

ПЕРСПЕКТИВЫ УЧЕТА ГИПСОМЕТРИИ ПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ

В.А. Ворошилов¹, О.Н. Фатыхова¹, А.А. Жуков¹, Р.И. Царев¹, А.М. Пригара¹

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

Аннотация: Добыча калийных солей (сильвинитовой и карналлитовой руды) в условиях рудников Верхнекамского месторождения солей производится с применением камерной системы разработки с оставлением ленточных целиков. При такой отработке продуктивных пластов остро стоит вопрос обеспечения устойчивости горных выработок. В процессе проходки выработок комбайном в кровле могут обнажаться неустойчивые породы, что связано с особенностями залегания пластов или их «коржевой» части. Получение своевременной информации о фактическом положении пластов позволит заранее определить технологические решения по обеспечению устойчивости горных выработок в сложной горно-геологической обстановке, особенно в зонах интенсивной складчатости. Одним из способов определения геологического строения непосредственно во время проходки горных выработок является георадиолокация. Для оценки ее применимости были проведены опытно-методические работы в кровлю и почву уже пройденных капитальных горных выработок. В результате геологической интерпретации данных георадиолокации показана их высокая сходимость с данными прямых наблюдений. Обоснована целесообразность установки георадара на проходческий комбайн для контроля гипсометрии пластов в реальном времени. Особое внимание уделено уменьшению разубоживания извлекаемого полезного ископаемого при использовании георадиолокации при проходке выработок, которое, по данным исследования, может сократиться в несколько раз в сложных геологических условиях. Выполнены теоретические расчеты на примере выработки, пройденной без учета данных георадиолокации и с их учетом. Даны рекомендации по совершенствованию системы навигации проходческих комбайнов, позволяющие перейти к автоматическому удаленному управлению проходческими машинами и беспилотной отработке.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение солей, подземный рудник, геофизика, геомеханика, георадиолокация, горные выработки, определение гипсометрии пластов, проходческий комбайн, геологическая интерпретация геофизических данных, уменьшение разубоживания.

Для цитирования: Ворошилов В. А., Фатыхова О. Н., Жуков А. А., Царев Р. И., Пригара А. М. Перспективы учета гипсометрии пластов с использованием георадиолокации при проходке горных выработок на Верхнекамском месторождении солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_5.

Prospects of taking into account hypsometry of strata using ground penetration radar in heading operations at the Verkhnekamsk deposit of salt

V.A. Voroshilov¹, O.N. Fatykhova¹, A.A. Zhukov¹, R.I. Tsarev¹, A.M. Prigara¹

¹ VNII Galurgii JSC, Perm, Russia, e-mail: Vladislav.Voroshilov@uralkali.com

Abstract: Potash mining (sylvinite and carnallite ore) in the mines at the Verkhnekamsk deposit of salt uses the system of stopes and rib pillars. In this case, it is highly critical to ensure stability of stopes arranged in the productive strata. An operating roadheader can expose unstable roof rocks, which is connected with the occurrence features of the productive strata or their hard interbeds. The timely information on the actual position of strata can help make beforehand decisions on stope stability in complex geological environment, especially, in zones of heavy folding. One of the methods of geological structure determination during heading operations is the ground penetrating radar. The applicability testing of the method involved field trials in the roof and floor in the driven permanent roadways. The geological interpretation results of GPR data revealed their high agreement with the results of the direct observations. The expediency of the GPR installation on a roadheader for the real-time control of hypsometry of strata is validated. Emphasis is laid on the reduction of dilution of the mineral product during heading with the ground penetrating radar. According to the research results, dilution in complex geological conditions can be decreased by a few times. The theoretical calculations were performed for a stope headed with and without the GPR data. The recommendations are made for the improvement of the roadheader navigation system, which enable a switch to the automated remote control of roadheading machines and to the unmanned mining.

Key words: Verkhnekamsk salt deposit, underground mine, geophysics, geomechanics, ground penetrating radar, stopes, determination of hypsometry of strata, roadheader, geological interpretation of geophysical data, reduction of dilution.

For citation: Voroshilov V. A., Fatykhova O. N., Zhukov A. A., Tsarev R. I., Prigara A. M. Prospects of taking into account hypsometry of strata using ground penetration radar in heading operations at the Verkhnekamsk deposit of salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_5.

Введение

Повышение уровня безопасности ведения горных работ является актуальной задачей, требующей постоянного внимания горно-геологических служб недоропользователей. В современных реалиях ее решение возможно путем оперативного получения и использования информации о геологическом строении массива непосредственно при проходке выработок горно-выемочными машинами. Одним из инструментов для таких исследований является георадиолокация, позволяющая оперативно и точно

выполнять неразрушающее изучение массива.

В настоящее время георадиолокацию активно используют для следующих целей:

- поиск подземных коммуникаций [1, 2];
- оценка состояния зданий и сооружений [3], дорожного полотна [4];
- проведение инженерно-геологических изысканий [5, 6];
- проведение впередизабойных исследований [7];
- другие геологические задачи [8, 9].

На калийных рудниках георадиолокацию используют для оценки геологического строения массива [10, 11], локализации в нем зон повышенной трещиноватости [12, 13], оценки геологического строения и мониторинга состояния междукамерных целиков [14, 15]. За счет компактности оборудования георадиолокационные комплексы могут быть установлены на проходческо-очистные комбайны и другую технику, используемую на рудниках [10].

Особенно остро вопрос непрерывного учета гипсометрии промышленных пластов стоит при проходке горных выработок в сложных горно-геологических условиях, в том числе в условиях интенсивной складчатости. С целью обеспечения охраны горных выработок было установлено, что наиболее эффективным мероприятием для их поддержания является подрезка сильноглинизированной «коржевой» части пластов или оставление в кровле однородного слоя сильвинита, так называемой защитной пачки, за счет углубления выработки в пласт [16, 17]. Каждый из этих вариантов требует максимально точного учета положения пласта и контроля их остаточной мощности в кровле после проходки. При подрезке «коржевой части» необходимо выдерживать регламентируемую мощность подрубки, для сохранения качества извлекаемой породы и исключения неустойчивых ослабленных слоев кровли, склонных к интенсивному расслаиванию и обрушению. При оставлении защитной пачки важно соблюдать выдержанность ее мощности по всей длине выработки, в противном случае при смещениях породного контура в результате ползучести солей могут возникнуть растягивающие напряжения, превышающие сцепление породных слоев, влекущие к потере устойчивости кровли.

