

ЭРОЗИОННЫЕ ВРЕЗЫ В СОЛЯХ. ОБНАРУЖЕНИЕ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКОЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИХ ПРИРОДЫ

А.М. Пригара^{1,2}, Д.С. Грибков¹, В.Н. Аптуков^{1,2}, Р.И. Царев¹, А.А. Жуков¹

¹ АО «ВНИИ Галургии», Пермь, Россия, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Аннотация: Представлены результаты шахтной сейсморазведки методом отраженных волн по методике общей глубинной точки на поперечных волнах с разделением отражений, их геологическая интерпретация и геомеханическое обоснование природы выявленных структур. Разработанный авторами статьи способ разделения волновых полей позволил впервые в истории геологоразведки Верхнекамского месторождения солей в явном виде обнаружить геологические структуры, известные в структурной геологии, но ни разу не зафиксированные ранее на Верхнекамском месторождении. Подробно рассмотрена геологическая интерпретация эрозионного вреза, обнаружение которого является важным шагом на пути к безопасной эксплуатации калийных рудников. Перечислены условия формирования эрозионных врезов и приведено геомеханическое обоснование процесса формирования трещин в сводовой части поднятий. Показано, что разработанный способ позволяет значительно повысить детализацию и достоверность формируемых геологических моделей. Введение сейсморазведочных работ на поперечных волнах с разделением отражений в практику опережающих геологоразведочных работ позволяет сделать их более информативными, выявить аномалии, локализация которых была ранее недоступна, и, следовательно, резко снизить риск возникновения аварийных ситуаций при подземной отработке Верхнекамского месторождения солей.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение солей, геофизика, метод отраженных волн, методика общей глубинной точки, способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений, геология, геомеханика, эрозионный врез, зона трещиноватости, водозащитная толща, инверсионный рельеф, антиклиналь, трещины отрыва.

Для цитирования: Пригара А. М., Грибков Д. С., Аптуков В. Н., Царев Р. И., Жуков А. А. Эрозионные врезы в солях. Обнаружение шахтной сейсморазведкой и геомеханическое обоснование их природы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 72–85. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_72.

Erosion channels in salt – Seismic surveying and geomechanical substantiation

A.M. Prigara^{1,2}, D.S. Gribkov¹, V.N. Aptukov^{1,2}, R.I. Tsarev¹, A.A. Zhukov¹

¹ «VNII Galurgii» JSC, Perm, Russia, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com

² Perm State National Research University, Perm, Russia

Abstract: This article describes the in-mine seismic survey results obtained by the CDP-based method of reflected shear waves with separation of reflections, geological interpretation of the results and geomechanical substantiation of the nature of the revealed structures. For the first time in history of geological exploration of the Upper Kama salt deposit, the authorial method of separation of the wave fields has allowed the discovery of geological structures known in the structural geology but never recorded at the deposit under discussion. This article examines in details the geological interpretation of erosion channels as their detection is a major measure of operational safety in potash mines. The mechanism of erosion channeling is described, and fracturing of the crests of heaves is provided with a geomechanical substantiation. The developed method substantially improves the comprehensiveness and reliability of geological modeling. The introduction of the shear wave seismic exploration with separation of reflections in the advanced prospecting practice makes the latter more informative, and enables earlier impossible detection and localization of anomalies, which greatly reduces the risk of accidents in underground mining of salts at the Upper Kama deposit.

Key words: Upper Kama salt deposit, geophysics, seismic reflection method, common depth point method, shear wave seismic exploration with separation of reflections, geology, geomechanics, erosion channel, fracturing zone, waterproof strata, inversion relief, anticline, tensile cracks.

For citation: Prigara A. M., Gribkov D. S., Aptukov V. N. , Tsarev R. I., Zhukov A. A. Erosion channels in salt — Seismic surveying and geomechanical substantiation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):72-85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_72.

Объект исследований

Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) является одним из крупнейших в мире и находится в Пермском крае, на левом берегу р. Кама. Месторождение комплексное, здесь ведется добыча сильвинита для производства калийных удобрений, карналлита для производства титаномагниевого сплава и каменной соли. Соляная толща имеет форму линзы площадью около 8,2 тыс. км², прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном — до 56 км, мощность ее составляет до 550 м. Толща подразделяется (снизу вверх) на подстилающую каменную соль (ПдКС), в нижней части которой залегают слои мергелей, калийную залежь, состоящую из сильвинитовой (СП) и карналлитовой пачек (КП), покровную каменную соль (ПКС). Перекрывается соляная толща соляномергельной толщей (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 — 3]. Также геологами выделяется условная (не стратиграфическая) граница под названием соляное зеркало (СЗ) — это поверхность, соединяющая первые сверху слои солей.

Актуальность и цель исследований

При подземной разработке ВКМС, как и других месторождений растворимых полезных ископаемых, основным критерием безопасности является недопущение проникновения в рудник слабоминерализованных вод [4]. В случае ВКМС это достигается за счет сохранения водозащитной толщи (ВЗТ), отделяющей горные выработки от надсолевых

водоносных горизонтов. Обычно ВЗТ состоит из чередующихся продуктивных пластов и пластов каменной соли, карналлитовой и сильвинитовой пачек, покровной каменной соли и ритмов переходной пачки соляных и несоляных пород. Общая мощность ВЗТ — это расстояние по вертикали от СЗ до кровли верхней выработки. Сохранности ВЗТ как залого безопасной эксплуатации рудников уделяют пристальное внимание на всех этапах освоения месторождения.

