

6. Гравиметры CG-5 Autograv // Поверь.ру: сайт. – Текст электронный. – URL:<http://www.pover.ru/spravochnik-sredstv-izmerenij/60415-15-gravimetry-cg-5-autograv>. (Дата обращения 28.09.2023).
7. Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н. Изучение приливных вариаций силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2015. – № 3 (27). – С. 71-79.
8. Каленицкий А.И., Ким Э.Л. О комплексной интерпретации данных геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа // Вестник СГГА. – 2012. – № 4. – С. 3-13.
9. Милюков В.К., Юшкин В.Д., Миронов А.П., Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Дзеранов Б.В. Мониторинг приращений силы тяжести на опорных гравиметрических пунктах Северного Кавказа высокоточными относительными гравиметрами // Геология и Геофизика Юга России. – 2013. – № 2. – С. 39-45.
10. Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 4. – С. 92-97. – DOI: 10.17513/use.37815.
11. Абрамов Д.В., Бебнев А.С., Бычков С.Г., Горожанцев С.В., Герман В.И., Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Красилов С.А., Овчаренко А.В., Юшкин В.Д. Одна из возможных причин синхронных континентальных микросейсм Северной Евразии // Физика Земли. – 2020. – № 4. – С. 123-131. – DOI: 10.31857/S000233372004002X.
12. Кирсанов С.А. Арно О.Б., Меркулов А.В., Арабский А.К., Андреев С., Картелян Е.Д., Афанасьев П.Р. Современные технологии гравиметрического мониторинга для контроля последствий отбора газа из недр // Газовая промышленность. – 2015. – № 10. – С. 36-41.
13. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Сизиков И.С., Носов Д.А., Смирнов М.Г. Гравиметрические наблюдения при солнечных затмениях в Сибири // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 125-137.
14. Дробышев М.Н., Абрамов Д.В., Бычков С.Г., Конешов В.Н., Герман М.И., Храпенко О.А., Горожанцев С.В., Красилов С.А., Бебнев А.С., Овчаренко А.В. Эксперимент по изучению синхронных континентальных микросейсм в Северной Евразии методом комплексирования гравиметрических и сейсмических наблюдений // Геология и геофизика юга России. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 83-94. – DOI:10.23671/VNC.2019.2.31979.
15. Francis O. Long time series of absolute gravity observations in Kulusuk, southeast Greenland // Geoscience Data Journal. – 2022. – 00. 1-4. – DOI: 10.1002/gdj3.183.
16. GRACE Satellite Gravimetry for Geosciences. Remote Sensing. Special Issue. – 2021. – URL: https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/GRACE_Geo. (дата обращения 28.09.2023).
17. Gravity Field, Temporal Variations from Space Techniques // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 621-626.
18. Gravity, Global Models // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 677-691.
19. Gravity Method, Satellite // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 645-656.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.4.9

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ШАХТНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ

С.В. Иванов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Необходимость ведения шахтных сейсморазведочных исследований обусловлена их высокой разрешающей способностью, что в комплексе с геологоразведочными данными и результатами наземной сейсморазведки позволяет повысить информативность интерпретационных заключений о строении и состоянии горного массива над выработками.

Ключевые слова: шахтная сейсморазведка, отраженные волны, продольные волны, поперечные волны, горные выработки, калийные месторождения.

Для оценки возможностей шахтных сейсморазведочных исследований выполнен анализ результатов шахтных сейсморазведочных исследований в различных сейсмо-геологических условиях.

Саскачеванское месторождение (Канада)

Месторождение представлено относительно однородными плоскострыми пластами. Однако аномальные геологические условия могут привести к серьезным проблемам, особенно в случае поступления в горные выработки пресных вод. Для прогноза аномальных геологических условий используются сейсмические, электрические и другие геофизические методы, как с поверхности, так и в подземных условиях.

Месторождение калия в Саскачеване обнаружено в формации Prairie Evaporite, в пласте девонских солей мощностью до 200 м. Пласт в основном состоит из галита с включениями ангидрита у подошвы пласта и калийной залежи, представленной сильвином у кровли пласта.

Крупномасштабная добыча калия ведется в Саскачеване с начала 1960-х годов. Глубина залегания промышленного пласта составляет около 1000 м. Обычно горные выработки имеют высоту 3 м, ширину 20 м и длину 500 м (рисунок 1) [1].

