

## СПОСОБ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ВКМС

А.А. Жуков<sup>1,2</sup>, А.М. Пригара<sup>1</sup>, Р.И. Царев<sup>1</sup>, И.Ю. Шусткина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия, e-mail: Irina.Shustkina@uralkali.com

<sup>2</sup> ПАО «Уралкалий», Москва, Россия

**Аннотация:** Соляная толща Верхнекамского месторождения калийных солей характеризуется сложным строением. Наличие внутрисоляных деформаций затрудняет проведение подземных горных работ и может привести к потерям, а также разубоживанию калийных солей. В настоящее время на территории месторождения шахтная сейсморазведка широко применяется с целью изучения геологического строения и решения различных горнотехнических задач. Основной объем сейсморазведочных работ выполняется методом отраженных волн по методике общей глубинной точки. Однако по-прежнему актуальной остается проблема получения объективного отображения геологической среды, связанная с особенностями возбуждения упругих волн в шахтных условиях (особенности генерируемого волнового поля, закономерности его распространения, направленность источника). Разработан способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО ВНИИГ), позволяющий получить детальную геолого-геофизическую модель участка месторождения. За счет меньшей длины волны поперечных волн в сравнении с продольными достигается повышение разрешающей способности метода. Представлено обоснование информативности разработанного способа. Показаны результаты опробования методики выполнения полевых работ в условиях шахт, приведена методика разделения отражений, приходящих из разных полупространств. Полученные сейсмические разрезы характеризуются высокой контрастностью и четкой прослеживаемостью отражений.

**Ключевые слова:** Верхнекамское месторождение солей, внутрисоляные деформации, шахтная сейсморазведка, направленность источника, поперечные волны, разделение отражений.

**Для цитирования:** Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 121–136. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136.

### Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit

A.A. Zhukov<sup>1</sup>, A.M. Prigara<sup>1</sup>, R.I. Tsarev<sup>1</sup>, I.Yu. Shustkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> VNII Galurgii JSC, Perm, Russia, e-mail: Irina.Shustkina@uralkali.com

<sup>2</sup> Uralkali PJSC, Moscow, Russia

**Abstract:** Verkhnekamskoye salt strata have complex structure. Intra-salt deformation complicates underground mining and can result in loss and dilution of potash salt. Mine seismic survey is currently widely applied within the deposit to study its geological structure and solve various geotechnical tasks. The seismic survey mainly uses the common depth point method. However, the problem of

© А.А. Жуков, А.М. Пригара, Р.И. Царев, И.Ю. Шусткина. 2019.

objective description of geological environment remains of concern due to specificity of generation of elastic waves in mines (wave field features and propagation patterns, source directivity). The authors have developed a method of mine seismic survey on shear waves with separation of reflections arriving from different half-spaces. This method enables detailed geological and geophysical modeling of the deposit areas. S-waves are shorter in length than P-waves, which increases the method resolution. This article proves information capacity of the developed method. The field test results of the method in mine conditions and the technique of separation of interfering reflections from different half-spaces are presented. The obtained seismic cross-sections feature high contrast ratio as well as traceability and continuity of reflections.

**Key words:** Verkhnekamskoye salt deposit, intra-salt deformation, mine seismic survey, source directivity, shear waves, reflection separation.

**For citation:** 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. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;4:121-136. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136.

## Месторождение

Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) находится в пределах Пермского края на левобережье р. Кама. Месторождение комплексное: на его базе ведется добыча сильвинитов (сырье для производства калийных удобрений), карналлита (источник магния для титаномагниевого сплава), каменной соли (технической, кормовой, пищевой) и рассолов (сырье для производства соды, энергетика). Галогенная формация на месторождении имеет форму линзы площадью около 8,2 тыс. км<sup>2</sup>, прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном — до 56 км, представлена общей мощностью до 550 м и подразделяется (снизу-вверх) на подстилающую каменную соль (ПдКС), калийную залежь, состоящую из сильвинитовой (СП) и карналлитовой (КП) пачек, покровную каменную соль (ПКС) и соляно-мергельную толщу (СМТ). Нижняя часть СМТ, содержащая пласты каменной соли, носит название переходной пачки (ПП). Выше СМТ залегают терригенно-карбонатная толща (ТКТ), пестроцветная толща (ПЦТ) и четвертичные отложения (Q) [1].

## Актуальность и цель работы

Интенсивная добыча калийных солей порождает острую необходимость в лу-

боком всестороннем познании строения соляной толщи Верхнекамского месторождения и, в частности, внутрисоляных деформаций (ВСД) [2]. ВСД — это преимущественно складчатые деформации, которые, нередко характеризуются большой сложностью и интенсивностью, значительно затрудняют проведение подземных горных выработок и ведут к большим потерям и разубоживанию калийных солей. Поэтому без знания характера, особенностей строения и закономерностей пространственного распространения ВСД нельзя успешно решать вопросы по рациональному планированию и проведению горных работ и выбору новых шахтных полей. Всестороннее познание ВСД имеет и определенное теоретическое значение. Из-за отсутствия достаточно полных сведений об особенностях строения и закономерностях распространения ВСД среди геологов нет единства взглядов на формирование соляных структур ВКМС.

На сегодняшний день ВСД на ВКМС систематизированы геологами, однако эта систематизация указывает лишь на самые общие, «глобальные» закономерности строения месторождения, и по определению не может описать его с высокой детальностью, достаточной для решения задач планирования и прове-

дения горных работ. Указанную задачу можно решить лишь путем целенаправленного подробного изучения нужных участков. Поскольку информативность прямых методов (проходка горных выработок) сильно ограничена экономическими факторами, остается только одна возможность исследования ВСД с нужной детальностью — с помощью геофизических методов. Среди данных методов наилучшим комплексным показателем (глубина изучения — разрешающая способность) обладает шахтная сейсморазведка. Поэтому целью исследований выбрана разработка способа шахтной сейсморазведки, позволяющего оперативно получать детальную геолого-геофизическую модель изучаемого участка месторождения.

### **Состояние геофизических исследований**

В целом сейсморазведка для решения шахтных задач в мире применяется достаточно широко, как при наземных, так и при подземных (шахтных) исследованиях, в активном и в пассивном вариантах [3, 4—12, 14—16]. На ВКМС шахтная сейсморазведка на сегодняшний день широко применяется с целью изучения геологического строения и решения горнотехнических задач и выполняется с использованием как продольных (Р), так и поперечных (S) волн [10—12].