Количество разведочных скважин с земной поверхности сводится к минимуму, поскольку их проходка приводит к потере запасов в околоскважинных целиках и повышению опасности проникновения воды в соляные выработки. В результате о строении ВЗТ и положении ее кровли (СЗ) на значительном межскважинном расстоянии можно судить только по косвенным методам, среди которых основную роль играет геофизика. Поскольку риски потери соляных рудников на сегодняшний день по-прежнему весьма высоки [4–6], развитие геофизических методов и методик изучения ВЗТ продолжает оставаться актуальной задачей.

Метод исследований

В мировой практике для изучения залегания горных пород в целом и солей в частности геофизика применяется достаточно широко. Активно применяются электромагнитные методы [7, 8], но наиболее информативным методом является сейсморазведка, как в подземном [10, 11] так и в наземном [12–15] вариантах. Положительные результаты получают также исследователи из России [16–20] и ближнего зарубежья [21, 22]. В 2018 г. специалистами научно-исследовательской лаборатории геофизики АО «ВНИИ Галургии» был разработан способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отраже-

ний (ПВРО) [23–25]. Данный способ основан на широко известном методе отраженных волн по методике общей глубинной точки (МОВ МОГТ).

Как показали теоретические и натурные исследования [26, 27], способ шахтной сейсморазведки ПВРО позволяет разделять отражения, приходящие из разных полупространств, и уверенно проследить контакт соляных пород с несоляными, а также изучать строение всей галогенной формации, в том числе ВЗТ. На описанный способ авторами получен патент РФ [28].

Центральная частота сигнала при шахтных сейсморазведочных исследованиях способом ПВРО в соляных рудниках составляет порядка 500 Гц, скорость распространения поперечных волн порядка 2500 м/с, интервал исследуемых расстояний от 10 до 300 м во всех направлениях от шахтной выработки. Теоретические значения вертикальной разрешающей способности при таких условиях составляют 1,25 м, а горизонтальной — от 2,6 до 13,7 м, в зависимости от глубины залегания исследуемого объекта [27]. Значения теоретической разрешающей способности подтверждаются на практике возможностью выделения тонких пластов карналлитовой породы в КП, мергелей и глин в ПП и ПдКС.

Для регистрации упругих колебаний используются горизонтально ориентированные датчики, которые устанавливаются в стенку выработки на прямой ножке. Возбуждение колебаний выполняется в горизонтальном направлении 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.

Для разделения интерферирующих отраженных волн разработан способ, состоящий из двух этапов — полевого и камерального [23, 28]. На полевом этапе возбуждение колебаний выполняется по двум линиям, разнесенным друг от друга в вертикальной плоскости. На камеральном этапе из полученных полевых данных формируются два набора сейсмограмм, соответствующих двум линиям возбуждения, верхней и нижней. Исходные сейсмограммы содержат отражения, пришедшие как сверху, так и снизу, однако эти отражения сдвинуты относительно друг друга за счет расстояния между линиями возбуждения. Например, отражения, пришедшие сверху, на сейсмограммах для верхних пунктов возбуждения будут находиться на меньшем времени, чем на сейсмограммах для нижних пунктов возбуждения.

В процессе обработки в сейсмограммы вводятся поправки за расстояние между верхней и нижней линиями пунктов возбуждения (ПВ). Сейсмограммы с введенными поправками потрассно вычитаются, после чего получается два набора сейсмограмм, преимущественно содержащих отражения, приходящие сверху и снизу. Далее следует этап обработки, с графом, характерным для МОВ МОГТ, но с некоторыми особенностями [25].

Новая геологическая информация

Строение площади, на которой проводились сейсморазведочные исследования и получены новые геологические сведения, в целом характерно для ВКМС — глубины залегания промышленных пластов изменяются от 150 до 300 м, при этом мощность ВЗТ за пределами поднятия превышает 100 м, а к своду поднятия уменьшается до 50 м и менее.

Надсолевой разрез представлен трещиноватыми, интенсивно обводненными породами ТКТ и СМТ. Калийная толща

залегает на ПдКС, мощность которой более 200 м.

Скважины с поверхности земли на этапе разведки бурились по сети 2×2 км. По результатам бурения на присводовом участке выделена аномальная зона в строении ВЗТ, где отработка запрещена. Профиль шахтной сейсморазведки ПВРО пересекает свод поднятия и его восточное крыло.

На рис. 1 показан фрагмент сейсморазведочного разреза по рассматриваемому профилю, полученного способом ПВРО. В прикупольной части поднятия наблюдается инверсионный рельеф с растворением верхних частей ВЗТ — на разрезе четко выделяется чашеобразный прогиб соляного зеркала, в пределах которого, в свою очередь, отмечается аномальная каньонообразная структура — эрозионный врез.

В данном случае угрозы руднику нет, поскольку рабочая выработка, в которой выполнены сейсморазведочные исследования, является одиночной, и мощность ВЗТ составляет более 40 м. Однако существует вероятность встречи участков с аналогичным геологическим строением, но более опасных, с риском затопления рудников. Такая вероятность со временем увеличивается, поскольку в отработку вовлекаются новые площади месторождения, где развиты антиклинальные поднятия.