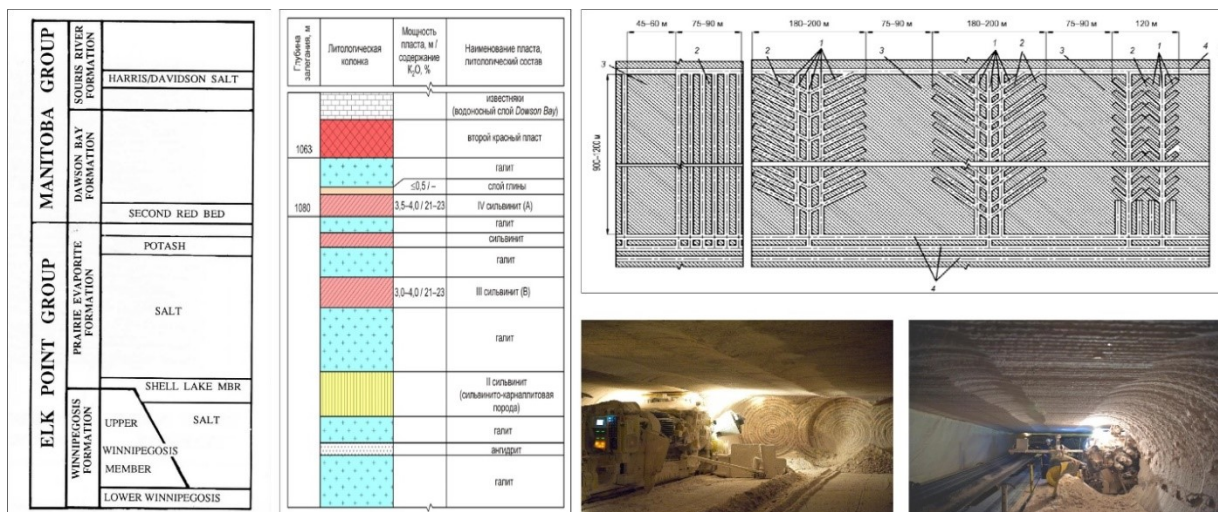


Рис. 1. Геологическая колонка и способ отработки Саскачеванского месторождения

Метод преломленных волн (МПВ) был первым геофизическим методом, который использовался в горных выработках калийных рудников Канады в начале 1960-х годов для измерения мощности соляного покрова над выработками рудника.

Метод отраженных волн (МОВ), также применяемый на калийном руднике, дает отличные результаты, но сбор данных требует больших усилий, особенно при изучении верхнего полупространства. Методики обработки сейсмических данных аналогичны методикам обработки наземных сейсмических данных, за исключением того, что частоты колебаний данных намного выше ($\approx > 1000$ Гц). Для регистрации данных с верхнего полупространства геофоны прикручиваются болтами к кровле выработки через каждые 3 м, в качестве источника используется ручная кувалда. Применяется суммирование из 7 ударов кувалдой.

Для сравнения представлены результаты сейсмического профиля, собранные вдоль почвы выработки калийного рудника Саскачевана (Gendzwill and Brehm, 1993) [2] и сейсмические данные, полученные с поверхности (≈ 20 Гц – 100 Гц) в пределах того же участка. Высокочастотные отражения (≈ 300 Гц – 1000 Гц) показывают геологическую структуру с более высокой детализацией (рисунок 2).

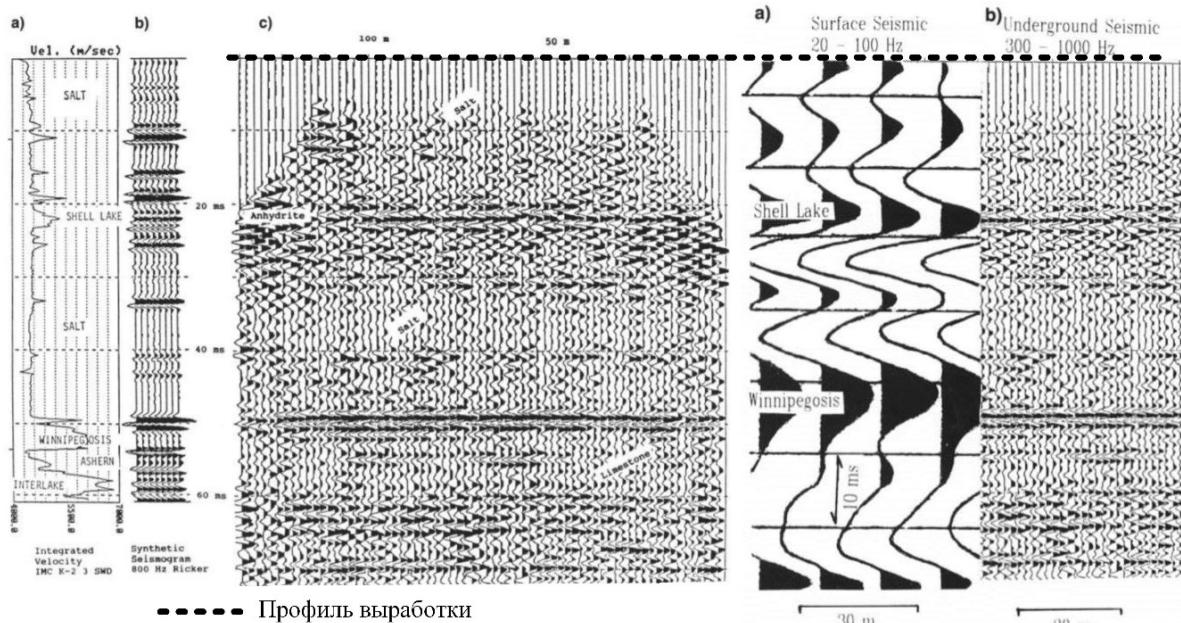


Рис. 2. Сравнение результатов наземных и подземных сейсморазведочных исследований

К+S (Германия)

Значительная часть Германии, около 50% территории, подстилается пластами калийных солей. Они залегают преимущественно на глубинах, превышающих 2000 м.