В число задач, успешно решаемых георадиолокацией на Верхнекамском

месторождении солей (ВКМС), входит определение геологического строения и контроль состояния целиков [14, 15], определение степени закладки горных выработок, поиск зон с ослабленными физико-механическими свойствами и нарушений целостности массива [12].

В настоящий момент ведется разработка системы навигации комбайна в горизонтальной плоскости, обеспечивающей точность определения координат в пределах 20 см на длине пути 300 м [18, 19]. Использование георадиолокации при проходке горных выработок может послужить основой для создания системы навигации комбайна в вертикальной плоскости. Коррекция траектории движения комбайна на основе детальной информации о геологическом строении по данным георадиолокации позволит не только повысить устойчивость выработок, что напрямую связано с безопасностью эксплуатации рудников, но и уменьшить разубоживание полезного ископаемого, повысить качество руды, поступающей на фабрику и, соответственно, уменьшить сопутствующие расходы. Целью настоящего исследования являлось определение возможности использования георадиолокации для контроля проходки горных выработок по промышленным пластам в условиях Верхнекамского месторождения солей.

Объект

Объектом исследований является калийная залежь Верхнекамского месторождения солей (ВКМС), представленная серией продуктивных пластов карналлитового и сильвинитового состава. В рамках разработки калийной залежи происходит проходка выработок по продуктивным сильвинитовым (КрII, АБ) и карналлитовым (В) пластам, а также капитальных выработок по пластам КрIII и ПдКС. Сильвинитовые пласты разде-

лены каменной солью и прослоем глинисто-ангидритового материала — коржом». Продуктивный пласт В разделен на шесть слоев, четные из них — богатые карналлитовые или сильвинитовые слои, нечетные — преимущественно галитовые [20].

Наличие четких границ пластов, отличающихся по литологии и, соответственно, по физическим свойствам, является предпосылкой для использования георадиолокации для определения их гипсометрии.

Методы

Для проведения георадиолокационных исследований применялся аппаратный комплекс SIR-4000. Измерения проводились при постоянной базе источник приемник с применением экранированных антенн с центральными частотами 400 и 900 МГц по подошве и кровле выработки (рис. 1). Использование разночастотных антенн позволило оценить эффективность георадиолокации для определения положения пластов в ближней и дальней зоне.

Принцип действия аппаратуры георадиолокационного зондирования основан на излучении сверхширокополос-

ных (наносекундных) импульсов дециметрового и сантиметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела являются, например, контакты между породами различного литологического состава, между выработкой и породой, между породами различной влажности и т.д.

На входе среды генерируется электромагнитный импульс, а на выходе приемной антенной воспринимается отклик среды — совокупность волн, отличающихся друг от друга временами пробега, интенсивностью и формой. В кинематических и динамических характеристиках этих волн и содержится информация о среде — это двойные времена пробега электромагнитных волн до границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью, информация о потерях, связанных с токами проводимости, информация о дисперсии фазовых скоростей в среде.

От частоты антенного блока прямо пропорционально зависит разрешающая способность исследований (чем выше частота, тем выше разрешающая способность), и обратно пропорционально — глубина исследований (чем выше частота, тем меньше глубина исследований). Поэтому для обеспечения необходимой детальности и глубинности при решении поставленных задач выбраны:

- антенный блок (АнБл) с центральной частотой 400 МГц, обладающий наилучшим соотношением глубинность/разрешающая способность, позволяющий определить геологическое строение на глубину до 6 м, с вертикальной разрешающей способностью порядка 8 см;
- антенный блок с центральной частотой 900 МГц, имеющий высокую разрешающую способность, позволяющий определить геологическое строе-

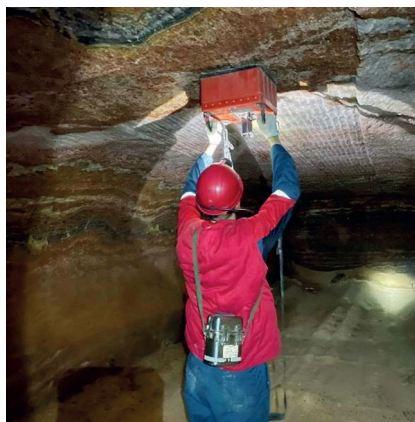


Рис. 1. Процесс исследований по кровле выработки с использованием антенного блока 400 МГц
Fig. 1. Process of roof investigation in a mine working using a 400 MHz antenna unit

ние на глубину до 2,5 м, с вертикальной разрешающей способностью порядка 3 см.

При проведении полевых работ с АнБл 400 МГц использовались следующие параметры регистрации: длина записи — 150 нс, количество отсчетов — 2048, тип записи — по времени. При производстве работ каждые 5 м выставлялись метки для пространственной привязки данных, а профили длиной более 50 м разбивались на участки длиной по 50 м. Сшивка и пространственная привязка данных происходила в программном обеспечении SeisPro.

При проведении полевых работ с АБ 900 МГц использовались следующие параметры регистрации: длина записи — 60 нс, количество отсчетов — 2048, привязка данных в пространстве осуществлялась при помощи колеса-одометра, шаг измерений по профилю составлял 2,5 см.

Скорость передвижения антенных блоков при проведении исследований составляла не более 2 км/ч; такое ограничение связано с длиной записи, позволяющей с большим запасом регистрировать времена прихода отраженных электромагнитных волн. С целью обеспечения наилучшего контакта антенных блоков с изучаемой средой исследования проводились по прямолинейным участкам кровли выработок.

Полевые наблюдения были выполнены бригадой геофизиков в количестве трех человек, что обеспечивало производительность работ порядка 500 пог. м. в смену, длительностью 4 ч. Перечень технологических исполнителей следующий:

- геофизик-оператор блока управления георадаром (руководитель работ) — один человек;
- оператор антенного блока — два человека.