Чашеобразные прогибы в прикупольной части поднятия хорошо известны как в целом в структурной геологии, так и на ВКМС. Однако детальность при картировании этих и других структур на ВКМС была очень низкой ввиду ограниченных возможностей использовавшихся ранее геофизических методик и относительно редкой сети бурения. Обычно, до проходки выработок, положение СЗ получали путем интерполяции между скважинами. Поскольку для ВКМС в целом характерно согласное залегание

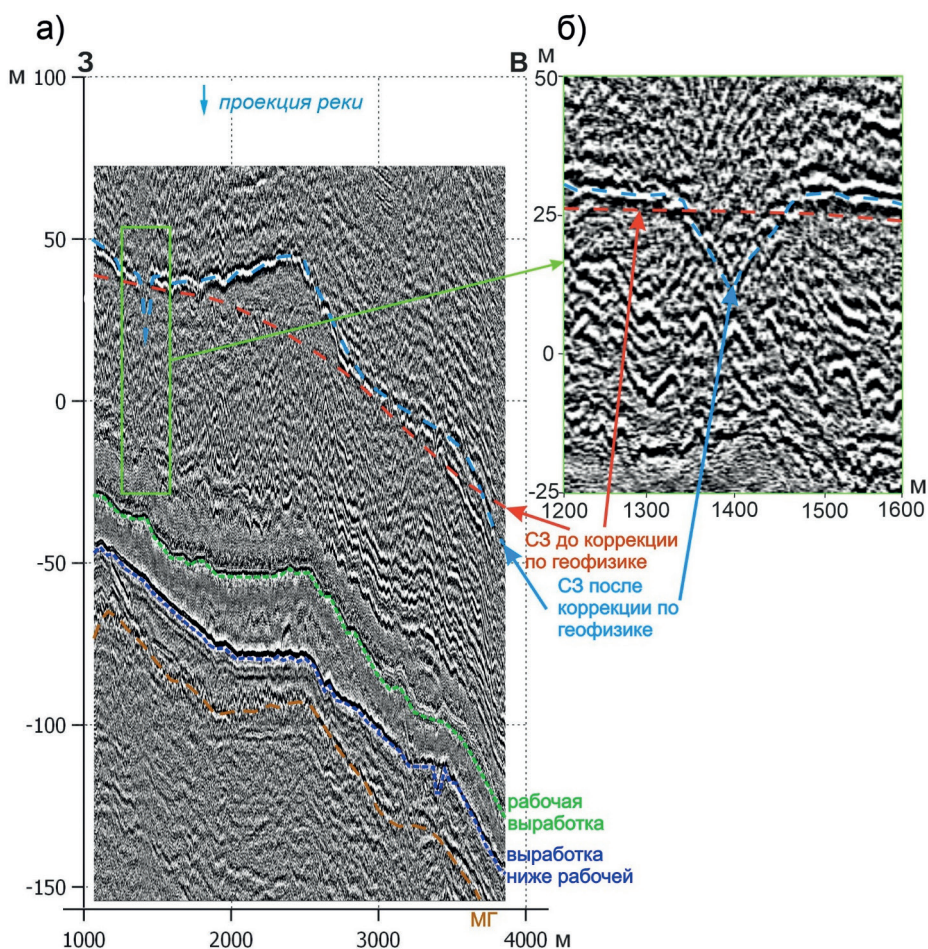


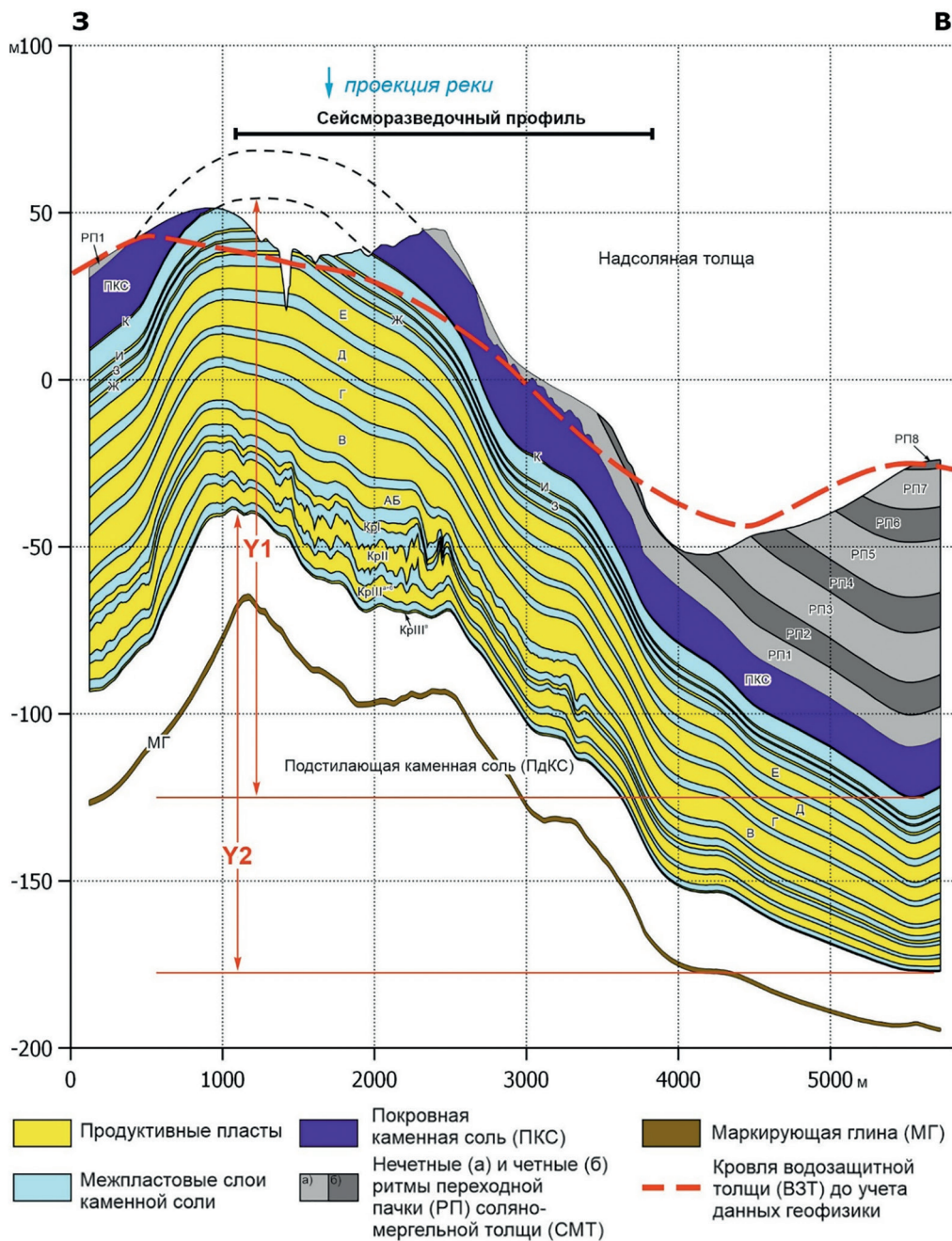
Рис. 1. Глубинные разрезы ПВРО: фрагмент сейсморазведочного разреза способом ПВРО, проходящего через свод поднятия (а); увеличенная часть разреза в области каньонообразного эрозионного вреза (б)