На калийных рудниках Германии применяется камерная система разработки короткими столбами (рисунок 3) [1].

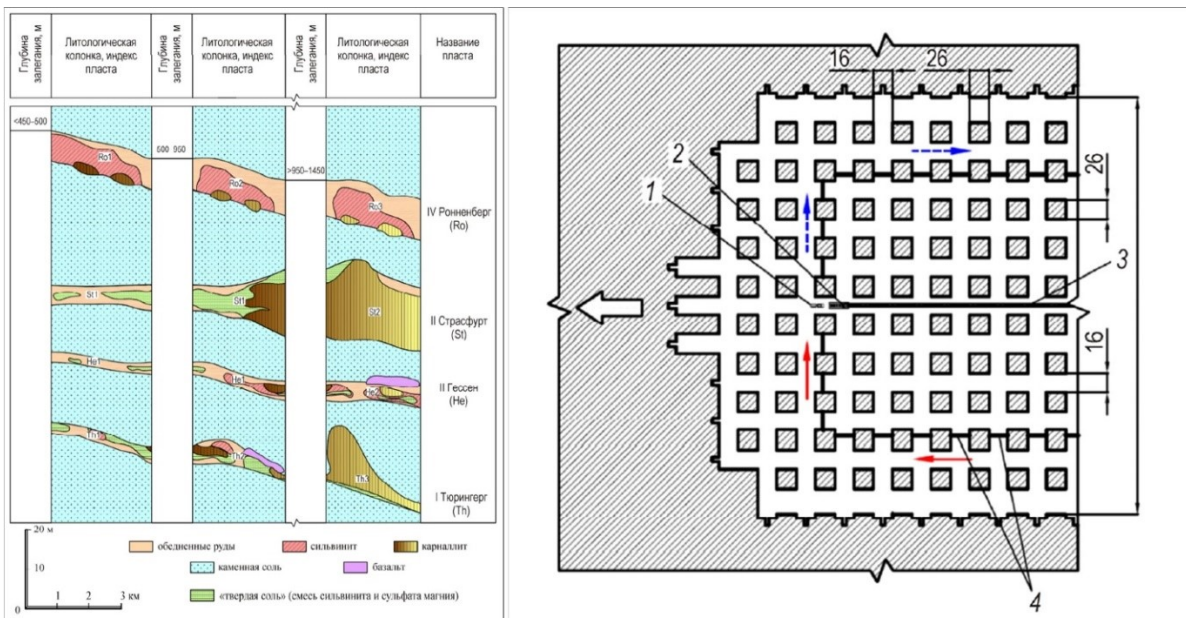


Рис. 3. Геологический разрез и способ отработки месторождений К+S

Шахтные сейсморазведочные исследования проводятся методом отраженных волн, диапазон частот: 10 Гц до 100 Гц, глубина исследований >100 м. По результатам обработки выполненных полевых исследований строятся сейсмогеологические разрезы, проводится геологическая интерпретация получаемых данных. Возможно обнаружение малогабаритных объектов на расстоянии до 80 м (рисунок 4).