При проведении работ в кровлю выработки обследовались только выработ-

ки с доступной и безопасной кровлей. Так, участки исследований отвечали следующим параметрам:

- максимальное расстояние до кровли составляло 3,6 м, что позволило безопасно провести опытные работы;
- кровля была закреплена анкерами и не имела потенциальных участков обрушения.

На этапе обработки данных георадиолокации использовался следующий набор процедур: удаление постоянной составляющей и «звона» антенны, полосовая фильтрация в диапазоне 200–600 МГц и 700–1100 МГц для АнБл 400 и 900 МГц соответственно. Амплитудная коррекция производилась в окне 10 нс, миграция Кирхгофа была выполнена с постоянной скоростью 12 см/нс [21] для учета дифрагированных волн, образующихся на шарнирах складок. Выбранные процедуры обеспечивают корректную обработку полевого материала в условиях Верхнекамского месторождения солей [14], а простота математического аппарата позволяет использовать представленный граф в режиме реального времени.

В задачи интерпретации радарограмм входило выделение осей синфазности отраженных волн с целью прослеживания отражающих границ, увязка выявленных отражающих горизонтов с пластами соляной толщи. Интерпретация полученных георадиолокационных разрезов производилась с использованием данных подземных скважин и геологических зарисовок стенок выработок.

Для лучшего представления результатов отражающие границы по данным георадиолокации наносились на геологические зарисовки исследуемых выработок. Особое внимание при интерпретации было уделено выделению опорных горизонтов, прослеживающихся на протяженном участке изучаемого профиля.

Результаты опытно-методических георадиолокационных работ

Для получения объективной оценки эффективности георадиолокации для определения положения пластов при проходке горных выработок опытные работы были выполнены по всем основным пластам (В, АБ, КрII, КрIII и ПдКС), по которым выполняется проходка очистных и подготовительных выработок. Общий объем проведенных опытно-методических работ составил порядка 8500 пог. м. Опытные работы были проведены по кровле и подошве подготовительных выработок непосредственно после их проходки.

Разрезы, показанные далее, наиболее объективно характеризуют эффективность применения георадиолокации для определения гипсометрии пластов на ВКМС.

На всех разрезах (см. рис. 2 – 4) наблюдается сильная пространственная корреляция горизонтов, выделенных в процессе интерпретации, как друг с другом, так и с положением пластов, зафиксированных по данным прямых наблюдений (рис. 2, г), что свидетельствует о корректности проведенной обработки и интерпретации данных георадиолокации. Незначительные расхождения между геологическими зарисовками, данными подземных скважин и положением отражающих горизонтов по данным георадиолокации связано с положением георадиолокационных профильных линий, которые проходили в центральной части выработки, в то время как геологические зарисовки сделаны по северной стенке, а скважины располагались на расстоянии до 20 м от профиля георадиолокационных исследований. Мел-

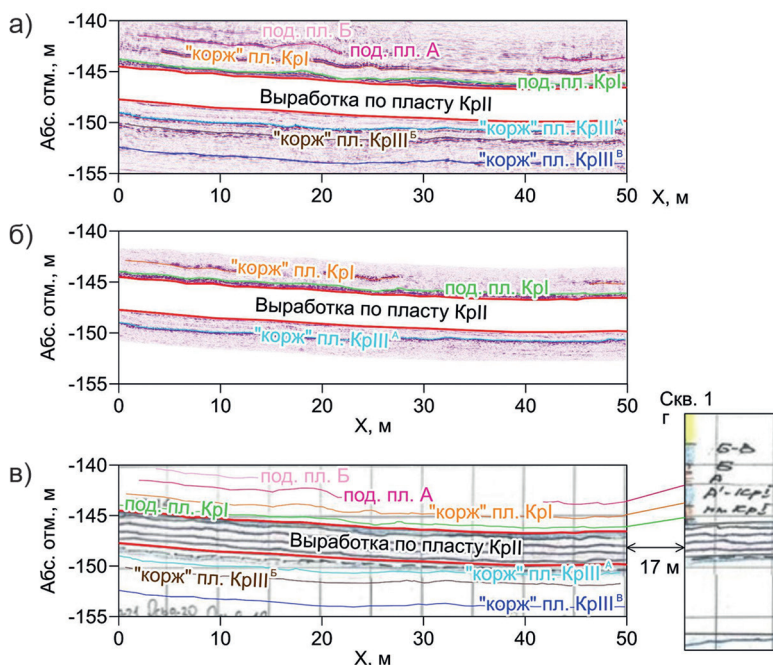


Рис. 2. Пример результатов исследований по пласту КрII: данные по антенному блоку 400 МГц (а); данные по антенному блоку 900 МГц (б); итоговая геологическая интерпретация (в); результаты бурения подземной скважины (г)

Fig. 2. Example of survey results for the KrII seam: data from the 400 MHz antenna unit (a); data from the 900 MHz antenna unit (b); final geological interpretation (v); results of underground borehole drilling (g)

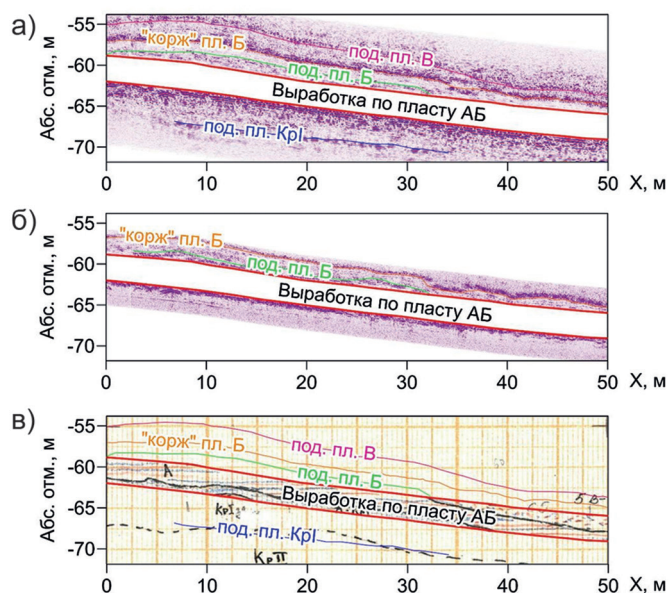


Рис. 3. Пример результатов исследования по пласту АБ: данные по антенному блоку 400 МГц (а); данные по антенному блоку 900 МГц (б); итоговая геологическая интерпретация (в)