Fig. 1. SWSR depth sections: fragment of the SWSR seismic section passing through the uplift(a); enlarged part of the section in the area of the canyon-like erosion incision (b)

ние пластов, начиная от маркирующей глины (МГ) и заканчивая ПП [1, 2], после проходки выработок рельеф СЗ можно было в какой-то мере уточнить согласно информации о залегании отрабатываемых пластов. При этом в случаях, когда на поднятиях идет активное растворение солей и, как следствие, возникают условия для формирования каньонообразных эрозионных врезов, предугадать фактическое положение СЗ и мощность ВЗТ в промежутках между скважинами

практически невозможно. Поэтому ранее такие каньонообразные структуры по кровле ВЗТ на Верхнекамском месторождении солей не обнаруживались.

Использование сейсморазведки способом ПВРО позволило значительно уточнить геологическую модель рассматриваемой площади (рис. 2). Жирной красной штриховой линией показано положение кровли ВЗТ до уточнения по данным геофизики. Очевидно, что в результате применения способа ПВРО детальность



Черным пунктиром восстановлено вероятное положение ПКС до растворения;

Y1 – стрела прогиба ПКС; Y2 – стрела прогиба подошвы калийной залежи (пласта КрIIIв)

Рис. 2. Геологический разрез калийной залежи по линии I-I, уточненный по данным геофизических исследований

Fig. 2. Geological section of the potassium deposit along the line I-I, refined according to geophysical survey data

модели ВЗТ резко возросла — предполагаемая форма инверсионного рельефа по СЗ изменилась с пологой и ровной на сложную и изрезанную. Максимальное отклонение фактического положения СЗ от предполагаемого без учета сейсморазведки ПВРО достигло 30 м при мощности ВЗТ 70 м (ПК 2100 м). Также особое внимание привлекает к себе каньонообразная структура на ПК 1070 м, в пределах которой мощность ВЗТ сокращается относительно предполагаемой ранее на 15 м. Привлечение сейсморазведки ПВРО позволило скорректировать карту мощности ВЗТ (рис. 3) и показать положение каньонообразной структуры, которая находится в осевой части поднятия.

Природа наблюдаемого явления

Происхождение наблюдаемого каньонообразного погружения соляного зеркала связывается нами с трещинами от-

рыва, развивающимися в сводах антиклинальных поднятий. Как известно [29], в изометричных куполах трещины отрыва развиваются по радиусам и концентрически, а в овальных (брахиформных) и линейных антиклиналях появляются два направления трещин отрыва, параллельные длинной и короткой оси (рис. 4). Опыт проходки выработок в сильвинитовой пачке показывает, что трещины в соли встречаются относительно часто, поэтому их образование в кровле солей также вполне ожидаемо.

Подсечь подобные трещины в кровле ВЗТ скважинами практически невозможно. Обнаружить геофизическими методами, в том числе ПВРО, ввиду их малого раскрытия, тоже маловероятно. Однако в результате расширения трещины эрозийными процессами ослабленная зона приобретает каньонообразную форму и обширные размеры, достаточные для

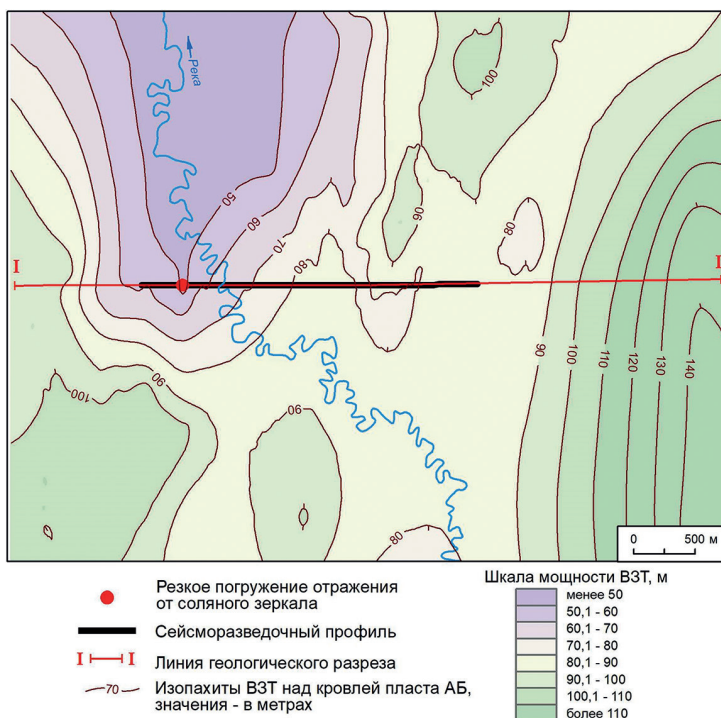


Рис. 3. Карта мощности ВЗТ в районе исследований с учетом данных геофизики

Fig. 3. The map of the thickness of water-proof layer in the study area, taking into account geophysical data