Большой объем таких исследований позволяет оперативно решать ряд горнотехнических задач, в частности выявлять аномалии геологического строения и учитывать их в ходе отработки продуктивных пластов, для чего рядом авторов разработаны программно-методические решения, применяемые в горном производстве [10—13]. Тем не менее, на сегодняшний день в практике применения шахтной сейсморазведки остается ряд нерешенных вопросов.

К примеру, по прежнему актуальной остается проблема получения объективного отображения геологической среды, что отражается на корректности геологических выводов.

### **Особенности возбуждения упругих волн в шахтных условиях**

Для решения как производственных, так и научных задач, важно знать особенности генерируемого волнового поля, закономерности его распространения и направленность источника. Для этого проанализирован ряд литературных источников и выполнены собственные исследования.

Анализ особенностей материалов шахтных исследований показывает [3, 5, 10—12, 14—16], что в рассматриваемых условиях наряду с Р-волной наблюдается интенсивная S-волна. Так, в работе [3] описывается факт наличия S-волн в регистрируемом волновом поле при продольном профилировании, и достаточно подробно рассматриваются особенности формирования поля упругих колебаний. Авторы при этом использовали метод преломленных волн. На сегодняшний день ряд авторов [4, 5, 10—12, 14, 16] продолжают активно заниматься вопросами шахтной сейсморазведки уже на базе метода отраженных волн по методике общей глубинной точки (МОВ ОГТ).

В работе [17] приводится информация о том, что максимальную интенсивность S-волны в безграничной однородной среде (что соответствует шахтным условиям), имеют в направлении, перпендикулярном направлению воздействия источника типа сосредоточенной силы (рис. 1, а). При этом из рисунка видно, что регистрация таких S-волн будет успешно выполняться теми же датчиками, что рассчитаны на регистрацию Р-волн, поскольку направление движения частиц у волн обоих типов, как видно из рис. 1, б, совпадает.

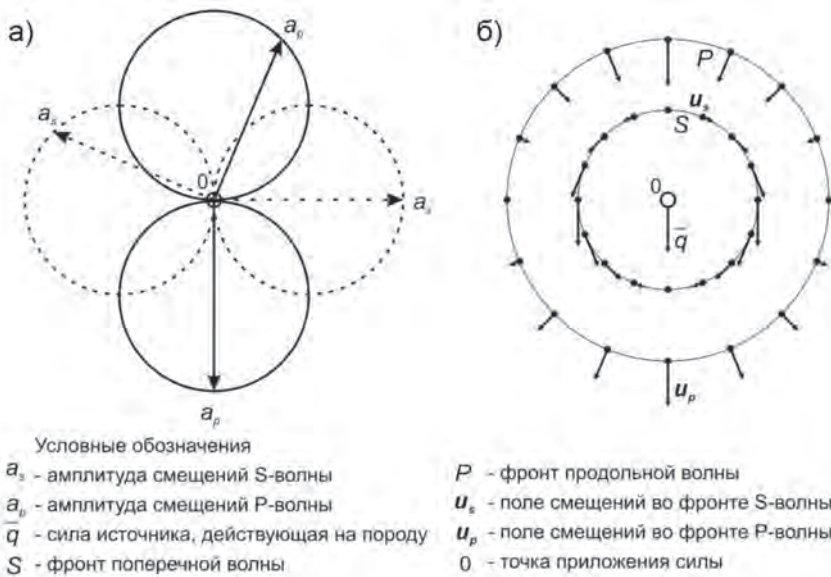


Рис. 1. Характеристика направленности идеального источника волн P и S типа сосредоточенной силы в однородной безграничной среде (а), распространение продольной и поперечной волн и смещение в них частиц среды для источника типа сосредоточенной силы (б) [17].

Fig. 1. Directivity characteristics of ideal source of P and S waves of concentrated force in homogeneous infinite medium (a), distribution of compression and shear waves and displacement of medium particles there for the source type of concentrated force (b) [17]

### Изучение направленности источника

Для уточнения направленности источника S-волн типа сосредоточенной силы в шахтных условиях выполнены собственные исследования. В ходе опытных сейсморазведочных работ по межштрековому просвечиванию в шахтных условиях (рис. 2) получены сейсмограммы с четкими первыми вступлением P- и S-волн (рис. 3), на которых отмечается изменение амплитуд первых вступлений в зависимости от координат пунктов приема (ПП) и пунктов возбуждения (ПВ), которые, в свою очередь, определяют угол выхода волны из ПВ и угол ее прихода к ПП.

По полевым сейсмограммам были оценены амплитуды первых вступлений S-волны и построены диаграммы распределения амплитуды S-волны в зависимости от координат ПП и ПВ (рис. 4 а, б). Для выяснения характеристики направ-

ленности S-волн от источника типа сосредоточенной силы были рассчитаны теоретические диаграммы распределения амплитуды S-волны для схемы, приведенной на рис. 2, из предположения о направленности источника под углом  $90^\circ$  (рис. 4 в, г) и  $45^\circ$  (рис. 4 д, е) по отношению к направлению удара. Расчеты выполнены с учетом геометрического расхождения, угла выхода волны из ПВ и угла прихода ее к каждому из ПП. Анализ полученных результатов указывает на наибольшую схожесть полевой диаграммы с теоретической, рассчитанной для направленности под углом  $90^\circ$  по отношению к направлению удара.