Fig. 3. Example of survey results for the AB seam: data from the 400 MHz antenna unit (a) data from the 900 MHz antenna unit (b); final geological interpretation (v)

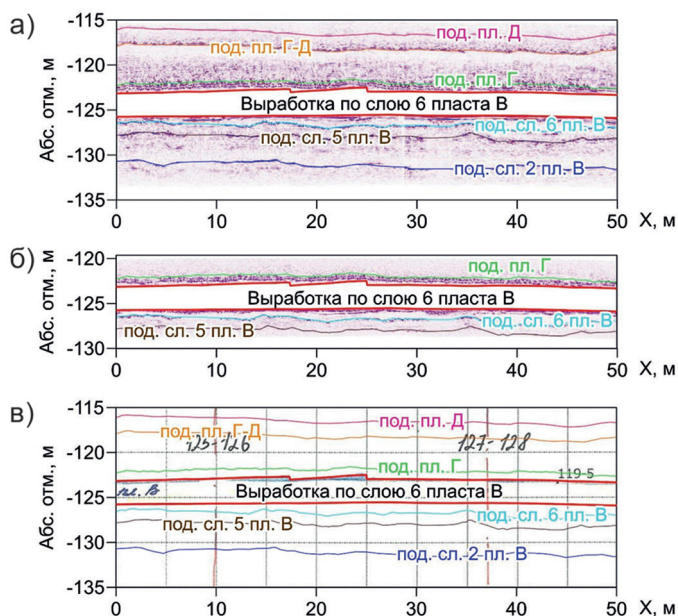


Рис. 4. Пример результатов исследования по пласту В: данные по антенному блоку 400 МГц (а); данные по антенному блоку 900 МГц (б); итоговая геологическая интерпретация (в)

Fig. 4. Example of survey results for the B seam: data from the 400 MHz antenna unit (a); data from the 900 MHz antenna unit (b); final geological interpretation (v)

кие же различия в отображении одних и тех же геологических границ по данным разных антенных блоков связаны, прежде всего, с разницей в разрешающей способности.

Анализируя данные, полученные в пределах сильвинитовой пачки по пластам КрII и АБ (см. рис. 2, 3) можно сделать вывод, что выделяемые отражения в основном представлены «коржами» соответствующих пластов, в которых происходит сильное затухание сигнала, что может ограничивать максимальную глубинность исследований. При проходке горных выработок в пределах зон изменения литологического состава (зоны замещения продуктивных сильвинитовых пластов на каменную соль) использование георадиолокации для определения гипсометрии остается решаемой задачей за счет того, что опорные горизонты представляют собой слои глинисто-ангидритового состава, не подверженные замещению.

Отдельно стоит отметить, что при проведении исследований в почву (рис. 3) наблюдается периодическое отсутствие отражающих горизонтов, связанное с сильной влажностью и большой мощностью штыба на почве выработки. Непосредственно при проходке горных выработок за счет малой мощности и низкой влажности штыба данный фактор не будет негативно сказываться на результатах определения положения пластов.

В пределах пласта В, карналлитового состава, опорные горизонты представлены границами литологических разностей солей (граница каменная соль-карналлит) (рис. 4). Отсутствие мощных глинистых прослоев, экранирующих распространение электромагнитной волны, позволяет добиться большей глубины зондирования в сравнении с исследованиями по пластам сильвинитовой пачки.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о перспек-

тивности использования георадиолокации для контроля гипсометрии пластов в процессе проходки горных выработок в условиях ВКМС.

Технические рекомендации по контролю гипсометрии пластов

Техническая возможность контроля геологического строения с применением георадиолокации при проходке выработок в реальном времени достигается за счет установки антенного блока георадара непосредственно на проходческий комбайн.

Установка георадара на проходческий комбайн для определения положения вышележающих пластов возможна в двух вариантах. Первый вариант — максимально близко к исполнительному органу (например, рама буровых установок), второй — на крыше кабины машиниста. Наиболее информативным будет являться вариант установки с максимальным приближением к исполнительному органу, что позволит машинисту комбайна получать данные непосредственно вблизи забоя и оперативно корректировать траекторию движения. Однако установка антенного блока вблизи исполнительного органа может повлечь за собой большое количество помех по причине высокой запыленности, сильных вибраций и т.д.

Установка антенного блока георадара для определения гипсометрии нижележащих пластов возможна лишь под кабиной машиниста. Поэтому на данном этапе исследований рассмотрен вариант установки антенного блока над и под кабиной машиниста комбайна (рис. 5).

Скорость корректировки курса комбайна связана с его производительностью при проходке выработок. Техническая производительность используемых на ВКМС проходческих комбайнов: Урал-61, Урал-10, Урал-20, с учетом данных завода-изготовителя составляет

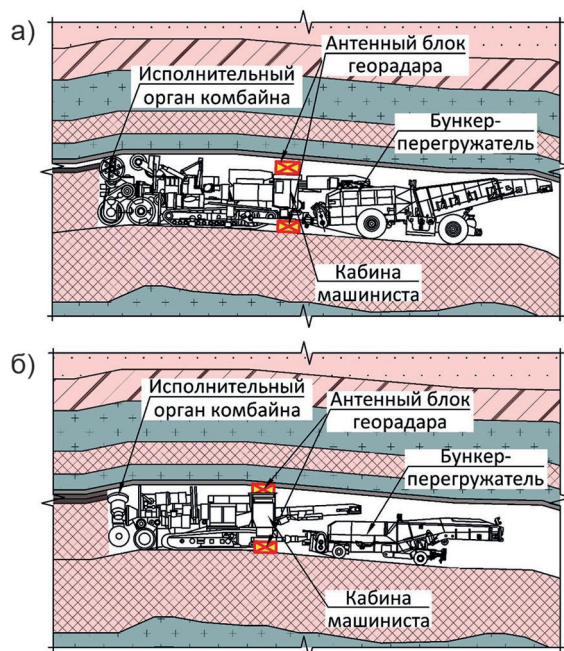


Рис. 5. Установка георадара на проходческий комбайн: на комбайн Урал-20Р (а); на комбайн Урал-61А (б)
 Fig. 5. Installation of the ground penetrating radar system on a heading machine: installation on the Ural-20R miner (a); installation on the Ural-61A miner (b)

до $Q_{\text{техн}} = 3 - 7$ т/мин. Фактическая производительность будет зависеть от технологических особенностей процесса проходки выработок с учетом погрузочно-доставочных работ и мероприятий по креплению.

