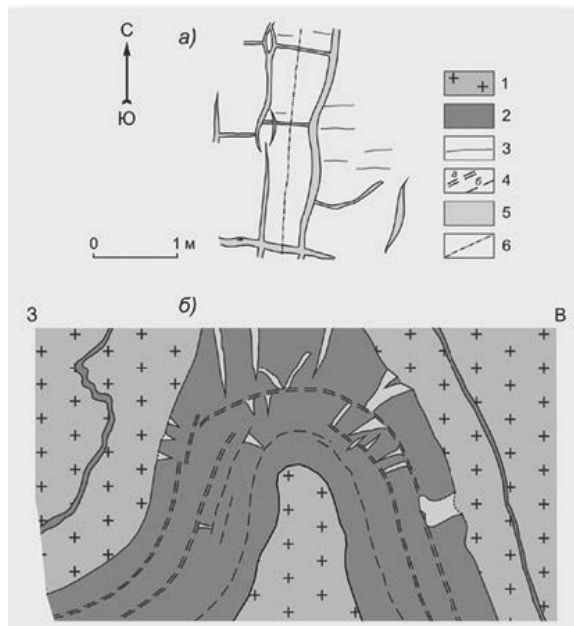


Рис. 3. Продольные и поперечные залеченные трещины в пласте МГ: план (а) и разрез (б):  
 1 – каменная соль; 2 – породы пласта МГ; 3 – секущие трещины, выполненные гипсом;  
 4 – согласные трещины, выполненные серым галитом и гипсом (а), гипсом (б); 5 – галит  
 оранжевый; 6 – ось складки [10]  
 Fig. 3. Longitudinal and transverse healed fractures in the MC layer: plan (a) and section (b):  
 1 – rock salt; 2 – MC layer; 3 – sectional fractures made by gypsum; 4 – consonant fractures  
 made by gray halite and gypsum (a), gypsum (b); 5 – orange halite; 6 – fold axis [10]

риал по георадарным исследованиям не представляется возможным (рис. 4). Для получения информации о разрезе в подобных условиях необходимо использовать геофизические методы, основанные на других физических принципах.

Для решения задачи в местах, неблагоприятных для георадиолокации, был применен способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах. В результате обработки и интерпретации данных ПВРО получены глубинные разрезы нижнего полупространства по профилям в выработках пласта ПдКС. На разрезах нижнего полупространства по транспортному штреку (TS1) четко выделяется отражающая граница, соответствующая кровле пласта маркирующих глин (рис. 5).

Данные об абсолютных отметках кровли маркирующей глины при исследовании по транспортному штреку (TS1) по данным сейсморазведки и георадара совпадают (рис. 6).

Георадар обладает большей разрешающей способностью при высокой скорости проведения работ и позволяет получить более детальную гипсоме-

трию исследуемого пласта. Основные ограничения применения георадара в условиях месторождений калийных солей связаны с присутствием прослоев глины. Чем их больше, тем выше суммарная проводимость исследуемого разреза, что приводит к затуханию электромагнитной волны [14]. Помимо этого, поверхностные условия для получения кондиционных материалов должны быть близки к идеальным. С увеличением глубины, в связи с изменением геоэлектрических свойств среды, увеличивается погрешность определения глубины искомой границы, поэтому необходима привязка к скважинным данным. Сейсморазведка способом ПВРО практически лишена ограничений и не чувствительна к присутствию пропластков глин в разрезе. Основное ограничение связано с вертикальной разрешающей способностью, которая оценивается как 1,25 м, чего может быть недостаточно для решения тонких задач с выделением объектов с вертикальными размерами менее 1,25 м. На рис. 7 приведен сейсмический разрез по конвейерному штреку (BS1), в котором георадар дал