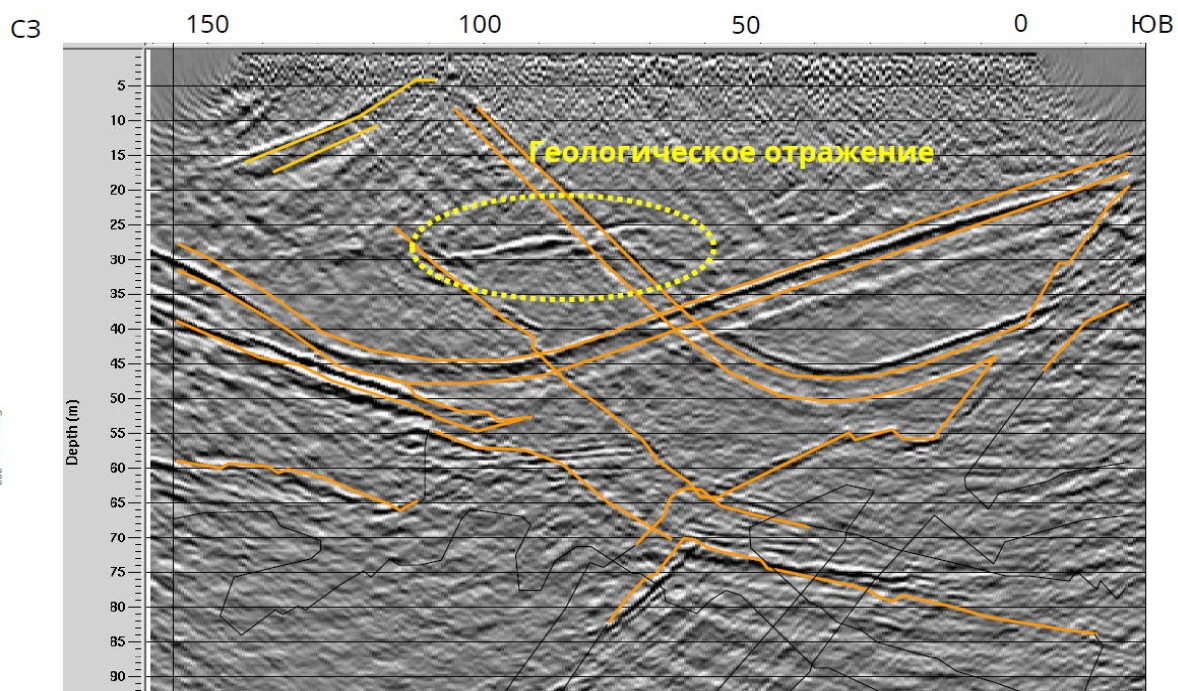


Рис. 4. Сейсмогеологический разрез с выделением малогабаритных объектов

Верхнекамское месторождение (Россия)

Продуктивные пласты Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) залегают на глубинах 300-350 м. В геологическом плане верхняя часть разреза представлена переслаиванием известняков, мергелей, глин. Водозащитная толща представлена переслаиванием пород каменной соли, карналлита, иногда сильвинита, в меньшей степени мергеля в верхней части [3]. Способ подготовки шахтного поля панельный или панельно-блоковый с широтным расположением панелей. Ширина блоков обычно составляет 400 м, а длина определяется расстоянием от главных выработок до границ шахтного поля (>1200 м). Порядок отработки панелей принят обратный (рисунок 5).