Исходя из заявленной технической производительности $Q_{\text{техн}}$ можно определить скорость $T_{\text{техн}}$ проходки одного пог. м выработки по формуле

$$T_{\text{техн}} = SpL / Q_{\text{техн}}, \text{ мин}, \quad (1)$$

где S — площадь поперечного сечения хода в проводимой выработке, м^2 ; ρ — плотность руды в массиве, $\text{т}/\text{м}^3$; L — погонный метр длины выработки, пог. м; $Q_{\text{техн}}$ — техническая производительность комбайна, т/мин.

Тогда скорость движения комбайна при проходке выработок можно определить по формуле

$$V_{\text{комб}} = L / T_{\text{техн}}, \quad (2)$$

где L — длина участка проводимой выработки.

В табл. 1 представлены расчеты для используемых на ВКС комбайнов.

Таким образом, скорость движения комбайна и, соответственно, антенного блока, установленного на комбайне, не превышает 1 м/мин, возможно применение мелкого шага записи по горизонтали (порядка 1 см и меньше) и увеличение количества накоплений сигнала, что позволит значительно улучшить качество получаемого материала. Точность определения положения отражающего горизонта при подобных параметрах наблюдения с использованием антенных блоков с центральными частотами 400 и 900 МГц при скорости распространения электромагнитных волн в пластах ВКС порядка 12 см/нс [21] составляет порядка 5% и определяется вертикальной разрешающей способностью метода, зависящей от длины волны. Для указанных центральных частот длина волны составляет 13 и 30 см, что

Таблица 1

Зависимость времени проходки выработки от технических характеристик проходческого комбайна
Dependence of excavation time for a mine working on the technical parameters of a heading machine

Тип очистного комбайна	Площадь поперечного сечения хода выработки S , м ²	Техническая производительность, заявленная заводом-изготовителем $Q_{\text{техн}}$, т/мин	Скорость движения комбайна $V_{\text{комб}}$, м/мин при $Q_{\text{техн}}$
Урал-61А	8,9	не менее 3	0,16
Урал-10	10,5	не менее 5	0,23
Урал-20Р	15,5	не менее 7	0,22

обеспечивает вертикальное разрешение 3 и 8 см для АнБл 900 и 400 МГц соответственно. Это означает, что при удалении горизонта на расстояние 2 м от места установки антенного блока погрешность определения его положения максимально составит порядка 10 см (примерно 3% от высоты выработки).

Учитывая данные из табл. 1 и возможности георадара в режиме реального времени передавать данные о положении маркирующих горизонтов в кровле и почве выработки, можно сделать вывод, что его использование позволяет выполнять корректировку направления курса движения комбайна в вертикальной плоскости с достаточной высокой точностью и хорошим запасом по времени, для возможности передачи сигнала не только машинисту, но и напрямую в диспетчерскую.

Улучшение технологических процессов с использованием данных георадиолокации

Для оценки изменения параметров проходки выработки были проведены расчеты разубоживания при условии использования георадара при проходке и без его использования. Был проанализирован участок существующего выемочного штрека по пласту КрII длиной 124 м (рис. 6). Сравнение параметров производилось на примере коэффициента разубоживания:

$$P = (Q_{\text{пп}} / Q_{\text{доб}}) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $Q_{\text{пп}}$ — количество примешиваемых разубоживающих пород, м³; $Q_{\text{доб}}$ — количество отбитой рудной массы, м³.

Особенностями проходки данного участка является следующее:

- проходка осуществлена с локальной подрезкой пустых пород пластов КрII–КрIII и КрIII;
- на протяжении всего участка в кровле присутствует силвинит переменной мощности, что в дальнейшем может отрицательно сказаться на условиях обеспечения устойчивого состояния кровли;
- проходка осуществлена с углубкой в пласт, без подрезки междупластовой каменной соли КрI–КрII, что при ведении очистных работ увеличит показатель разубоживания при заезде комбайна в очистные камеры из выемочного штрека.

На рис. 7 представлен скорректированный профиль данного участка, с применением георадара при корректировке траектории проходки комбайна. Профиль был построен с учетом имеющихся данных георадиолокации, полученных на исследуемом участке. Опорным горизонтом при этом выступает граница изменения литологического состава (кровля пласта КрII). Изменение траектории движения комбайна ограничивалось предельным углом $\pm 12^\circ$ с учетом возможностей самоходного транспорта.