Таким образом подтвердились сведения, приведенные в [17], о том, что направленность S-волны, создаваемой точечным источником типа сосредоточенной силы в данных шахтных условиях (соли, размер выработки 5 на 3,5 м), перпендикулярна направленности P-вол-



Рис. 2. Схема опытных работ по сейсмическому просвечиванию  
Fig. 2. Diagram of experimental works on seismic survey

ны от того же источника. Иначе говоря, S-волна обладает наибольшей амплитудой в направлении, радиальном (перпендикулярном) относительно оси удара. С учетом приведенной информации

можно сделать вывод о том, что при вертикальных ударах источника, в условиях субгоризонтального залегания геологических слоев, отраженных S-волн наблюдается мало из-за практически полного



Рис. 3. Примеры сейсмограмм просвечивания: для ПВ 60 м (а) и 100 м (б)  
Fig. 3. Examples of seismic records: for source point 60 m (a) and 100 m (b)

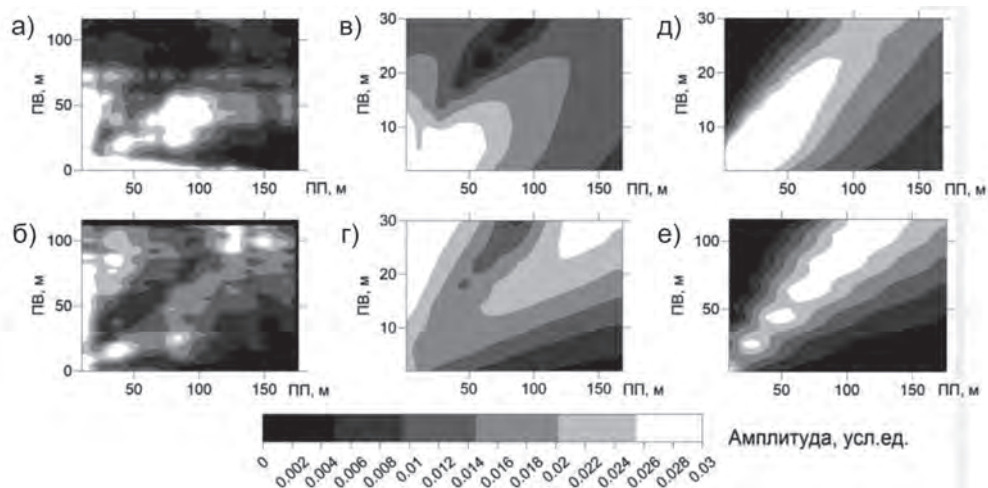


Рис. 4. Диаграммы распределения амплитуды S-волны в зависимости от координат ПВ и ПП для: исходных полевых материалов (а); нормированных полевых материалов (б); исходных теоретических результатов для угла направленности  $90^\circ$  (в); нормированных теоретических результатов для угла направленности  $90^\circ$  (г); исходных теоретических результатов для угла направленности  $45^\circ$  (д); нормированных теоретических результатов для угла направленности  $45^\circ$  (е)

Fig. 4. Diagrams of S-wave amplitude distribution depending on the position of source point and receiver point for: initial field materials (a); standardized field materials (b); initial theoretic results for directivity angle  $90^\circ$  (v); standardized theoretic results for directivity angle  $90^\circ$  (g); initial theoretic results for directivity angle  $45^\circ$  (d); standardized theoretic results for directivity angle  $45^\circ$  (e)

отсутствия отражающих объектов в горизонтальном направлении, за исключением соседних выработок. При горизонтальных ударах в этих же геологических условиях отраженные S-волны будут приходиться преимущественно сверху и снизу, и регистрируемое волновое поле будет результатом интерференции этих отражений [16]. Важно отметить, что для регистрации S-волн, приходящих сверху и снизу, наилучшим образом подходят горизонтально ориентированные сейсмоприемники, поскольку только при такой ориентации датчиков ось их ориентации будет совпадать с направлением движения частиц во фронте отраженной S-волны. То есть для изучения геологического разреза в вертикальной плоскости на ВКМС с использованием S-волн лучше всего использовать горизонтально ориентированные сейсмоприемники в сочетании с горизонтально направленным источником типа сосредоточенной силы.

В работе [16] показано, что S-волны в шахтных условиях ВКМС отличаются более высокой разрешающей способностью по сравнению с продольными волнами. Причина повышения разрешающей способности в том, что при практически одинаковом частотном составе P и S-волн, скорость у S-волн почти в два раза меньше. Это обеспечивает уменьшение длины волны и, как следствие, увеличение разрешающей способности почти в два раза. Однако отражения, приходящие с разных сторон от линии приема и интерферирующие друг с другом, необходимо разделять для получения разрезов, описывающих геологическое строение в нужном направлении от выработки [5].

### Способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах

На основе [16] и результатов исследований, описанных в данной работе, в АО «ВНИИ Галургии» (ВНИИГ) разработан

способ шахтных сейсморазведочных исследований геологического строения на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО ВНИИГ). Полевые работы выполняются с помощью МОВ МОГТ. Для зондирования вверх или вниз используются горизонтально направленные сейсмоприемники, они устанавливаются в отверстия, просверленные в стенке выработки. Возбуждение колебаний выполняется горизонтально направленными ударами также в стенку выработки. Поперечные волны при этом 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 как сверху, так и снизу.

Параметры расстановки и системы регистрации выбираются исходя из основных положений метода отраженных волн. В качестве примера можно привести следующие параметры расстановки и регистрации, подходящие для условий шахт ВКМС: шаг пунктов приема — 1–2 м, шаг пунктов возбуждения — 1–4 м, количество регистрируемых каналов — 48–96, кратность наблюдений не менее 12, шаг дискретизации не более 250 мкс, рекомендуемый — 100 мкс, длина записи не менее 500 мс. В качестве источника упругих колебаний используется кувалда 1–2 кг.

### **Способы разделения отражений**

Для разделения интерферирующих отраженных волн, приходящих с разных сторон к линии приема, разработан способ, состоящий из двух этапов — полевого и камерального. На полевом этапе возбуждение колебаний выполняется горизонтальными ударами в стенку по двум линиям, разнесенным друг от друга в плоскости исследований на расстояние, зависящее от длины волны. То есть в случае исследований вверх и вниз ли-

нии возбуждения располагаются около кровли и около подошвы выработки, при этом горизонтально-ориентированные датчики устанавливаются на любой удобной высоте. Такой подход дает разницу во времени прихода отражений порядка 1–2 мс (при скорости поперечных волн в солях порядка 2600 м/с) в зависимости от расстояния между линиями возбуждения, чего вполне достаточно для определения направления прихода упругой волны. Предлагаемая конфигурация системы наблюдений позволяет избежать очистки поверхности наблюдений от штыба, который оказывает негативное влияние на характеристики принимаемого сигнала. В результате установка сейсмоприемников в стенку выработки занимает гораздо меньше времени, чем в подошву (нет штыба) и в кровлю (не нужны специальные крепления и подъемник) и обеспечивает хороший контакт датчиков с горной породой.