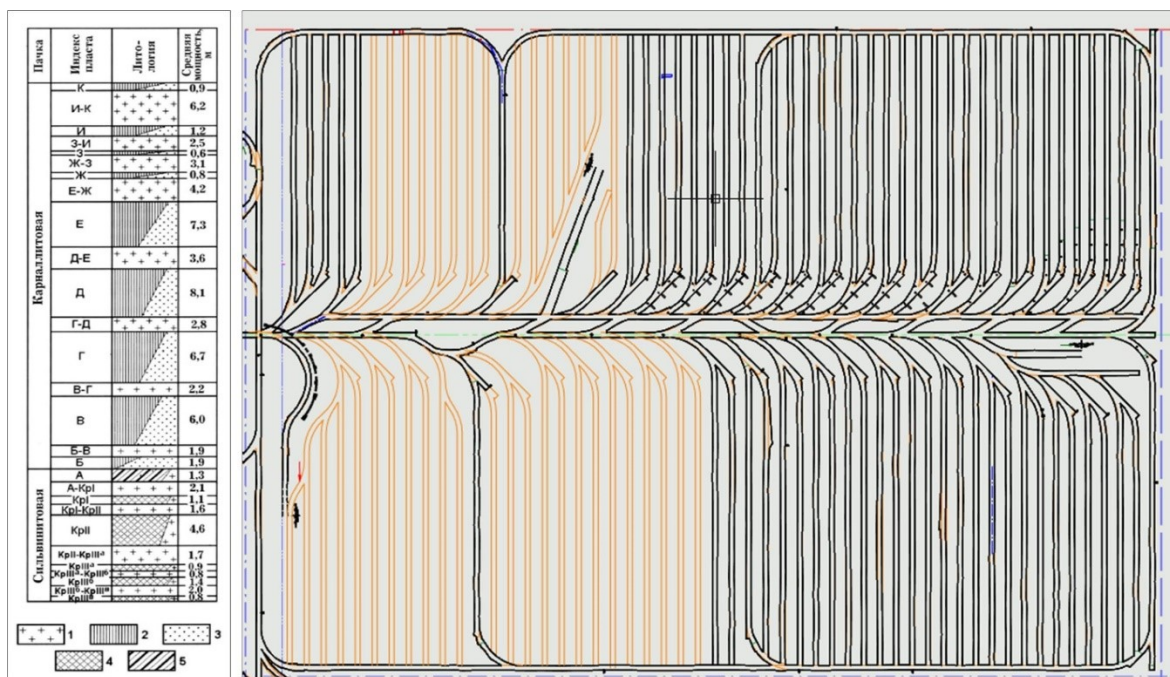


Рис. 5. Геологическая колонка и способ отработки ВКМКС

Ведение геофизических исследований на территории ВКМКС регламентировано действующими «Указаниями по защите рудников от затопления». Сейсморазведка ведется как на поверхности, так и из горных выработок рудника. Параметры шахтной системы наблюдений МОГТ: Минимальное удаление ПВ от ППк – 0 м; Максимальное удаление ПВ от ППк – 126 м; Расстояние между ПВ – 2 м; Расстояние между ППк – 2 м; Кратность наблюдений $N = 32$. Система наблюдений с данными параметрами обеспечивают уверенную регистрацию отраженных волн в целевом интервале в частотном диапазоне до 1000 Гц, что соответствует требованиям высокоразрешающей шахтной сейсмоакустики. Тип системы наблюдений – 64-канальная переменная ассиметричная, в начале профиля – фланговая [4].

По результатам работ строятся скоростной разрез, временные разрезы в различных частотных диапазонах, распространение комплексного параметра, сейсмогеологический разрез. Дается геологическая интерпретация полученным сейсморазведочным данным (рисунок 6).

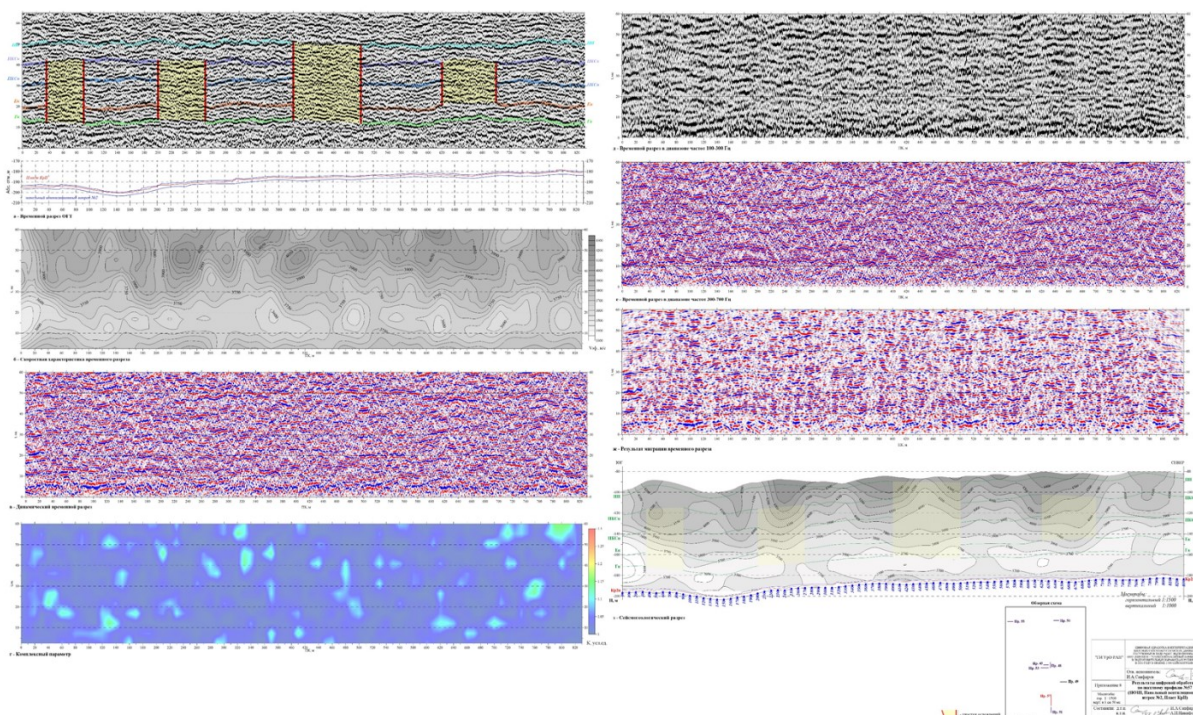


Рис. 6. Результаты обработки и интерпретации шахтной сейсморазведки на ВКМКС

Принимается, что на изменчивость гипсометрии осей синфазности преобладающее влияние оказывает структурный фактор, т.е. рельеф отражающей границы, а на интенсивность волнового поля и значения скоростных параметров – изменчивость петрофизических свойств исследуемого интервала геологического разреза. Подобная изменчивость может быть обусловлена как существенными вариациями физических свойств одной литологической разности, так и сменой литологии.

Старобинское месторождение (республика Беларусь)

Старобинское месторождение калийных солей расположено примерно в 130 км к югу от г. Минска. Оно открыто в 1949 г. и в настоящее время интенсивно разрабатывается. Месторождение является одним из крупнейших в мире – его запасы оцениваются в 2,65 млрд. т.

Разработка месторождения ведется длинными очистными забоями, что обеспечивает более высокую степень извлечения полезного ископаемого (до 95%) и возможность выемки маломощных пластов с небольшим разубоживанием, недостатком – необходимость крепления призабойного пространства лав и подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ, что ведет к удорожанию добычи руды (рисунок 7) [5].