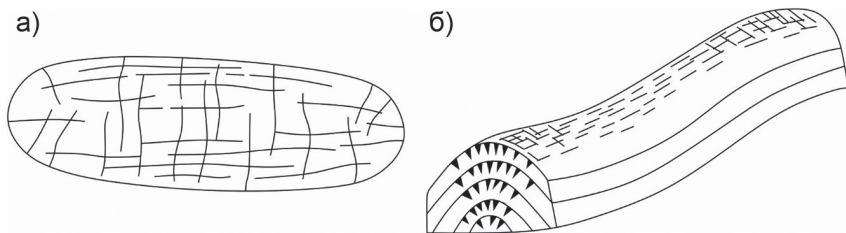


Рис. 4. Схемы расположения трещин отрыва в брахиантиклинали (а) и линейной (б) антиклинальной складке (по [29])

Fig. 4. Diagrams of location of fractures in brachiatcinal (a) and linear (b) anticlinal fold (according to [29])

обнаружения сейсморазведкой, что мы и наблюдаем на рис. 1. То есть причиной возникновения каньонообразного вреза, обнаруженного с помощью сейсморазведки способом ПВРО, является трещина отрыва, сформированная в ходе формирования поднятия. Однако продольная она или поперечная, радиальная или концентрическая, судить рано, так как пересечение вреза единичное. На карте, представленной выше на рис. 3, видно, что участок близок к брахиантиклинальной форме, однако этих данных явно недостаточно для определения типа трещин отрыва.

Возможной причиной образования трещин в сводовой части поднятия может быть высокая скорость деформации при недостаточном давлении вышележащих пород, при которой соляной массив повел себя как хрупкое тело. В результате деформаций и растворения образовался инверсионный рельеф по кровле антиклинального поднятия соляной толщи, с образованием протяженной трещины отрыва и канала растворения, унаследованного от нее. Эрозионные процессы придали этой трещине вид каньонообразной структуры.

Геомеханическое обоснование

Важно понять, насколько высказанное выше предположение о причинах возникновения трещин в солях обосновано с геомеханической точки зрения, поскольку генеральные углы падения толщ

незначительны и измеряются первыми градусами. Выполненные геомеханические расчеты показывают, что в подобных перегибах пластовое тело должно испытывать разрывные деформации с образованием трещин отрыва в областях наибольшего перегиба. Данное заключение подтверждают нижеприведенные расчеты.

Рассмотрим изгиб упругого слоя в виде круглой пластины толщиной h , заземленной по кольцевому слою с внутренним радиусом b , находящейся под действием равномерно распределенного давления q . При условии $h/b \ll 1$ пластину можно рассматривать как тонкую, в которой действуют радиальные σ_r и окружные σ_ϕ напряжения в плоскости пластины, касательные напряжения отсутствуют.

Приближенные выражения для напряжений [30] имеют вид:

- в центре пластины:

$$\sigma_r / E = \sigma_\phi / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[2,86 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,976 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right]; \quad (1)$$

- на контуре пластины:

$$\sigma_r / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[4,40 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,476 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\sigma_\phi / E = \left(\frac{h}{b}\right)^2 \left[1,32 \left(\frac{f}{h}\right) + 0,145 \left(\frac{f}{h}\right)^2 \right] \quad (3)$$

Стрела прогиба (в центре пластины) f определяется из уравнения

$$2,762f^2 + 5,862f = (q/E)(b/h)^4, \quad (4)$$

где E — модуль упругости.

В данной задаче мы полагаем, что нам известна величина максимального прогиба f , поэтому нет необходимости знать величину давления q и решать уравнение (4).

Из соотношений (1) — (3) получим в частном случае при $f = h$:

- в центре пластины:

$$\sigma_r/E = \sigma_\phi/E = 3,84 \left(\frac{h}{b}\right)^2; \quad (5)$$

- на контуре пластины:

$$\sigma_r/E = 4,88 \left(\frac{h}{b}\right)^2, \sigma_\phi/E = 1,47 \left(\frac{h}{b}\right)^2. \quad (6)$$

Отметим, что соответствующие деформации близки к полученным величинам радиальной $\varepsilon_r \sim \sigma_r/E$ и окружной $\varepsilon_\phi \sim \sigma_\phi/E$.

Таким образом, если радиус круглого слоя на порядок больше его мощности, то в центре пластины возникают радиальные и окружные деформации порядка 3,84%, что конечно приводит к образованию трещин в верхней центральной части слоя. На периферии радиальные деформации, примерно составляющие 4,88%, значительно превышают окружные (1,47%). Это означает появление касательных к внешнему контуру слоя трещин, расположенных в его нижней части.

Выделим характерные размеры на геологическом разрезе (см. рис. 2). Рассмотрим слой ПКС (фиолетовый цвет) мощностью около 20 м, со стрелой прогиба $Y1 = 170$ м, а также суммарную толщу КП, СП и ПКС мощностью около 100 м, со стрелой прогиба $Y2 = 140$ м. Расстояние от невозмущенного слоя до максимального поднятия около 2000 — 4000 м.