На камеральном этапе полученные полевые данные позволяют сформировать два первичных временных или глубинных сейсмических разреза для поперечных волн, соответствующих двум линиям возбуждения. Первичные разрезы получают известным способом, характерным для МОВ МОГТ. Каждый из первичных разрезов содержит отражения как сверху, так и снизу (в случае зондирования вверх-вниз), и, что очень важно, эти отражения будут сдвинуты относительно друг друга за счет расстояния между линиями возбуждения. Так, отражения, пришедшие сверху, на разрезах для верхних пунктов возбуждения будут находиться на меньшем времени или «глубине», чем на разрезах для нижних пунктов возбуждения. И наоборот, отражения, пришедшие снизу, на разрезах для верхних пунктов возбуждения будут находиться на большем времени или глубине, чем на разрезах для верхних пунктов возбуждения.

Полученные таким способом первичные разрезы при совместном использовании позволяют на камеральном этапе разделить отражения, пришедшие со стороны разных линий возбуждения. Всего разработано три способа разделения отражений на камеральном этапе.

1. В разрез для верхних пунктов возбуждения вводятся отрицательные временные или глубинные поправки на расстояние между верхним и нижним рядом пунктов возбуждения. Полученный разрез потрассно вычитается из разреза для нижних пунктов возбуждения. В итоге получается окончательный разрез, преимущественно содержащий отражения, приходящие сверху.

В разрез для верхних пунктов возбуждения вводятся положительные временные или глубинные поправки на расстояние между верхним и нижним рядом пунктов возбуждения. Из полученного разреза потрассно вычитается разрез для нижних пунктов возбуждения. В итоге получается окончательный разрез, преимущественно содержащий отражения, приходящие снизу.

Равноценна обратная операция с тем же результатом, когда поправки вводятся в разрез для нижних пунктов возбуждения, и из него вычитается разрез для верхних пунктов возбуждения. В итоге получают два окончательных временных или глубинных разреза для поперечных волн, содержащих информацию о геологическом строении преимущественно сверху и снизу относительно выработки, в которой выполняют исследования. Далее в полученные разрезы могут быть введены поправки на рельеф выработки, выполнена привязка к данным бурения и выполнена интерпретация в рамках МОВ МОГТ. К достоинствам способа нужно отнести возможность его реализации в рамках уже существующих пакетов обработки сейсморазведочных данных.

2. Возможен и другой подход, в котором определяют направление прихода отражения и выполняют разделение волновых полей с помощью функции взаимной корреляции (ФВК). Для этого из первичных разрезов попарно выбираются трассы с одинаковыми координатами ОГТ, в окне рассчитывается ФВК между этими трассами, причем сдвиг при расчете ФВК делается и положительный, и отрицательный. Далее находится максимум ФВК, и по знаку сдвига — отрицательный или положительный — определяется направление прихода волны — сверху или снизу. Исходя из принятого решения, сигнал записывается в окончательный разрез либо для верхнего, либо для нижнего полупространства. После этого окно сдвигается, и операция повторяется до конца интервала анализа. Анализ и интерпретация полученных разрезов выполняется в рамках МОВ ОГТ. Сложность реализации данного подхода состоит в определении начала и конца отраженного сигнала.

3. Возможен третий, упрощенный подход, когда направление прихода отражения определяется либо визуально, по результатам анализа двух первичных разрезов, либо по пикировкам одноименных отражающих горизонтов для этих же разрезов. Решение о направлении прихода отражения принимается на основе следующего положения: отражения, пришедшие сверху, на разрезах для верхних пунктов возбуждения будут находиться на меньшем времени или глубине, чем на разрезах для нижних пунктов возбуждения. И наоборот, отражения, пришедшие снизу, на разрезах для верхних пунктов возбуждения будут находиться на большем времени или глубине, чем на разрезах для нижних пунктов возбуждения. Недостаток способа в том, что сами сейсмические записи не разделяются. Это ограничивает возможности интерпретации, в частности атрибутного



анализа, поскольку существует высокая вероятность того, что в интервал анализа попадут отражения и сверху и снизу.

Исследования можно выполнять не только в вертикальной, но и в любой другой плоскости. Так, для изучения геологического строения в горизонтальном направлении вся система наблюдений разворачивается на  $90^\circ$  вокруг оси выработки, то есть сейсмоприемники выбираются вертикальные, устанавливаются в почву или кровлю выработки, возбуждение S-волн выполняется вертикальными ударами в почву или кровлю выработки, линии возбуждения разносятся в горизонтальном направлении. Для исследования под углом, отличным от вертикального и горизонтального, нужно использовать всенаправленные или трехкомпонентные сейсмоприемники, а удары выполнять в направлении, перпендикулярном направлению исследований. При этом камеральная обработка проводится аналогично описанному слу-

чаю исследований в вертикальной плоскости.

### Апробация шахтной сейсморазведки ПВРО ВНИИГ

Для выяснения практических возможностей предлагаемого способа шахтной сейсморазведки выполнены опытные исследования на территории шахтного поля СКРУ-3. Отработан профиль длиной 878 м по пунктам приема. Использованы следующие параметры регистрации: шаг ПП = 2 м, шаг ПВ = 4 м, количество каналов в расстановке 92, система наблюдений переменная, от фланговой до центральной, средняя кратность 24, шаг дискретизации 0,25 мс, длина записи 512 мс, усиление 16 дБ, запись в открытом канале. Использована сеймостанция ТЕЛСС-3 в комплекте с горизонтально-ориентированными сейсмоприемниками GS-20DX, у которых угловой кронштейн заменен на обычную ножкуштырь, как у вертикальных сейсмоприем-