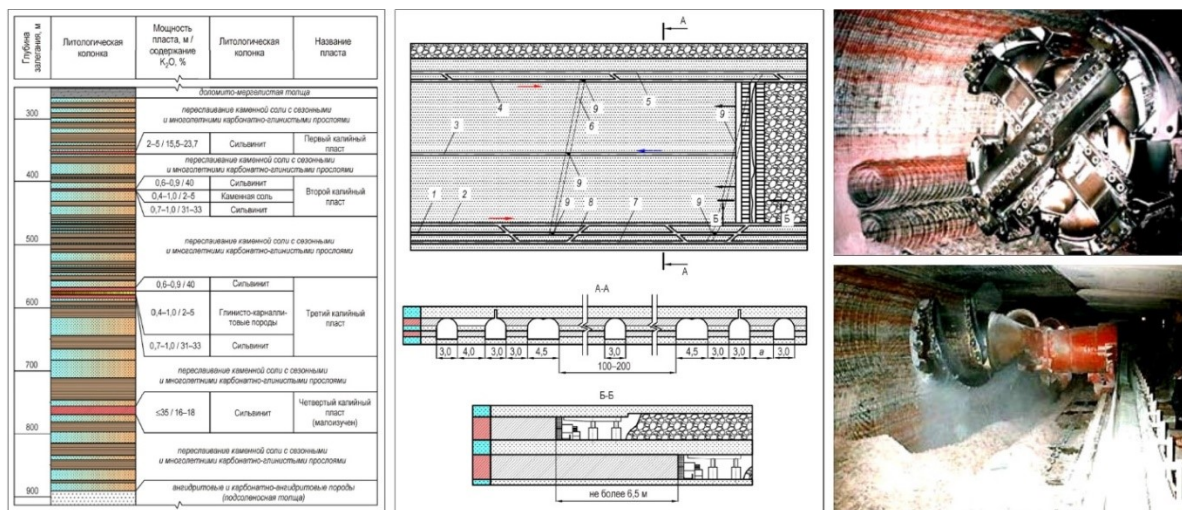


Рис. 7. Геологическая колонка и способ обработки Старобинского месторождения калийных солей

При разработке соляных рудников одним из условий безопасного ведения горных работ является достаточная мощность водозащитной толщи и ее способность препятствовать проникновению рассолов в горные выработки после обработки продуктивных горизонтов. Использование геофизических методов с целью контроля состояния массива закреплено в действующих «Правилах по защите от затопления».

Для регистрации упругих колебаний применяются сейсмоприемники, ориентированные по оси, являющейся перпендикуляром к поверхности стенки выработки.

Расстояние между пунктами приема выбирается из условий обеспечения четкой корреляции фаз регистрируемых волн между каналами. Так, при частоте колебаний 800-1000 Гц и скоростях распространения продольных колебаний 4000-4300 м/с шаг между пунктами приема не превышает 2 м.

На рисунке 8 показан отрезок профиля сейсмических исследований, где кровля соленосной толщи к забою вентиляционного штрека (начальным пикетам профиля) резко погружается с 75 до 45 м, амплитуда погружения составляет 30 м. Наличие перерывов корреляции в прослеживании отражающего горизонта, характеризуемого как граница контакта соленосной и глинисто-мергелистой толщ на крыле складки, позволяет утверждать о присутствии трещиноватых и выщелоченных пород в данной части геологического разреза [6].

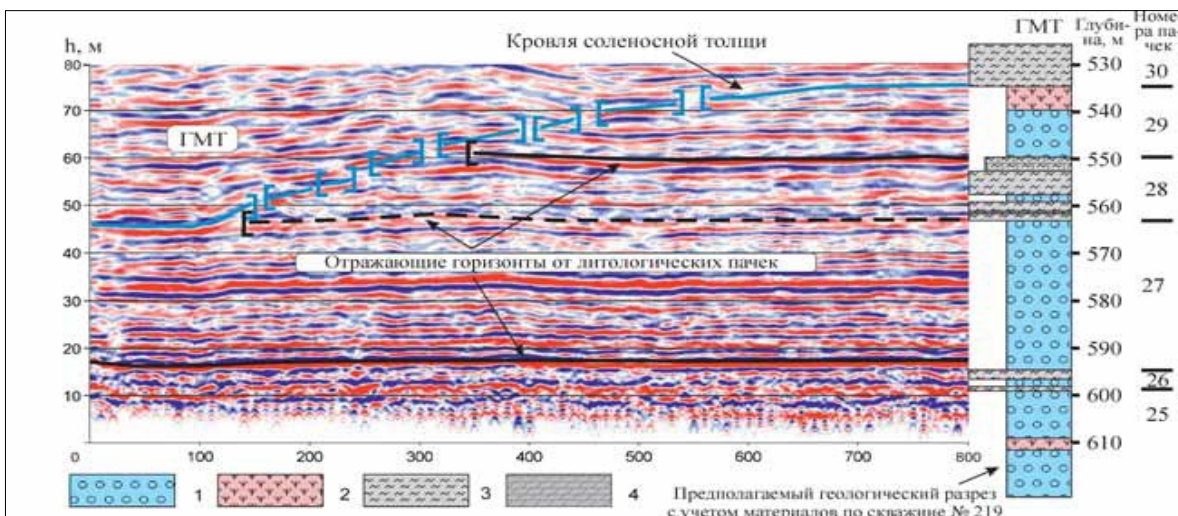


Рис. 8. Пример построения глубинного геологического разреза по данным сейморазведки МОГТ для оценки залегания и состояния кровли соленосной толщи