На основании выражений формул (1) — (3) [18] получим для ПКС с учетом

$f/h = 170/20 = 8,5$ и $h/b = 20/(2000 - 4000) = 0,005 - 0,01$:

- в центре поднятия:
 $\sigma_r/E = \sigma_\phi/E = 0,24 - 0,95\%$;
- на контуре:
 $\sigma_r/E = 0,18 - 0,41\%$;
 $\sigma_\phi/E = 0,054 - 0,22\%$.

Аналогичные данные для всей толщи, включающей СП, КП и ПКС, с учетом $f/h = 140/100 = 1,4$ и $h/b = 100/(2000 - 4000) = 0,025 - 0,05$:

- в центре поднятия:
 $\sigma_r/E = \sigma_\phi/E = 0,37 - 1,48\%$;
- на контуре:
 $\sigma_r/E = 0,44 - 1,77\%$;
 $\sigma_\phi/E = 0,13 - 0,53\%$.

В обычных условиях сжатия образцов (отношение высоты к диаметру = 2,0) сильвинита и карналлита (с разными скоростями перемещения траверсы испытательной машины 0,1 — 10 мм/мин) имеем соответствующие средние значения для предельной деформации [30] 2,5 — 2,0% (сильвинит), 3,5 — 1,8% (каменная соль) и 0,72 — 0,32% (карналлит).

При растяжении образцов, как для предельных напряжений, так и для предельных деформаций, соответствующие значения на порядок ниже, чем при сжатии. Таким образом, предельные деформации при растяжении сильвинита можно оценить как 0,25 — 0,2%, каменной соли 0,35 — 0,18%, а карналлита 0,072 — 0,032%. Очевидно, что полученные деформации при оценке изгиба геологических слоев имеют такой же порядок и даже превосходят предельные значения. Конечно, в условиях очень медленных деформаций ползучести (за геологические времена) предельные деформации могут увеличиваться. Однако и сами деформации ползучести могут значительно (на порядок) превышать упругие деформации, для которых производилась их оценка.

Таким образом, геомеханическая оценка деформаций при изгибе поднимаемых

слоев говорит о возможности появления трещин в центре поднятия как в ПКС, так и в близлежащих к выработкам СП и КП. Эти трещины способствуют растворению верхних слоев солей подземными водами, что и наблюдается в реальности на геофизических разрезах.

Аналогичные трещины могут возникать и на периферии (контуре) поднятия, но уже в нижней части слоев. Если ПКС деформируется отдельно от СП и КП, то это будут трещины (касательные к контуру) в нижней части ПКС на контуре. Если ПКС деформируется совместно с СП и КП как одно целое, то подобные трещины могут возникать и в нижней части СП и КП. Поскольку доступ воды в эти области ограничен, то трещины могут наблюдаться в реальности в виде вертикальных расслоений.

Отметим также, что западный склон поднятия, который отсутствует на рис. 2, более крутой. Это означает, что на западе от поднятия деформации еще больше, чем на востоке. Поэтому все сделанные выводы по трещиноватости в западной части от поднятия должны проявляться более значимо.

Выводы

С помощью способа шахтной сейсморазведки ПВРО получены следующие результаты:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. — М.: Эпсилон Плюс, 2013. — 368 с.
2. Голубев Б. М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения: Автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. — Пермь: ПГУ, 1972. — 31 с.
3. Jackson M. P. A., Hudec M. R. Salt tectonics principles and practice. Cambridge, 2017, 498 p.
4. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 9. — С. 5—29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.
5. Зубов В. П., Ковальский Е. Р., Антонов С. В., Пачгин В. В. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 22—33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

- впервые обнаружено наличие на ВКМС каньонообразного эрозионного вреза в кровле ВЗТ, генетически связанного с трещинами отрыва в своде антиклинальной структуры;

- на основе геомеханических расчетов подтверждена правомерность предположения о трещинной природе рассматриваемого эрозионного вреза;

- существенно уточнено положение кровли ВЗТ на межскважинном расстоянии, в том числе ее инверсионный рельеф на своде антиклинального поднятия.

Эрозионные врезы, особенно развитые по зонам трещиноватости в сводах антиклинальных структур, представляют большую опасность для соляных рудников. Они могут стать каналами водопритока и поэтому должны своевременно выявляться. Шахтная сейсморазведка способом ПВРО на сегодняшний день является единственным способом обнаружения подобных локальных геологических структур и многократно увеличивает возможности по изучению строения и состава водозащитной толщи.

Авторы выражают признательность коллегам, без чьего технического вклада в работу результаты, описанные в статье, не могли быть получены — В.А. Ворошилову, М.А. Обмелюхину