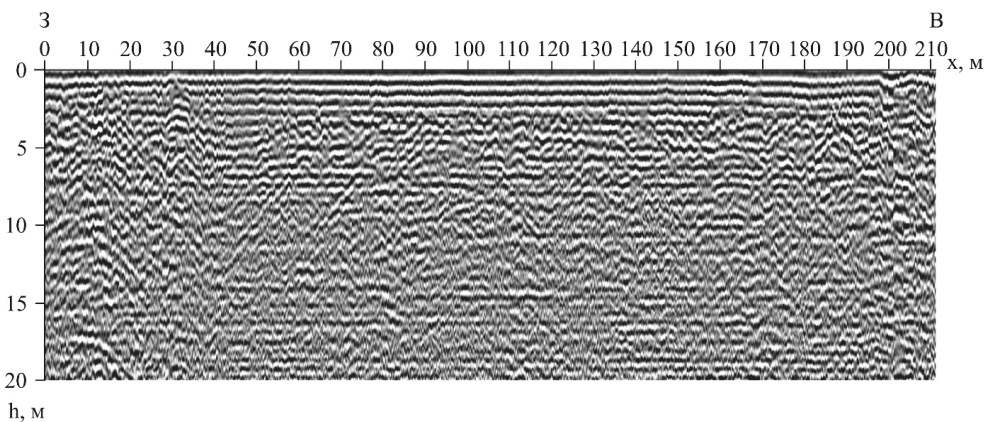
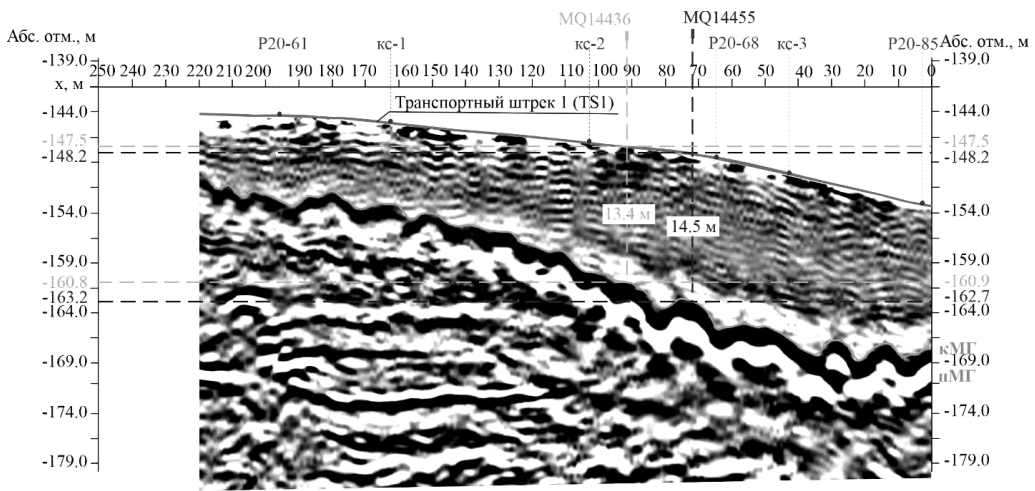


Рис. 4. Пример геоэлектрического разреза по конвейерному штреку (BS1), полученного в выработке, почва которой покрыта слоем влажного соляного штыба  
 Fig. 4. Example of a geoelectric section along the conveyor drift (BS1) obtained in the mine, the soil of which is covered with a layer of wet salt pile



Условные обозначения

- Подошва выработки
- кМГ Пласт маркирующей глины
- иМГ (кровля)
- Точки исследований, значение мощности массива (от подошвы выработки до кровли МГ)
- кс-1 Маркшейдерская точка, ее номер

Рис. 5. Сейсмогеологический разрез по транспортному штреху (TS1)  
 Fig. 5. Seismogeological section along the transport drift (TS1)