Гремячинское месторождение (Россия)

Продуктивный сильвинитовый пласт Гремячинского месторождения калийных солей залегает на глубинах от 900 до 1100 м. Верхняя часть разреза представлена осадочными породами (переслаивание глин, песчаников, аргиллитов...). ВЗТ представлена переслаиванием ангидритов, доломитов, каменной соли. Ниже продуктивного пласта залегают карналлитовые породы, мощностью от 3 до 15 м.

Из-за сложного геологического строения проходка подготовительных выработок осуществляется по направлениям, гипсометрия пласта в которых наиболее пологая (рисунок 9).

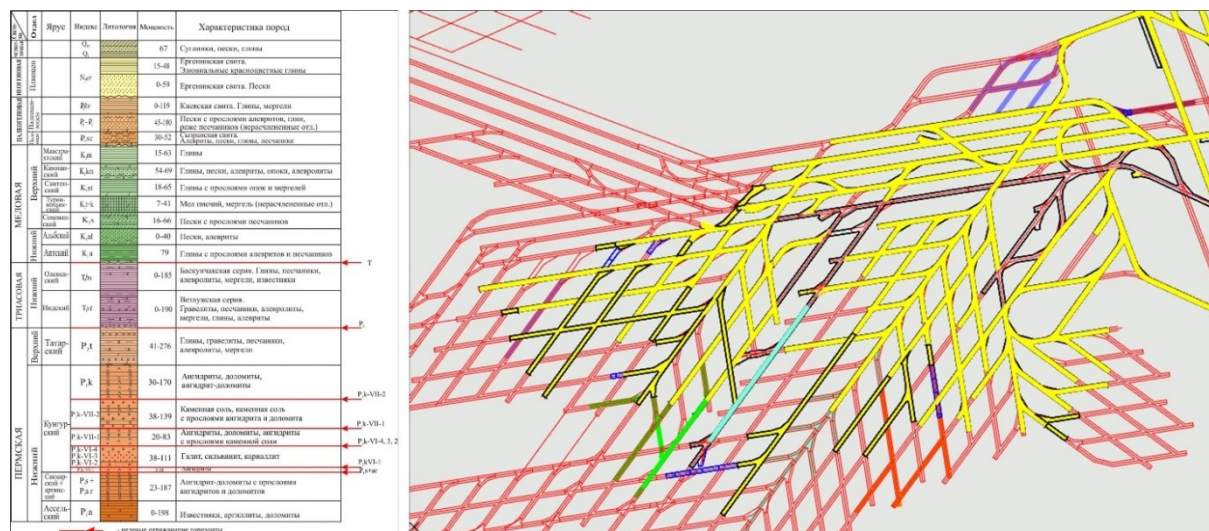


Рис. 9. Геологическая колонка и способ отработки Гремячинского месторождения калийных солей

На всем лицензионном участке проведены наземные 3D сейморазведочные исследования. Применялась технология отработки типа «крест» с шагом 100 м между линиями приёма (ЛП) и 100 м между линиями возбуждения (ЛВ). Интервал для ПВ – 25 м, для ПП – 25 м. Определены целевые отражающие горизонты. Построены сейсмогеологические разрезы.

В настоящее время ведутся шахтные сейморазведочные работы по выделению кровли верхнего слоя каменной соли (принятой как кровля ВЗТ) методом поперечных отраженных волн. Регистрация сейсмических волн осуществляется цифровой сейсмической станцией, имеющей 64 канала. В качестве приемников использовались горизонтальные сейсмоприемники. Высота расположения приемников в стенке составляет 1,4-1,5 м от подошвы выработки. Расстояние между пунктами приема и пунктами возбуждения – 2 м. Тип системы наблюдений – центральная [7].

По результатам работ строятся совмещенные результаты наземной 3D-сейморазведки (~60-80 Гц) с результатами шахтных сейморазведочных работ (~300-400 Гц) в пределах одного участка (рисунок 10).

Таким образом, в различных сейсмогеологических условиях соляных месторождений наиболее информативным геофизическим методом представляется шахтная сейморазведка по методике многократных перекрытий. При этом применяться могут различные типы упругих волн. Представляется возможным решение структурных и литолого-фациальных задач по обеспечению безопасности ведения горных работ.