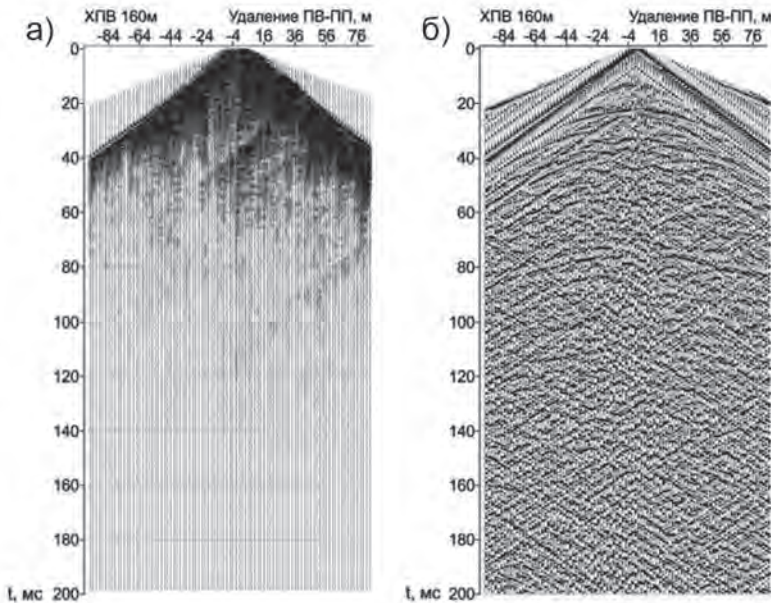


Рис. 5. Полевая сейсмограмма (а), и та же сейсмограмма после амплитудной коррекции, и полосовой фильтрации (б), по вертикальной оси — время, мс

Fig. 5. Field seismic record (a), and the same seismic record after amplitude correction and band-pass filtering (b), on vertical axis — time, ms

ников. Благодаря такой ножке датчики быстро и надежно крепились в заранее просверленные горизонтальные отверстия в стене выработки на высоте 1.5 м от ее подошвы. Возбуждение колебаний выполнялось небольшой кувалдой весом 1,5 кг, удары наносились в горизонтальной плоскости, перпендикулярно оси выработки, число накоплений — 5. Отработаны две линии пунктов возбуждения — одна около подошвы выработки, вторая на высоте около 2,5 м.

На рис. 5, а приведена типичная полевая сейсмограмма, записанная в ходе опытных работ, на которой отмечаются лишь первые вступления продольных (очень слабо) и поперечных волн, а также дифракции от сопряжений с другими выработками. Однако сразу после

первичной обработки (рис. 5, б) на записи становится видна масса годографов, большинство из которых относятся к S-волнам. При этом можно заметить, что форма многих годографов далеко не осесимметричная, их вершины хаотично разбросаны относительно нулевого удаления. Анализ показал, что это годографы дифрагированных волн, образованных на шарнирах складок.

Представленные сейсмограммы обработаны по обычной схеме, характерной для МОВ МОГТ, в результате чего получены первичные глубинные разрезы, соответствующие верхней и нижней линиям ПВ (рис. 6). На представленных разрезах четко видны отражения от границ, подвергнутых сильной складчатости, которая и привела к появлению на сейс-

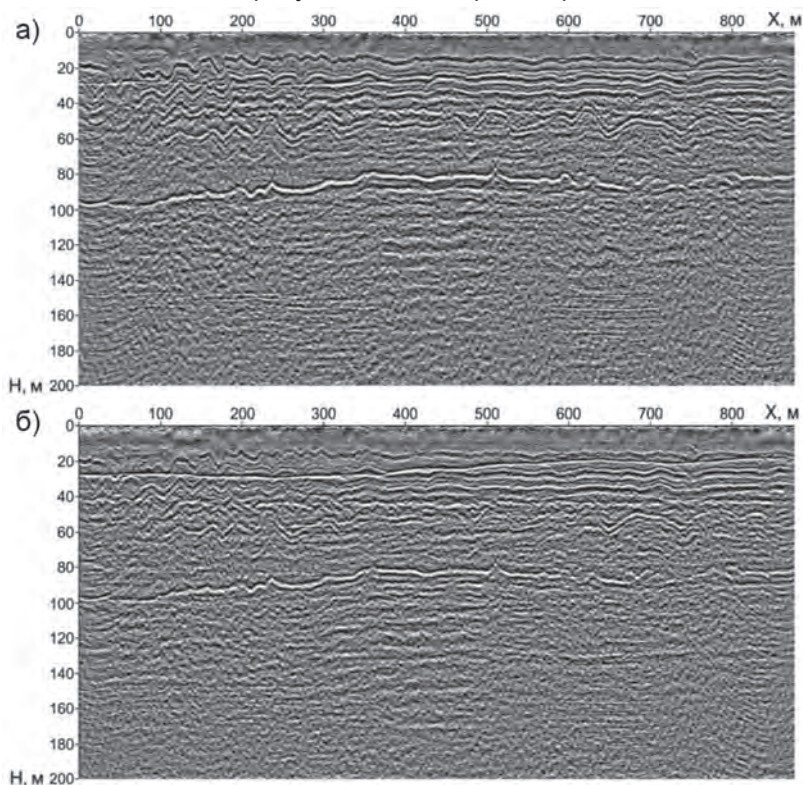


Рис. 6. Первичные глубинные разрезы для верхней (а) и нижней (б) линий ПВ, по вертикальной оси — расстояние от выработки, в которой проводились исследования

Fig. 6. Primary depth profiles for upper (a) and down (b) source point lines, on vertical axe — distance from the working where the survey was conducted