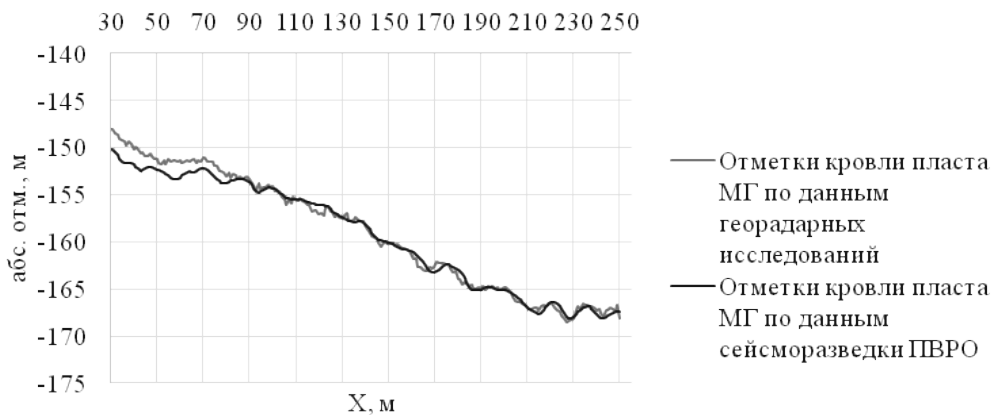
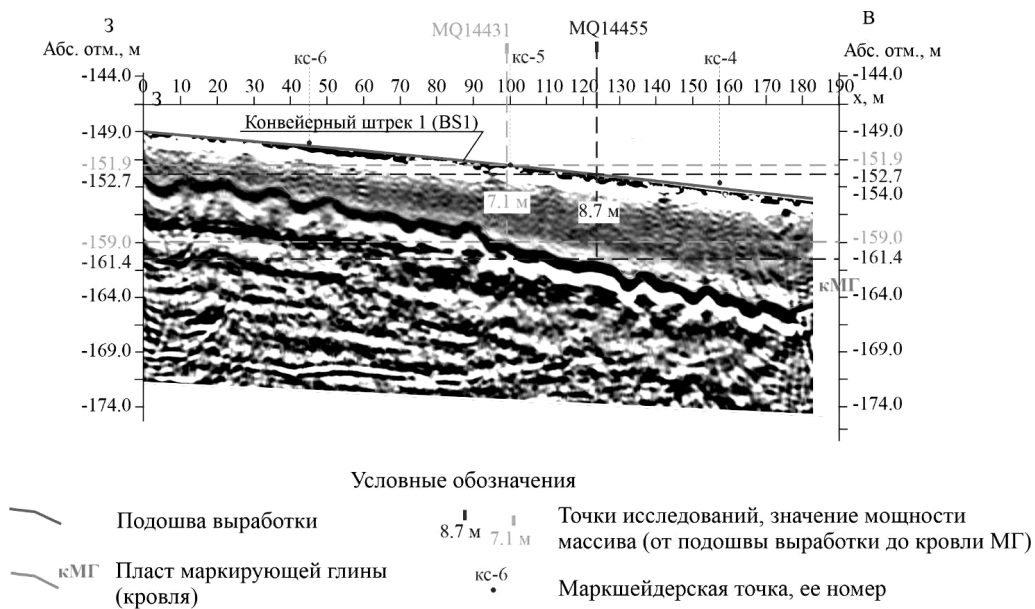


Рис. 6. Графики абсолютных отметок кровли пласта МГ по данным сейсморазведки ПВРО и георадарных исследований  
 Fig. 6. Plots of absolute elevations of the top of the MC reservoir according to the data of the SWSR seismic survey and GPR surveys

неудовлетворительный результат (см. выше рис. 4).

Таким образом, авторами статьи предлагается использовать комплекс методов, включающий георадарные исследования и сейсморазведку способом

ПВРО для изучения массива при решении различных горнотехнических задач в шахтных выработках месторождений калийных солей. На первом этапе целесообразно проведение георадарных исследований, так как метод является менее



**Рис. 7. Сейсмогеологический разрез по конвейерному штреку (BS1)**  
**Fig. 7. Seismogeological section along the conveyor drift (BS1)**

трудоемким и затратным по времени, что позволит получить экспресс-оценку исследуемой толщи до первых десятков метров. Для заверки методом, основанным на другом физическом принципе, хорошо подходит сейсморазведка способом ПВРО, которая позволяет изучать всю толщу солей.

**Выводы.** Георадар в условиях ВКМС позволяет изучить разрез на глубину в первые десятки метров, при вертикальной разрешающей способности 0,3 м. На разрезах выделяются складки различных порядков, с высокой точностью определяется гипсометрия пластов, однако есть зависимость точности глубинных построений от содержания глины в исследуемом разрезе. Сейсморазведка имеет меньшую вертикальную разрешающую способность – 1,25 м, поэтому надежно выделяется лишь кровля пласта МГ, однако, при этом, результаты сейсморазведки практически не зависят от количества глинистых прослоев. Таким образом, комплек-

сирование сейсморазведки способом ПВРО и георадарных исследований позволяет, во-первых, заверить результаты одного метода другим и повысить точность глубинных построений, во-вторых, получать детальную надежную информацию о геологическом строении участка. Применение комплекса георадар-сейсморазведка является перспективным при решении горнотехнических задач в условиях шахт, в частности, при строительстве гидроизолирующих перемычек.