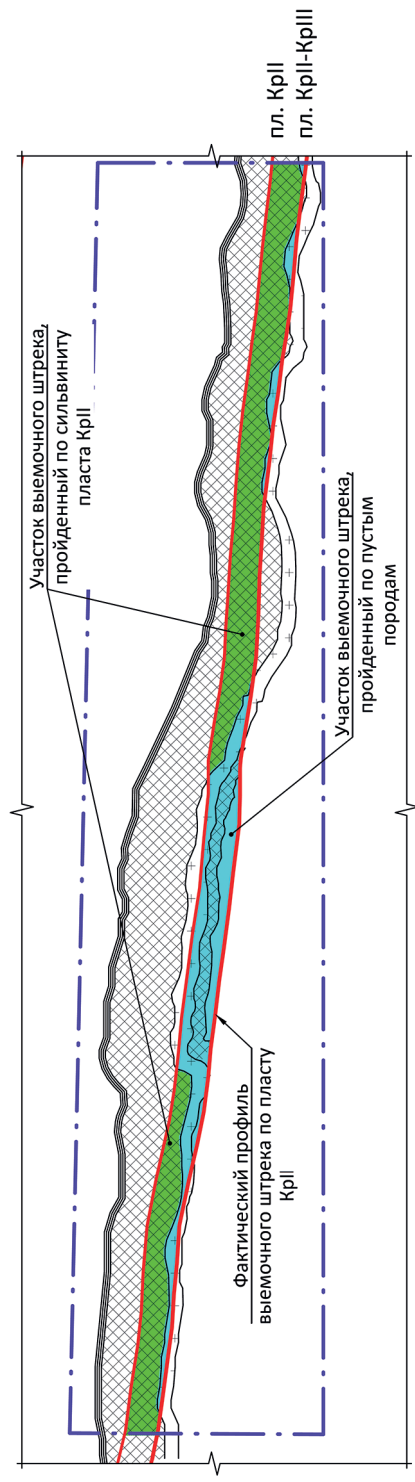


Рис. 6. Участок выемочного штрэка по пласту KrII, пройденного без учета данных георадиолокации
Fig. 6. Section of the extraction drift in the KrII seam driven without taking ground penetrating radar data into account

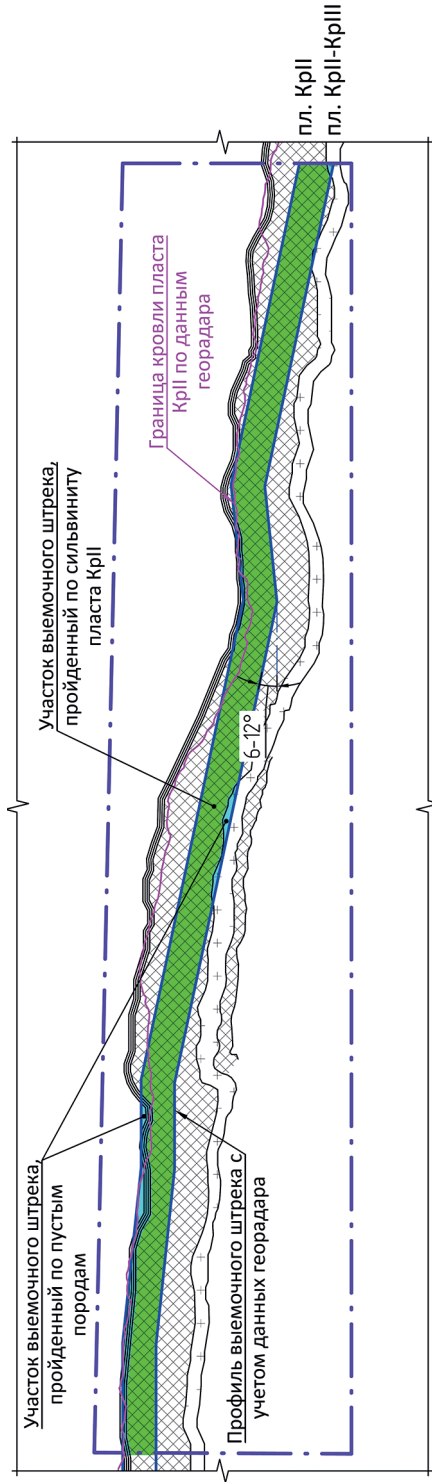


Рис. 7. Участок выемочного штрэка по пласту KrII, пройденного с учетом данных георадиолокации (прогнозный)
Fig. 7. Section of the extraction drift in the KrII seam driven taking GPR data into account (forecast)

Таблица 2

Показатели проходки исследуемого участка выемочного штрека
Performance indicators of driving the studied section of the extraction drift

Параметры проходки исследуемого участка	Фактический профиль	Профиль, скорректированный с учетом возможностей георадиолокации
Общая длина участка исследования, м	124,9	125,8
Площадь поперечного сечения, м ²	15,5	15,5
Объем исследованного участка $Q_{\text{доб}}$, м ³	1936	1950
Объем силвинита, м ³	1149	1776,2
Объем пустой породы $Q_{\text{пп}}$, м ³	787	173,8
Коэффициент разубоживания на исследуемом участке P , %	40,65	8,91

Сравнение полученных показателей проходки на основе коэффициента разубоживания представлены в табл. 2. По результатам расчетов видно, что использование возможностей георадара позволило значительно сократить процент разубоживания при проходке участка выработки со сложным, складчатым геологическим строением пластов.

Таким образом, контроль гипсометрии залегания пластов с использованием георадиолокации имеет перспективы при решении следующих технологических задач:

- повышение устойчивости кровли выработок за счет более точной подрезки сильноглинизированной «коржевой» части пластов и минимизации количества оставленных в кровле геологических нарушений;
- улучшение качества добываемого полезного ископаемого за счет сокращения показателя разубоживания;
- возможность проходки подготовительных выработок с максимальным соответствием заданным технологическим параметрам, что позволит сократить время малопроизводительных операций комбайна (например, зарубка на очистные камеры с выемочного штрека).

Стоит добавить, что для оценки фактического изменения показателей разубоживания и повышения устойчивости

кровли горных выработок (особенно в сложных горно-геологических условиях) за счет более корректной подрезки слабоустойчивой «коржевой» части кровли пластов на основе данных, получаемых с помощью георадара, необходимо провести опытно-промышленные испытания данной технологии.

Заключение

В результате комплексного анализа всех собранных данных можно сделать вывод о перспективности применения георадиолокации для учета гипсометрии пластов. Результаты выполненной оценки показывают, что контроль фактической гипсометрии в процессе проходки горных выработок может благоприятно сказаться как на устойчивости горных выработок за счет более точного выполнения паспорта проходки, так и на снижении показателя разубоживания полезного ископаемого. При установке антенных блоков георадара в горизонтальной плоскости возможно определение мощности междукammerных целиков, что также будет способствовать повышению безопасности ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях.