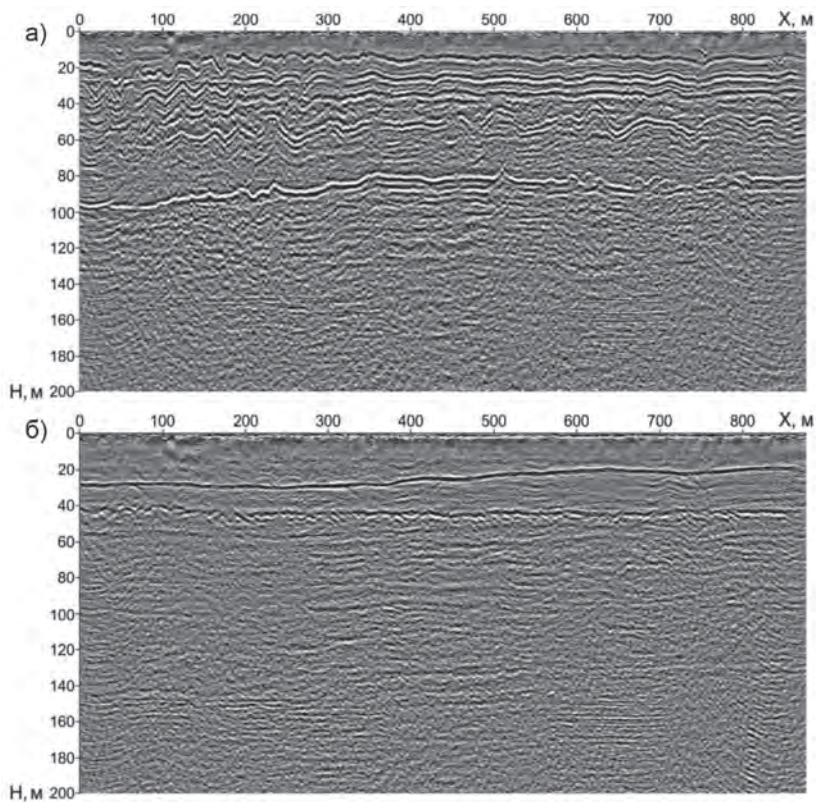


Рис. 7. Окончательные глубинные разрезы с отражениями сверху (а) и снизу (б), по вертикальной оси — расстояние от выработки, в которой проводились исследования

Fig. 7. Final depth profiles with reflections on top (a) and on bottom (b), on vertical axis — distance from the working where the survey was conducted

мограммах значительного количества годографов дифрагированных волн. Как видно из рисунка, разрезы во многом идентичны, за исключением некоторых деталей. Так, практически полностью повторяется структура складчатых отражающих границ с небольшим сдвигом по глубине за счет различной высоты линий ПВ. Эта разница сложно различима на глаз, однако при ближайшем рассмотрении она однозначно присутствует. Можно отметить разницу в амплитуде одноименных отражений и в целом меньшую контрастность временного разреза, относящегося к нижним ПВ. На данный момент, до проведения дополнительных исследований однозначно говорить о причинах различий нельзя, но можно

предположить, что они связаны с особенностями распространения упругих волн вблизи выработки.

После разделения волновых полей по способу № 1, описанному в настоящей статье, получены окончательные глубинные разрезы с отражениями, пришедшими сверху и снизу (рис. 7). Легко заметить значительную разницу между ними, которая указывает на высокое качество разделения полей отраженных волн, приходящих к приемной линии сверху и снизу. Особенно бросается в глаза тот факт, что на разрезе для отражений, пришедших снизу, четко проявилось отражение от пласта маркирующей глины (МГ), которое было практически неразличимо на первичных разрезах из-за интерфе-

ренции с отражениями, пришедшими сверху.

Нужно отметить и артефакты, связанные с не абсолютно идеальным разделением полей. Так, на разрезе верхних отражений отмечается очень слабое отражение от штрека, находящегося ниже выработки, а на разрезе нижних отражений заметны слабые «фантомные» отражения от складчатых отражающих границ, находящихся выше выработки. Тем не менее, установить основные особенности геологического строения по полученным разрезам не представляет затруднений.

В окончательные глубинные разрезы введены поправки на рельеф выработки, после чего они объединены в сводный глубинный разрез, для которого

выполнена привязка к скважине, находящейся в 170 м к северу от профиля исследований (рис. 8).

Привязка указывает на соответствие полученных геофизических данных геологическому строению, установленному по результатам бурения. Так, на абсолютных отметках +45±5 м отмечается сильная отражающая граница, отождествляемая с кровлей покровной каменной соли. Далее, вниз по разрезу, идет толща каменных солей мощностью в среднем около 30 м, в интервале которой не отмечается контрастных отражающих границ. Ниже залегают карналлиты, подвергнутые наиболее интенсивной складчатости, а еще ниже, непосредственно над выработкой и в ее пределах — сильвинитовые пласты.

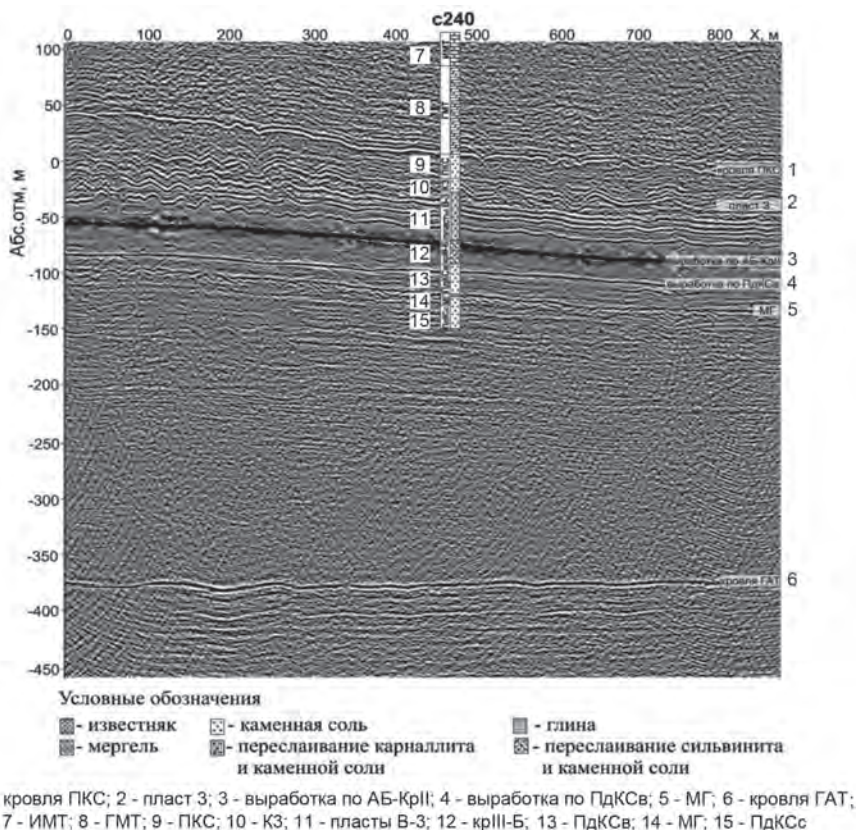


Рис. 8. Сводный глубинный разрез с литологической колонкой (сильно укрупнена)

Fig. 8. Composite depth profile with lithology column (enlarged much)

Ниже выработки, в которой выполнены работы (выработка по пластам АБ-КрII), очень четко прослеживается штрек, пройденный в верхней пачке подстилающей каменной соли (ПдКСв). Его форма, определяемая по разрезу, совпадает с истинным положением, зафиксированным по маркшейдерским наблюдениям. Следующей контрастной границей, отмечаемой на рис. 8, является отражение от пласта МГ, залегающего в подошве ПдКСв. Далее на более чем двести метров залегают каменные соли, которые прерываются кровлей глинисто-ангидритовой толщи (ГАТ). В интервале ПдКС ниже МГ контрастных отражений не отмечается. Также можно заметить, что в непосредственной близости от рабочей выработки отражений не отмечается. Такой эффект может быть вызван двумя причинами — низким акустическим контрастом залегающих в этом интервале геологических границ, и особенностями метода МОВ МОГТ, ограничивающими возможности изучения мелко залегающих границ. Частично вторая причина может быть устранена путем уменьшения шага ОГТ.