### **Вклад авторов**

**Жуков А. А.** — постановка задачи и общее научное руководство исследованиями

**Пригара А. М.** — выполнение систематизации материалов

**Царев Р. И.** — получение данных, анализ результатов исследований, написание текста статьи

**Ворошилов В. А.** — подготовка данных, оформление результатов исследований

## Конфликт интересов

Статья продолжает дискуссию по геофизическим исследованиям распространения волнового поля в слоистом массиве

горных пород с использованием методов георадиолокации и сейсморазведки, развернутую на страницах журнала в 2021 г. по предложению редколлегии ГИАБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ №2060398, 1993. *Ольховиков Ю. П., Черепанов Ю. Б., Голованенко О. Я., Суховой В. Н., Котляр Е. К., Триполко А. С., Мынко Ю. В.* Способ подготовки гидроизолирующей перемычки к эксплуатации в аварийной ситуации.
2. *Кудряшов А. И.* Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. М.: Изд. Эпсилон Плюс. 2013. 368 с.
3. *Морошкина Ю. Н.* Геологическое строение верхней части подстилающей каменной соли Верхнекамского месторождения. автореферат. дис. на соискание уч. степени канд. геол.-мин. наук. Пермь, 1999. 19 с.
4. *Teare B. L., Ruiz H., Agbona A., Wolfe M., Dobрева I., Adams T., Selvaraj M., Hays D.* Effect of Soil Water on GPR Estimation of Bulked Roots, Methods, and Suggestions // *Research Square*. 2021, p. 1–19. DOI 10.21203/rs.3.rs-907807/v1.
5. Патент РФ № 2709415, 17.12.2019. *Пригара А. М., Жуков А. А., Царев Р. И., Шусткина И. Ю., Ворошилов В. А.* Способ шахтной сейсмической разведки.
6. *Gendzwill D. J., Brehm R.* High-resolution seismic reflections in a potash mine // *Geophysics*. 1993. Vol. 58, no. 5. pp. 741–748. DOI 10.1190/1.1443459.
7. *Giannino F., Leucii G.* Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM 1st Edition. Hoboken: Wiley, 2021, 304 p.
8. *Судакова М. С., Владов М. Л.* Современные направления георадиолокации // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. — М: МГУ, 2018. — №2 — С. 3–12. DOI 10.33623/0579–9406–2018–2-3–12.
9. *Царев Р. И., Пригара А. М., Жуков А. А.* Возможности сейсморазведки на поперечных волнах // *Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика», Геленджик, 2019*. — Геленджик, 2019. — С. 1–12. DOI 10.3997/2214–4609.201901765.
10. *Царев Р. И., Глухих А. В., Жуков А. А., Морошкина Ю. Н., Пригара А. М.*, Геологическое обоснование результатов шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ПВРО // *Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика», Пермь, 2020 — Пермь, 2020*. — С. 1–8. DOI 10.3997/2214–4609.202051151.
11. *Голубев Б. М.* Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения: автореферат. дис. на соискание уч. степени канд. геол.-мин. наук. Пермь, 1972. 31 с.
12. *Jackson M. P. A., Hudec M. R.* Salt tectonics principles and practice. Cambridge, 2017, 498 p.
13. *Milanovic P., Maksimovich N., Meshcherikova O.* Dams and Reservoirs in Evaporites. Switzerland: Springer, 2019, 170 p.
14. *Владов М. Л., Капустин В. В., Пятилова А. М., Кувалдин А. В.* Георадарные наблюдения для оценки проводимости геологической среды. Лабораторный эксперимент // *Геофизические исследования*. — 2017. — 3(18). — С. 5–16. DOI 10.21455/gr2017.3-1. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Ol'hovikov Ju. P., Cherepanov Ju. B., Golovanenko O. Ja., Suhovoj V. N., Kotljar E. K., Tripolko A. S., Mynko Ju. V. *Patent RU 2060398, 1993*. [In Russ].
2. Kudrjashov A. I. Verhnekamskoe salt deposit. 2nd edition, Moscow, Epsilon Plyus, 2013, 368 p. [In Russ].
3. Moroshkina Ju. N. *Geologicheskoe stroenie verhnej chasti podstilajushhej kamennoj soli Verhnekamskogo mestorozhdenija* [Geological structure of the upper part of the underlying rock salt of the Verkhnekamskoe deposit]. Candidate's thesis, Perm, PGNIU, 1999, 19 p. [In Russ].