6. *Milanovic P., Maksimovich N., Meshcherikova O.* Dams and Reservoirs in Evaporites. Switzerland: Springer, 2019, 170 p.
7. *Giannino F., Leucii G.* Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM, 1st Edition. Hoboken: Wiley, 2021, 304 p.
8. *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, pp. 1 – 19. DOI: 10.21203/rs.3.rs-907807/v1.
9. *Gendzwill D. J., Randy Brehm.* High-resolution seismic reflections in a potash mine // Geophysics. 1993, vol. 58, no. 5, pp. 741 – 748.
10. *Rapetsoa M. K., Manzi M. S. D., Westgate M., Sihoyiya M., James I., Onyebueke E., Kubeka P., Durrheim R. J., Kgarume T.* Cost-effective in-mine seismic experiments to image platinum deposits and associated geological structures at Maseve platinum mine, South Africa // Near Surface Geophysics. 2022, vol. 20, no. 6, pp. 572 – 589. DOI: 10.1002/nsg.12216.
11. *Rapetsoa M. K., Manzi M.* In-mine seismic method for platinum orebody exploration in Maseve Platinum Mine, South Africa / NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2021, vol. 2021, pp. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.202120195.
12. *Matloga S., Manzi M., Bybee G.* Interpretation of legacy 3D seismic data for underground platinum mines: Implication for mine safety / NSG2022 4th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. 2022, vol. 2022, pp. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.202220153.
13. *Mahlalela V., Manzi M.* Interpretation of legacy 3D seismic data from oryx mine in South Africa using seismic attributes / NSG2022 4th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining. 2022, vol. 2022, pp. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.202220175.
14. *Gillot E., Ponglungca A., Mounier P., Timberlake C.* 3D seismic application for Mae Moh coal mine development / 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2018, vol. 2018, pp. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.201802609.
15. *Kolesov S., Kuzin A., Kondrashkov V.* High-resolution vibroseismology on the mining field / Engineering and Mining Geophysics 2019, 15th Conference and Exhibition. 2019, vol. 2019, pp. 1 – 9. DOI: 10.3997/2214-4609.201901763.
16. *Савич А. И., Коптев В. И., Никитин В. Н., Яценко З. Г.* Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. – М.: Недра, 1969. – 328 с.
17. *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: 2010.21455/gr2017.3-1.
18. *Судакова М. С., Владов М. Л.* Современные направления георадиолокации // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2018. – № 2. – С. 3 – 12. DOI: 10.33623/0579-9406-2018-2-3-12.
19. *Бабкин А. И.* Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 1. – С. 261 – 267.
20. *Бабкин А. И.* Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2001. – 36 с.
21. *Вагин В. Б.* Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 188 с.
22. *Кулагов Е. В.* Особенности сейсмических волн, возбуждаемых в массиве соляных пород на Старобинском месторождении // Літасфера. – 2012. – № 2 (37). – С. 105 – 111.
23. *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.

24. Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю., Ворошилов В. А. Влияние направленности источников и приемников на результаты шахтной сейсморазведки // Геофизика. — 2019. — № 5. — С. 26–36.


25. Пригара А. М. Особенности обработки данных шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений / Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика». — Пермь, 2020. — С. 1–11. DOI: 10.3997/2214-4609.202051166.

26. 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. — С. 1–8. DOI: 10.3997/2214-4609.202051151.

27. Царев Р. И., Пригара А. М., Жуков А. А. Возможности сейсморазведки на поперечных волнах / Материалы конференции EAGE «Инженерная и рудная геофизика». — Геленджик, 2019. — С. 1–9. DOI: 10.3997/2214-4609.201901765.

28. Пригара А. М., Жуков А. А., Царев Р. И., Шусткина И. Ю., Ворошилов В. А. Патент РФ № 2709415/С1. Способ шахтной сейсмической разведки. 02.04.2019.

29. Михайлов А. Е. Структурная геология и геологическое картирование. — М.: Недра, 1984. — 464 с.

30. Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. — Новосибирск: Наука, 2013. — 191 с. 

REFERENCES

1. Kudryashov A. I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley*. 2-e izd. [Verkhnekamskoe salt deposit, 2nd edition], Moscow, Epsilon Plyus, 2013, 368 p.

2. Golubev B. M. *Stroenie solyanoy tolshchi Verkhnekamskogo mestorozhdeniya* [Structure of the Verkhnekamskoe salt sequence], Candidate's thesis, Perm, PGU, 1972, 31 p.

3. Jackson M. P. A., Hudec M. R. *Salt tectonics principles and practice*. Cambridge, 2017, 498 p.

4. Baryah A. A., Evseev A. V. Closure of potash and salt mines: Review and analysis of the problem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 9, pp. 5–29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.

5. Zubov V. P., Kovalski E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing Verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp. 22–33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

6. Milanovic P., Maksimovich N., Meshcherikova O. *Dams and Reservoirs in Evaporites*. Switzerland: Springer, 2019, 170 p.

7. Giannino F., Leucii G. *Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM*, 1st Edition. Hoboken: Wiley, 2021, 304 p.

8. 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, pp. 1–19. DOI: 10.21203/rs.3.rs-907807/v1.

9. Gendzwill D. J., Randy Brehm. High-resolution seismic reflections in a potash mine. *Geophysics*. 1993, vol. 58, no. 5, pp. 741–748.

10. Rapetsoa M. K., Manzi M. S. D., Westgate M., Sihoyiya M., James I., Onyebueke E., Kubeka P., Durrheim R. J., Kgarume T. Cost-effective in-mine seismic experiments to image platinum deposits and associated geological structures at Maseve platinum mine, South Africa. *Near Surface Geophysics*. 2022, vol. 20, no. 6, pp. 572–589. DOI: 10.1002/nsg.12216.

11. Rapetsoa M. K., Manzi M. In-mine seismic method for platinum orebody exploration in Maseve Platinum Mine, South Africa. *NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2021, vol. 2021, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.202120195.

12. Matloga S., Manzi M., Bybee G. Interpretation of legacy 3D seismic data for underground platinum mines: Implication for mine safety. *NSG2022 4th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*. 2022, vol. 2022, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.202220153.

13. Mahlalela V., Manzi M. Interpretation of legacy 3D seismic data from oryx mine in South Africa using seismic attributes. *NSG2022 4th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining*. 2022, vol. 2022, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.202220175.

14. Gillot E., Ponglungca A., Mounier P., Timberlake C. 3D seismic application for Mae Moh coal mine development. *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2018, vol. 2018, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201802609.

15. Kolesov S., Kuzin A., Kondrashkov V. High-resolution vibroseismology on the mining field. *Engineering and Mining Geophysics 2019, 15th Conference and Exhibition*. 2019, vol. 2019, pp. 1–9. DOI: 10.3997/2214-4609.201901763.