Необходимо отметить высокий контраст и четкую прослеживаемость полученных отражений, что указывает, во-первых, на выдержанность геологических границ, а во-вторых, на высокий потенциал разработанного способа с точки зрения решения производственных и научных задач. По сути, впервые получено сейсмическое изображение соляной толщи ВКМС такого уровня детальности и достоверности, поэтому на данный момент актуальной задачей является изучение перспектив способа шахтной сейсморазведки ПВРО ВНИИГ. На сегодняшний день можно очертить следующий круг задач, возникающих в среде специалистов по геологии и горному делу, решение которых возможно с помощью разработанного способа:

- детальное изучение геологического строения месторождения;
- уточнение контуров аномалий, выявленных проходкой горных выработок или другими геофизическими методами;
- уточнение структуры соляной залежи;
- обнаружение нарушений в водо-защитной толще (ВЗТ);
- обнаружение и изучение особенностей ВСД;
- изучение состава (полноты) ВЗТ;
- мониторинг изменения свойств массива горных пород после отработки;
- получение исходных данных, необходимых для геомеханических расчетов;
- обнаружение зон, опасных по газодинамическим явлениям (ГДЯ);
- предварительная оценка строения интервала залежи, планируемого к отработке, особенно карналлитовых пластов, подверженных наиболее интенсивной складчатости.

Фактические возможности в деле решения указанных задач будут определены в ходе дополнительных исследований.

## **Выводы**

В результате исследований разработан способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений, который позволяет решать ряд актуальных задач, стоящих перед производственниками и учеными. Способ основан на использовании S-волн как наиболее информативных в условиях шахт ВКМС, он обеспечивает максимально достижимую, без перехода в область акустических частот, разрешающую способность. Способ включает в себя:

- методику выполнения полевых работ на S-волнах в условиях шахт;
- методику разделения отражений, приходящих из разных полупространств.

Дальнейшие исследования в этом направлении предполагается посвятить

более детальному изучению особенностей распространения упругих волн в непосредственной близости от выработки, в которой выполняются исследования, а также совершенствованию способа шахтной сейсморазведки ПВРО ВНИИГ, как в плане аппаратуры и методики выполнения полевых работ, так и в плане обработки и интерпретации получаемых результатов. Также предполагается вы-

полнить исследования в шахтах других горнорудных предприятий, в том числе не связанных с месторождениями солей, поскольку вероятность работоспособности способа в других геологических условиях очень высока.

Описанный в статье способ шахтной сейсморазведки включен в заявку на выдачу патента на изобретение, поданную авторами в Роспатент.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. — М.: Изд. Эпсилон Плюс. 2013.
2. Голубев Б. М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. — Пермь: ПГНИУ, 1972.
3. Савич А. И., Коптев В. И., Никитин В. Н., Яценко З. Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. — М.: Недра, 1969.
4. Вагин В. Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. — Минск: БелНИЦ «Экология», 2010.
5. 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.
6. Bingzong Zhou, Peter Hatherly, Troy Peters. Cola seismic surveying over near-surface basalts: Experience from Central Queensland, Australia // Geophysics, vol. 79, No 2 (March 2014); pp. B109–B122.
7. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity // Geophysics, vol. 84, No 1 (January-February 2019), pp. B41–B57.
8. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China // Geophysics, vol. 81, No 5 (September-October 2016); pp. B149–B165.
9. Stewart A. Greenhalgh, Iain M. Masonz, Cvetan Sinadinovski In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. Geophysics, vol. 65, No 6 (November-September 2016); pp. 1908–1919.
10. Бабкин А. И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 1. — С. 261–267.
11. Санфиоров И. А., Бабкин А. И. Горно-геологические приложения сейсморазведочных исследований во внутренних точках среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 10.
12. Бабкин А. И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2001.
13. Пригара А. М. Прогноз строения и свойств горного массива на основе сейсмомоделирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2003.
14. Кулагов Е. В. Особенности сейсмических волн, возбуждаемых в массиве соляных пород на Старобинском месторождении // Литасфера. — 2012. — № 2 (37).
15. Gendzwil D. J., Randy Brehm. High-resolution seismic reflections in a potash mine // Geophysics, vol. 58, No 5 (May 1993); p. 741–748.
16. Царев Р. И., Пригара А. М., Жуков А. А. Возможности сейсморазведки на поперечных волнах / Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика». — Геленджик, 2019.