4. Teare B. L., Ruiz H., Agbona A., Wolfe M., Dobрева I., Adams T., Selvaraj M., Hays D. Effect of Soil Water on GPR Estimation of Bulkied Roots, *Methods, and Suggestions. Research Square*. 2021, p. 1–19. DOI 10.21203/rs.3.rs-907807/v1.
5. Prigara A. M., Zhukov A. A., Tsarev R. I., Shustkina I. Ju., Voroshilov V. A. Patent RU 2709415, 2019. [In Russ].
6. Gendzwill D. J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine. *Geophysics*. 1993. Vol. 58, no. 5. pp. 741–748. DOI 10.1190/1.1443459.
7. Giannino F., Leucii G. *Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM 1st Edition*. Hoboken: Wiley, 2021, 304 p.
8. Sudakova M. S., Vladov M. L. Modern Directions of Application of Ground-Penetrating Radar. Moscow Univ. Geol. Bull. 2018. no 2, pp. 3–12. [In Russ]. DOI 10.33623/0579-9406-2018-2-3-12.
9. Tsarev R. I., Prigara A. M., Zhukov A. A. The Possibilities of Mine Seismic Survey on Shear Waves. *Materials of the Engineering and Mining Geophysics* 2019. Gelendzhik, 2019, pp. 1–12. [In Russ]. DOI 10.3997/2214-4609.201901765.
10. Tsarev R. I., Gluhii A. V., Zhukov A. A., Moroshkina Ju. N., Prigara A. M., Geological Substantiation of the Results of Mine Seismic Survey on Shear Waves with Reflection Separation, *Materials of the Engineering and Mining Geophysics* 2020. Perm, 2020, pp. 1–8. [In Russ]. DOI 10.3997/2214-4609.202051151.
11. Golubev B. M. Structure of salt mass of Verkhnekamskoye deposit, Doctor's thesis, Perm, PGNIU, 1972, 31 p. [In Russ].
12. Jackson M. P. A., Hudec M. R. *Salt tectonics principles and practice*. Cambridge, 2017, 498 p.
13. Milanovic P., Maksimovich N., Meshcherikova O. *Dams and Reservoirs in Evaporites*. Switzerland: Springer, 2019, 170 p.
14. Vladov M. L., Kapustin V. V., Pyatlova A. M., Kuvaldin A. V. GPE Observations to Assess the Conductivity of the Geological Environment. The Laboratory Experiment. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2017, Vol. 18, no. 3, pp. 5–16. [In Russ]. DOI 2010.21455/gr2017.3–1.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Александр Анатольевич<sup>1</sup> — канд. техн. наук, заведующий лабораторией геофизики, <https://orcid.org/0000-0003-3819-4309>, [Aleksandr.Zhukov@uralkali.com](mailto:Aleksandr.Zhukov@uralkali.com);  
 Пригара Андрей Михайлович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0129-6133>, [Andrey.Prigara@uralkali.com](mailto:Andrey.Prigara@uralkali.com);  
 Царев Роман Ильич<sup>1</sup> — старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7794-411X>, [Roman.Tsarev@uralkali.com](mailto:Roman.Tsarev@uralkali.com);  
 Ворошилов Владислав Алексеевич — ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0002-3459-9264>, [Vladislav.Voroshilov@uralkali.com](mailto:Vladislav.Voroshilov@uralkali.com);  
<sup>1</sup> АО «ВНИИ Галургии», 614002, Пермь, улица Сибирская, д. 94, Россия.  
**Для контактов:** *Ворошилов Владислав Алексеевич*, [Vladislav.Voroshilov@uralkali.com](mailto:Vladislav.Voroshilov@uralkali.com).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov A. A.<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, <https://orcid.org/0000-0003-3819-4309>, e-mail: [Aleksandr.Zhukov@uralkali.com](mailto:Aleksandr.Zhukov@uralkali.com)  
 Prigara A. M.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0129-6133>, [Andrey.Prigara@uralkali.com](mailto:Andrey.Prigara@uralkali.com);  
 Tsarev R. I.<sup>1</sup>, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7794-411X>, [Roman.Tsarev@uralkali.com](mailto:Roman.Tsarev@uralkali.com);  
 Voroshilov V. A.<sup>1</sup>, Lead Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-3459-9264>, [Vladislav.Voroshilov@uralkali.com](mailto:Vladislav.Voroshilov@uralkali.com);  
<sup>1</sup> JSC “VNII Galurgii”, 94 Sibirskaya st., Perm, 614002, Russia.  
**Corresponding author:** *Voroshilov V. A.*, e-mail: [Vladislav.Voroshilov@uralkali.com](mailto:Vladislav.Voroshilov@uralkali.com).

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 24.02.2022; принята к печати 10.04.2022.  
 Received by the editors 01.11.2021; received after the review 24.02.2022; accepted for printing 10.04.2022.