За счет установки антенных блоков георадара над и под кабиной машиниста проходческих машин возможна привязка

не только к вышележащим, но и нижележащим опорным пластам, что позволит уменьшить возможную неоднозначность интерпретации данных георадиолокации. В перспективе, при проведении соответствующих опытно-методических работ и накоплении достаточного количества данных, возможно определение зон интенсивной внутрипластовой складчатости разной амплитуды и кос-

венных признаков вероятностных очагов газодинамических явлений. А комплексное использование систем навигации в горизонтальной и вертикальной плоскости может стать основой для создания системы автоматического удаленного управления проходческими машинами, обеспечивающей пониженное разубоживание и повышенную устойчивость горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоззи Р., Лахвар С., Суани Ч. Анализ данных зондирования георадаром для точной оценки диаметра подземных коммуникаций // Дефектоскопия. — 2022. — № 3. — С. 23–33. DOI: 10.31857/S0130308222030034.
2. Liu Y., Zeng Z., Ye H., Sun X., Zou Z., Zhou D. A novel automatic detection and positioning strategy for buried cylindrical objects based on B-Scan GPR images // Electronics. 2025, vol. 14, no. 24, article 4799. DOI: 10.3390/electronics14244799.
3. Hou F., Rui X., Fan X., Zhang H. Review of GPR activities in civil infrastructures: Data analysis and applications // Remote Sensing. 2022, vol. 14, no. 23, article 5972. DOI: 10.3390/rs14235972.
4. Филатова А. В., Дормидонтова Т. В., Быцина О. А., Григорян А. Л. Инженерные изыскания дорожной одежды с применением георадаров // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 6(57). — С. 50.
5. Richards S., McBride J., Ritter S., Smith K., Markert K., Kwong K., Rey K. GPR surveying of carbonate beach strandplain deposits in the Bahamas // Geosciences. 2026, vol. 16, no. 2, article 85. DOI: 10.3390/geosciences16020085.
6. Dupuy B., Grøver A., Garambois S., Tobiesen A., Lorand P., Dahle H., Salazar S., Frauenfelder R., Emmel B., Einbu A., Humstad T. UAV-borne GPR for snowpack characterisation: Potential, limitations and operational guidelines // Cold Regions Science and Technology. 2025, vol. 241, article 104641. DOI: 10.1016/j.coldregions.2025.104641.
7. Onyebueke E., Manzi M., Rapetsoa M., Kgarume T., Westgate M., Durrheim R., Pienaar M., Sihoyiya M., Mporfu M., van Schoor M., Kubeka P. Integration of In-mine seismic and GPR surveys to gain advanced knowledge of bushveld complex orebodies // Near Surface Geophysics. 2023, vol. 22, no. 1, pp. 55–72. DOI: 10.1002/nsg.12270.
8. Guo Y., Liu G., Jing G., Qu J., Wang S., Qiang W. Ballast fouling inspection and quantification with ground penetrating radar (GPR) // International Journal of Rail Transportation. 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1–18. DOI: 10.1080/23248378.2022.2064346.
9. Arosio D., Zanzi L., Longoni L., Papini M. Fracture thickness from GPR measurements / Proceedings of the 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Florence, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IWAGPR.2015.7292656.
10. Funk C., Brehm R., Errington A. F. C., Backstrom K. An apparatus for collecting upward-looking GPR surveys in potash mines / Proceedings of the 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572684.
11. Annan P., Davis J., Gendzwil D. Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada // Geophysics. 1988, vol. 53, no. 12, pp. 1556–1564. DOI: 10.1190/1.1442437.
12. Kavin O. Mapping of evaporite deformation in a potash mine using ground penetrating radar: Upper Kama deposit, Russia // Journal of Applied Geophysics. 2011, vol. 74, no. 2–3, pp. 131–141. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.04.009.
13. Trilitzsch G., Braun H., Krellmann Y., Maybee W. G., Maloney S., Kaiser P., Prugger A. Stepped frequency GPR field trials in potash mines / Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Delft, 2004, pp. 755–758. DOI: 10.1109/ICGPR.2004.179859.
14. 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: 10.25018/02361493202251082.

15. Пригара А. М., Жуков А. А., Царев Р. И., Скопинов М. В. Мониторинг гидроизолирующих целиков на месторождениях солей // Горный журнал. — 2024. — № 12. — С. 50–57. DOI: 10.17580/gzh.2024.12.06.

16. Константинова С. А., Чернопазов Д. С. Контактная задача с трением для системы вязкоупругих тел и некоторые ее практические приложения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2010. — № 7. — С. 46–52.

17. Константинова С. А., Чернопазов С. А., Чернопазов Д. С. Постановка и решение задачи о влиянии прочности контактов в породном массиве на устойчивость междукамерных целиков // Вычислительная механика. — 2006. — № 5. — С. 37–48.

18. Кузнецов А. И., Кормщиков Д. С., Князев Н. А., Кузнецов Я. Д. Практический опыт курсовой навигации проходческо-очистного комбайна на калийном месторождении // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2024. — № 4. — С. 685–699.

19. Левин Л. Ю., Кормщиков Д. С., Кузьминых Е. Г., Мачерет А. М. Система навигации проходческо-очистного комбайна на калийных рудниках // Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 92–96. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13.

20. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. — М.: Эпсилон Плюс, 2013. — 368 с.

21. Жуков А. А., Пригара А. М., Пушкарева И. Ю., Царев Р. И. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях верхнекамского месторождения солей // Инженерные изыскания. — 2017. — № 3. — С. 28–33. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Gozzi R., Lakhvar S., Suani C. Analysis of GPR sounding data for accurate assessment of underground utilities diameter. *Defektoskopiya*. 2022, no. 3, pp. 23–33. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0130308222030034.

2. Liu Y., Zeng Z., Ye H., Sun X., Zou Z., Zhou D. A novel automatic detection and positioning strategy for buried cylindrical objects based on B-Scan GPR images. *Electronics*. 2025, vol. 14, no. 24, article 4799. DOI: 10.3390/electronics14244799.

3. Hou F., Rui X., Fan X., Zhang H. Review of GPR activities in civil infrastructures: Data analysis and applications. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, no. 23, article 5972. DOI: 10.3390/rs14235972.

4. Filatova A. V., Dormidontova T. V., Bytsina O. A., Grigoryan A. L. Engineering survey of road pavement using ground penetrating radar. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2019, no. 6(57), pp. 50. [In Russ].