## REFERENCES

1. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley*. 2-e izd. [Verkhnekamskoye salt deposit. 2nd edition], Moscow, Izd. Epsilon Plyus. 2013.
2. Golubev B. M. *Stroenie solyanoy tolshchi Verkhnekamskogo mestorozhdeniya* [Structure of salt mass of Verkhnekamskoye deposit], Candidate's thesis, Perm, PGNIU, 1972.
3. Savich A. I., Koptev V. I., Nikitin V. N., Yashchenko Z. G. *Seysmoakusticheskie metody izucheniya massivov skal'nykh porod* [Seismic methods of studying rock mass], Moscow, Nedra, 1969.
4. Vagin V.B. *Shakhtnye seismicheskie metody izucheniya stroeniya massivov solyanykh porod* [Mine seismic methods of studying structure of saliferous rock mass], Minsk, BelNITS «Ekologiya», 2010.
5. Vagin V.B., Efimov A.M., Kulagov E.V. Research and assessment of state of water proof formation over potash horizons with geophysical methods. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 2, pp. 11–15. [In Russ].
6. Bingzong Zhou, Peter Hatherly, Troy Peters. Cola seismic surveying over near-surface basalts: Experience from Central Queensland, Australia. *Geophysics*, vol. 79, No 2 (March 2014); pp. B109–B122.
7. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity. *Geophysics*, vol. 84, No 1 (January-February 2019), pp. B41–B57.
8. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China. *Geophysics*, vol. 81, No 5 (September-October 2016); pp. B149–B165.
9. Stewart A. Greenhalgh, Iain M. Masonz, Cvetan Sinadinovski In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*, vol. 65, No 6 (November-September 2016); pp. 1908–1919.
10. Babkin A.I. Spatial groupings of seismoacoustic monitoring under conditions of mining workings of potash mines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 1, pp. 261–267. [In Russ].
11. Sanfirov I.A., Babkin A.I. Mining-geological applications of seismic surveys in internal medium points. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no 10. [In Russ].
12. Babkin A.I. *Shakhtnaya seysmoakustika po metodike mnogokratnykh perekrytiy (na primere Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley)* [Mine seismoacoustics on multi-fold reflection surveying procedure (on the example of Verkhnekamskoye potash salt deposit)], Candidate's thesis, Perm, Gornyy institut UrO RAN, 2001.
13. Prigara A.M. *Prognoz stroeniya i svoystv gornogo massiva na osnove seysmomodelirovaniya* [Forecast of rock mass structure and properties based on seismic modelling], Candidate's thesis, Perm, Gornyy institut UrO RAN, 2003.
14. Kulagov E.V. Features of seismic waves excited in saliferous rock mass in Starobinskoye deposit. *Litasfera*. 2012, no 2 (37). [In Russ].
15. Gendzwill D.J., Randy Brehm. High-resolution seismic reflections in a potash mine. *Geophysics*, vol. 58, No 5 (May 1993); p. 741–748.
16. Tsarev R.I., Prigara A.M., Zhukov A.A. Vozmozhnosti seysmorazvedki na poperechnykh volnakh [Возможности сейсморазведки на поперечных волнах]. *Materialy konferentsii EAGE «Inzhenernaya i rudnaya geofizika»*. Gelendzhik, 2019.
17. Boganic G.N., Gurvich I.I. *Seysmorazvedka: uchebnik dlya vuzov* [Seismic survey: textbook for higher education], Tver', Izd-vo AIS, 2006.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Александр Анатольевич<sup>1</sup> — руководитель направления геофизики дирекции по геологии, ПАО «Уралкалий»; заведующий лабораторией, e-mail Aleksandr.Zhukov@uralkali.com,

Пригара Андрей Михайлович<sup>1</sup> — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com,  
Царев Роман Ильич<sup>1</sup> — ведущий инженер, e-mail: Roman.Tsarev@uralkali.com,  
Шусткина Ирина Юрьевна<sup>1</sup> — ведущий инженер, e-mail: Irina.Shustkina@uralkali.com.  
Для контактов: Шусткина И.Ю., e-mail: Irina.Shustkina@uralkali.com

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Zhukov<sup>1</sup>, Head of Geophysics Section of Geology Directory, Uralkali PJSC, Moscow, Russia; Head of Laboratory, e-mail: Aleksandr.Zhukov@uralkali.com,  
A.M. Prigara<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com,  
R.I. Tsarev<sup>1</sup>, Leading Engineer, e-mail: Roman.Tsarev@uralkali.com,  
I.Yu. Shustkina<sup>1</sup>, Leading Engineer, e-mail: Irina.Shustkina@uralkali.com,  
<sup>1</sup> VNI Galurgii JSC, 614000, Perm, Russia.  
**Corresponding author:** I.Yu. Shustkina, e-mail: Irina.Shustkina@uralkali.com.



---

## РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

---

### ПРИМЕНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОРАБОТКИ АЛМАЗОДОБЫВАЮЩИХ КАРЬЕРОВ

(№ 1180/04—19 от 18.03.2019, 10 с.)

Андросов Артур Дмитриевич<sup>1</sup> — доктор технических наук, профессор  
Петрова Любовь Владимировна<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: eL\_Pi@mail.ru,  
Сивцева Алена Ивановна<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: alyona\_archibald@mail.ru,  
<sup>1</sup> Горный институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

В связи с переходом горных работ на глубокие горизонты в условиях алмазодобывающих карьеров АК «АЛРОСА» предложена технологическая схема доработки карьера с применением подземных выработок, благодаря которым значительно сокращаются не только дальность транспортирования горных пород, но и объемы дополнительной вскрыши для выемки целиков, и в целом, увеличивается эффективность освоения месторождения на значительных глубинах. Приведено описание технологии предложенной технологической схемы доработки глубоких кимберлитовых карьеров с применением системы открытых и подземных выработок, в результате проведения которых сокращаются трудозатраты, связанные с производством дополнительной вскрыши для извлечения целиков, также отмечается экономический эффект от реализации технического решения на одном карьере, рассчитаны показатели экономической эффективности.

Ключевые слова: кимберлитовая трубка, алмазодобывающий карьер, комбинированная разработка месторождений, траншея, подземные горные выработки, спиралевидные стволы, спиральный съезд, бортовой целик руды, выемка целиков, доработка карьера.

## APPLICABILITY OF UNDERGROUND MINING FOR IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF DIAMOND QUARRIES

A.D. Androsov<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
L.V. Petrova<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: eL\_Pi@mail.ru,  
A.I. Sivceva<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: alyona\_archibald@mail.ru,  
<sup>1</sup> Mining Institute, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, 678000, Yakutsk, Russia.

In connection with the transfer of mining operations to deep horizons in the conditions of the diamond-mining quarries of ALROSA a technological scheme for quarrying with use of underground workings is proposed. And there is not only the transportation distance of rocks, but also additional overburden for excavation pillars are significantly reduce, and in general, there is increase of efficiency of development of the field at considerable depths. The article describes the technology of the proposed technological scheme for quarrying deep kimberlite pipes using a system of open and underground mines, as result there is reducing of labor effort associated with producing additional overburden to excavation of ore pillar, the economic effect of implementing a technical solution on one open pit is shown, and indicators of economic efficiency are calculated.

Key words: kimberlite pipe, diamond-quarry, combined mining, goffan, underground minings, spiral shafts, spiral ramp, ore pillar of pit wall, excavation of ore pillar, quarrying.