16. Savich A. I., Koptev V. I., Nikitin V. N., YAshchenko Z. G. *Seismoakusticheskie metody izucheniya massivov skal'nykh porod* [Seismoacoustic methods of studying rock massifs], Moscow, Nedra, 1969, 328 p.

17. Vladov M. L., Kapustin V. V., Pyatilova A. M., Kuvaldin A. V. GPR observations to assess the conductivity of geological environment. A laboratory experiment. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2017, no. 3(18), pp. 5–16. [In Russ]. DOI: 2010.21455/gr2017.3-1.

18. Sudakova M. S., Vladov M. L. Modern directions of georadiolocation. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2018, no. 2, pp. 3–12. [In Russ]. DOI: 10.33623/0579-9406-2018-2-3-12.

19. Babkin A. I. Spatial interference systems of seismoacoustic observations in the conditions of mining excavations of potassium mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 1, pp. 261–267. [In Russ].

20. Babkin A. I. *Shakhtnaya seismoakustika po metodike mnogokratnykh perekrytiy (na primere Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley)* [Mine seismoacoustics by the method of multiple overlaps (by the example of the Verkhnekamskoe potassium salt deposit)], Candidate's thesis, Perm, Gornyy institut UrO RAN, 2001, 36 p.

21. Vagin V. B. *Shakhtnye seismicheskie metody izucheniya stroeniya massivov solyanykh porod* [Mine seismic methods for studying the structure of massifs of salt rocks], Minsk, BelNITS «Ekologiya», 2010, 188 p.

22. Kulagov E. Features of seismic waves excited in an array of salt rocks in the Starobinskoye field. *Litasfera*. 2012, no. 2 (37), pp. 105–111. [In Russ].

23. 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. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 4, pp. 121–136. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-121-136.

24. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Shustkina I. Yu., Voroshilov V. A. The influence of directionality of sources and receivers on the results of mine seismic survey. *Geophysics*. 2019, no. 5, pp. 26–36. [In Russ].

25. Prigara A. M. Features of processing of mine seismic survey data on transverse waves with reflection separation. *Materialy konferentsii EAGE «Inzhenernaya i rudnaya geofizika»* [Proceedings of the EAGE Conference «Engineering and Ore Geophysics»], Perm, 2020, pp. 1–11. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.202051166.

26. Tsarev R. I., Glukhikh A. V., Zhukov A. A., Moroshkina Y. N., Prigara A. M., Geological justification of results of mine seismic survey on transverse waves with separation of PVRO reflections. *Materialy konferentsii EAGE «Inzhenernaya i rudnaya geofizika»* [Proceedings of the EAGE Conference «Engineering and Ore Geophysics»], Perm, 2020, pp. 1–8. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.202051151.

27. Tsarev R. I., Prigara A. M., Zhukov A. A. Opportunities of seismic survey on transverse waves. *Materialy konferentsii EAGE «Inzhenernaya i rudnaya geofizika»* [Proceedings of the EAGE Conference «Engineering and Ore Geophysics»], Gelendzhik, 2019, pp. 1–9. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.201901765.

28. Prigara A. M., Zhukov A. A., TSarev R. I., Shustkina I. Yu., Voroshilov V. A. *Patent RU 2709415/C1*. 02.04.2019. [In Russ].

29. Mikhaylov A. E. *Strukturnaya geologiya i geologicheskoe kartirovanie* [Structural geology and geological mapping], Moscow, Nedra, 1984, 464 p.

30. Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Nekotorye zadachi mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya solyanykh porod* [Some problems of mechanics of deformation and fracture of salt rocks], Novosibirsk, Nauka, 2013, 191 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пригара Андрей Михайлович^{1,2} — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник,

e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com,

ORCID ID: 0000-0003-0129-6133,

Грибков Дмитрий Сергеевич¹ — научный сотрудник,

e-mail: Dmitry.Gribkov@uralkali.com,

Аптуков Валерий Нагимович^{1,2} — д-р техн. наук,

профессор, зав. кафедрой,

e-mail: valeryaptukov@gmail.com,

Царев Роман Ильич¹ — канд. техн. наук,

старший научный сотрудник,

e-mail: Roman.Tsarev@uralkali.com,

ORCID ID: 0000-0002-7794-411X,

Жуков Александр Анатольевич¹ — канд. техн. наук,

зав. лабораторией,

e-mail: Aleksandr.Zhukov@uralkali.com,

ORCID ID: 0000-0003-3819-4309,

¹ АО «ВНИИ Галургии»,

² Пермский государственный национальный
исследовательский университет.

Для контактов: Пригара А.М., e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.M. Pigara^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,

e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com,

ORCID ID: 0000-0003-0129-6133,

D.S. Gribkov¹, Researcher,

e-mail: Dmitry.Gribkov@uralkali.com,

V.N. Aptukov^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of Chair, e-mail: valeryaptukov@gmail.com,

R.I. Tsarev¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

e-mail: Roman.Tsarev@uralkali.com,

ORCID ID: 0000-0002-7794-411X,

A.A. Zhukov¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,

e-mail: Aleksandr.Zhukov@uralkali.com,

ORCID ID: 0000-0003-3819-4309,

¹ «VNII Galurgii» JSC, 614002, Perm, Russia,

² Perm State National Research University,

614990, Perm, Russia

Corresponding author: A.M. Pigara, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com.

Получена редакцией 01.09.2022; получена после рецензии 23.12.2022; принята к печати 10.01.2023.

Received by the editors 01.09.2022; received after the review 23.12.2022; accepted for printing 10.01.2023.