5. Richards S., McBride J., Ritter S., Smith K., Markert K., Kwong K., Rey K. GPR surveying of carbonate beach strandplain deposits in the Bahamas. *Geosciences*. 2026, vol. 16, no. 2, article 85. DOI: 10.3390/geosciences16020085.

6. Dupuy B., Grøver A., Garambois S., Tobiesen A., Lorand P., Dahle H., Salazar S., Frauenfelder R., Emmel B., Einbu A., Humstad T. UAV-borne GPR for snowpack characterisation: Potential, limitations and operational guidelines. *Cold Regions Science and Technology*. 2025, vol. 241, article 104641. DOI: 10.1016/j.coldregions.2025.104641.

7. Onyebueke E., Manzi M., Rapetsoa M., Kgarume T., Westgate M., Durrheim R., Pienaar M., Sihoyiya M., Mpofu M., van Schoor M., Kubeka P. Integration of In-mine seismic and GPR surveys to gain advanced knowledge of bushveld complex orebodies. *Near Surface Geophysics*. 2023, vol. 22, no. 1, pp. 55–72. DOI: 10.1002/hsg.12270.

8. Guo Y., Liu G., Jing G., Qu J., Wang S., Qiang W. Ballast fouling inspection and quantification with ground penetrating radar (GPR). *International Journal of Rail Transportation*. 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1–18. DOI: 10.1080/23248378.2022.2064346.

9. Arosio D., Zanzi L., Longoni L., Papini M. Fracture thickness from GPR measurements. *Proceedings of the 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, Florence, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IWAGPR.2015.7292656.

10. Funk C., Brehm R., Errington A. F. C., Backstrom K. An apparatus for collecting upward-looking GPR surveys in potash mines. *Proceedings of the 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. Hong Kong, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572684.

11. Annan P., Davis J., Gendzwil D. Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada. *Geophysics*. 1988, vol. 53, no. 12, pp. 1556–1564. DOI: 10.1190/1.1442437.

12. Kovin O. Mapping of evaporite deformation in a potash mine using ground penetrating radar: Upper Kama deposit, Russia. *Journal of Applied Geophysics*. 2011, vol. 74, no. 2–3, pp. 131–141. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.04.009.

13. Trilitzsch G., Braun H., Krellmann Y., Maybee W. G., Maloney S., Kaiser P., Prugger A. Stepped frequency GPR field trials in potash mines. *Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. Delft, 2004, pp. 755 – 758. DOI: 10.1109/ICGPR.2004.179859.

14. Zhukov A. A., Prigara A. M., Tsarev R. I., Voroshilov V. A. Solving mining and technical problems at the potash salt deposit by geophysical methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-1, pp. 82 – 91. [In Russ]. DOI: 10.25018/02361493202251082.

15. Prigara A. M., Zhukov A. A., Tsarev R. I., Skopinov M. V. Monitoring of waterproofing pillars in salt deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 12, pp. 50 – 57. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.12.06.

16. Konstantinova S. A., Chernopazov D. S. Contact problem with friction for a system of viscoelastic bodies and some of its practical applications. *Minerals and Mining Engineering*. 2010, no. 7, pp. 46 – 52. [In Russ].

17. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Chernopazov D. S. Statement and solution of the problem on the influence of contact strength in a rock mass on the stability of inter-chamber pillars. *Computational Mechanics (Russia)*. 2006, no. 5, pp. 37 – 48. [In Russ].

18. Kuznetsov A. I., Kormshchikov D. S., Knyazev N. A., Kuznetsov Ya. D. Practical experience of heading and winning machine course navigation at a potash deposit. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2024, no. 4, pp. 685 – 699. [In Russ].

19. Levin L. Yu., Kormshchikov D. S., Kuzminykh E. G., Macheret A. M. Navigation system for a road-header at potash mines. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 4, pp. 92 – 96. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13.

20. Kudryashov A. I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley. 2-e izd., pererab.* [The Verkhnekamsk salt deposit. 2nd ed.], Moscow, Epsilon Plyus, 2013, 368 p.

21. Zhukov A. A., Prigara A. M., Pushkareva I. Yu., Tsarev R. I. Estimation of electromagnetic wave velocity in salts of the Verkhnekamskoe salt deposit. *Inzhenernye izyskaniya*. 2017, no. 3, pp. 28 – 33. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ворошилов Владислав Алексеевич*¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: Vladislav.Voroshilov@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0002-3459-9264,

*Фатыхова Ольга Николаевна*¹ — младший научный сотрудник, e-mail: Olga.Fatyhova@uralkali.com, ORCID ID: 0009-0002-2144-5693,

*Жуков Александр Анатольевич*¹ — канд. техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: Aleksandr.Zhukov@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0003-3819-4309,

*Царев Роман Ильич*¹ — канд. техн. наук, руководитель направления, e-mail: Roman.Tsarev@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0002-7794-411X,

*Пригара Андрей Михайлович*¹ — канд. техн. наук, руководитель направления, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0003-0129-6133,

¹ АО «ВНИИ Галургии».

Для контактов: Ворошилов В.А., e-mail: Vladislav.Voroshilov@uralkali.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.A. Voroshilov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: Vladislav.Voroshilov@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0002-3459-9264,

*O.N. Fatykhova*¹, Junior Researcher, e-mail: Olga.Fatyhova@uralkali.com, ORCID ID: 0009-0002-2144-5693,

*A.A. Zhukov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: Aleksandr.Zhukov@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0003-3819-4309,

*R.I. Tsarev*¹, Cand. Sci. (Eng.), Research Area Manager, e-mail: Roman.Tsarev@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0002-7794-411X,

*A.M. Prigara*¹, Cand. Sci. (Eng.), Research Area Manager, e-mail: Andrey.Prigara@uralkali.com, ORCID ID: 0000-0003-0129-6133,

¹ VNII Galurgii JSC, 614002, Perm, Russia.

Corresponding author: V.A. Voroshilov, e-mail: Vladislav.Voroshilov@uralkali.com.

Получена редакцией 02.04.2026; получена после рецензии 01.06.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 02.04.2026; received after the review 01.06.2026; accepted for printing 10.09.2026.