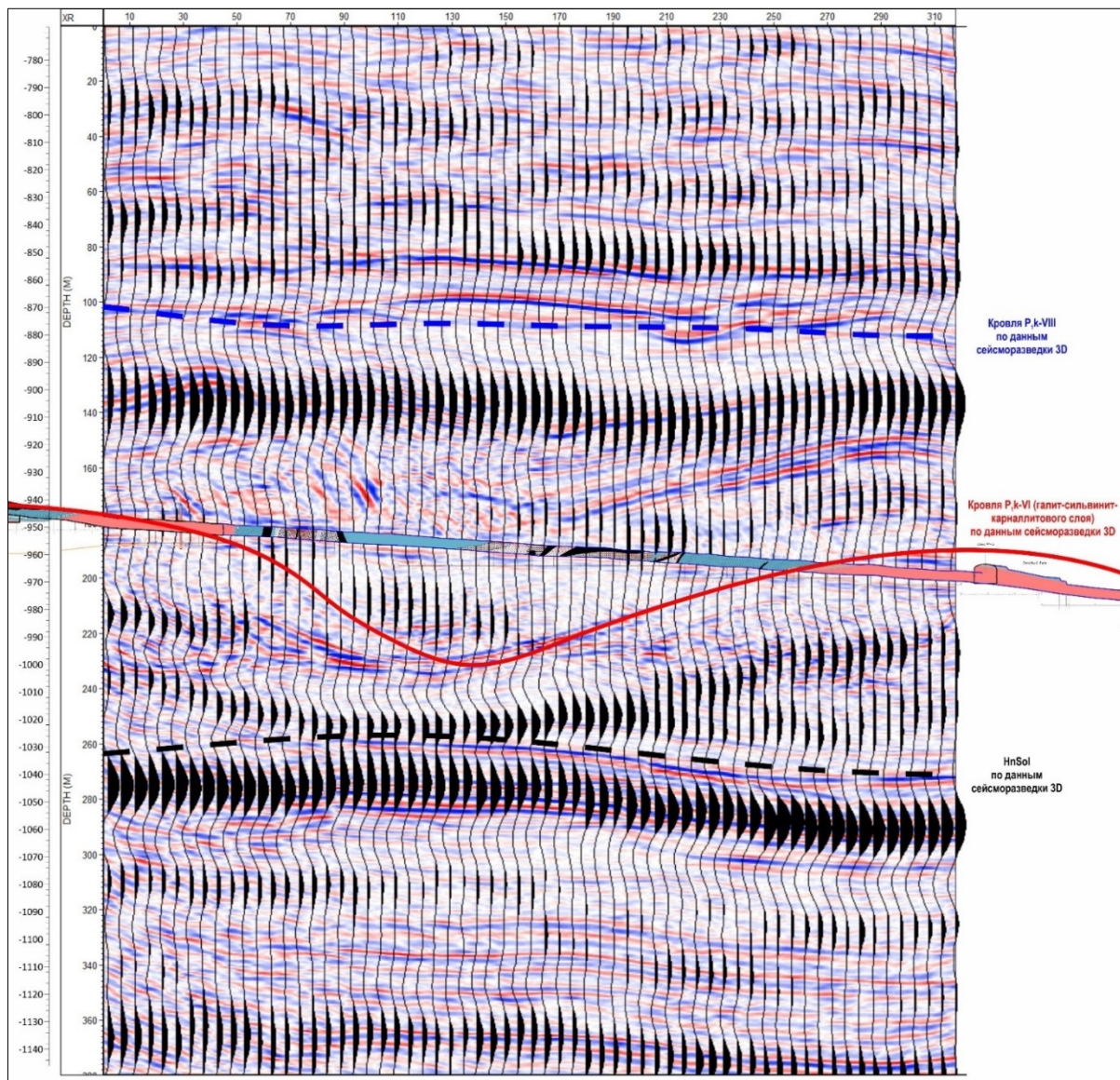


Рис. 10. Глубинный разрез вдоль горной выработки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.А., Секунцов А.И. Разработка калийных месторождений: практикум. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
2. Gendzwil D.J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // *Geophysics*. – 1993. – V. 58, № 5. – P. 741-748. – DOI: 10.1190/1.1443459.
3. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
4. Бабкин А.И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – № 1. – С. 261-267.
5. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 186 с.: ил.
6. Вагин В.Б., Ефимов А.М., Кулагов Е.В. Исследования и оценка состояния водозащитной толщи над калийными горизонтами геофизическими методами // *Горный журнал*. – 2014. – № 2. – С. 11-15.
7. Кулагов Е.В., Хвесеня С.С., Иванов С.В., Богдан С.И. Сейсморазведка методом отраженных волн в подземных выработках Гремячинского месторождения калийных солей // *Инженерная и рудная геофизика – 2023: сб. материалов 19-ой науч.-практ. конф. и выставки, 15-19 мая 2023 г.* – СПб., 2023. – С.