

печения окупается только при ряде специфических условий. Приобретение лицензий проприетарных программ является не самым лучшим выходом: возникает постоянная зависимость от разработчика, которая приводит с одной стороны к деградации собственного научно-исследовательского потенциала, а с другой является бесплатной помощью другой стороне, продающей «черные ящики».

Одним из кардинальных решений является переход на свободное программное обеспечение, которое позволяет самостоятельно модифицировать и распространять программное обеспечение, эффективно взаимодействовать с другими научными группами, работающими в соответствующих направлениях по всему миру, с потенциальной возможностью монетизировать разработки, выполняя различный спектр услуг (обучение, консультации, разработку под заказ и др.).

Рассмотрены особенности четырех главных пакетов программ и библиотек, реализующих алгоритмы, созданные на языке программирования Python, необходимые для обработки и интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки. Проанализированы главные функциональные блоки программного обеспечения и показаны их возможности. Поскольку гравиметрия и магнитометрия являются методами, использующими геопотенциальные поля и для них недостижима детальность, предоставляемая сейсморазведкой, то важным направлением развития грави- и магниторазведки является развитие технологий комплексирования, широкие возможности для которых предоставляют библиотеки языка Python, интеграция с геоинформационными системами, а также другие новые направления, которые становятся возможными с использованием современного свободного программного обеспечения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Leroux M. PyGMI: an open source Generic Measurement Interface for data acquisition and instrument control, in Python with graphics in Qt. 2015, August. – DOI: 10.13140/RG.2.1.2254.5126.
2. Rücker C., Günther T., Wagner F.M. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics // Computers and Geosciences. – 2017. –V. 109. – P.106-123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011>.
3. Uieda L. Verde: Processing and gridding spatial data using Green's functions. // Journal of Open Source Software. – 2018. – V. 3, № 29. –P. 957. – DOI:10.21105/joss.00957.
4. Uieda L., Soler S.R., Rampin R., van Kemenade H., Turk M., Shapero D., Banihirwe A., Leeman J. Pooch: A friend to fetch your data files // Journal of Open Source Software. – 2020. – V. 5, № 45. – P. 1943. DOI:10.21105/joss.01943

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2020.3.13

## ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗОНАХ РАЗВИТИЯ СОЛЯНОГО КАРСТА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Жикин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** На основе математического моделирования волновых полей на участке развития соленого карста на примере Харюшенского поднятия, расположенного в пределах Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей, выполнена оценка информативности малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения в комплексе с шахтными сейсмоакустическими исследованиями.

**Ключевые слова:** малоглубинная сейсморазведка, шахтная сейсморазведка, синтетический временной разрез

Одной из приоритетных задач предприятий горнодобывающего комплекса является контроль безопасности ведения горных работ, особенно в опасных зонах, что требует от организаций обеспечения геологических служб оперативной, всесторонней информацией об участках недр, требующих детального изучения, с последующей корректировкой плана или разработкой специальных проектов ведения горных работ. Геофизические исследования в потенциально опасных зонах зарекомендовали себя как эффективный способ актуализации состояния подрабатываемого массива.

На крупнейшем в Европе Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей (ВКМКС) геологическая служба обеспечивается информацией о состоянии продуктивной части массива и перекрывающих её отложений на основе комплексных геофизических наблюдений, где лидирующее место занимает малоглубинная сейсморазведка высокого разрешения в комплексе с шахтными сейсмоакустическими исследованиями на основе методики многократных перекрытий [4].

Специфика обеспечения безопасной разработки данного месторождения заключается в сохранности водозащитной толщи (ВЗТ), разграничивающей промышленные пласты солей с вышележащими толщами водонапорных горизонтов.

По строению и составу пород ВЗТ разделена на три части: ВЗТ<sub>1</sub> (чередование калийно-магниевых солей и каменной соли), ВЗТ<sub>2</sub> (покровная каменная соль) и ВЗТ<sub>3</sub> (ритмичное чередование мергелей и каменной соли) [1]. К одной из наиболее критических зон для ведения очистных работ относятся участки неполного строения ВЗТ. В случае деформации подработанного массива существует потенциальная угроза образования канала проникновения надсолевых вод в часть ВЗТ, которая характеризуется полным разрезом, что может привести к ослаблению прочностных свойств и образованию коллапсовых зон.

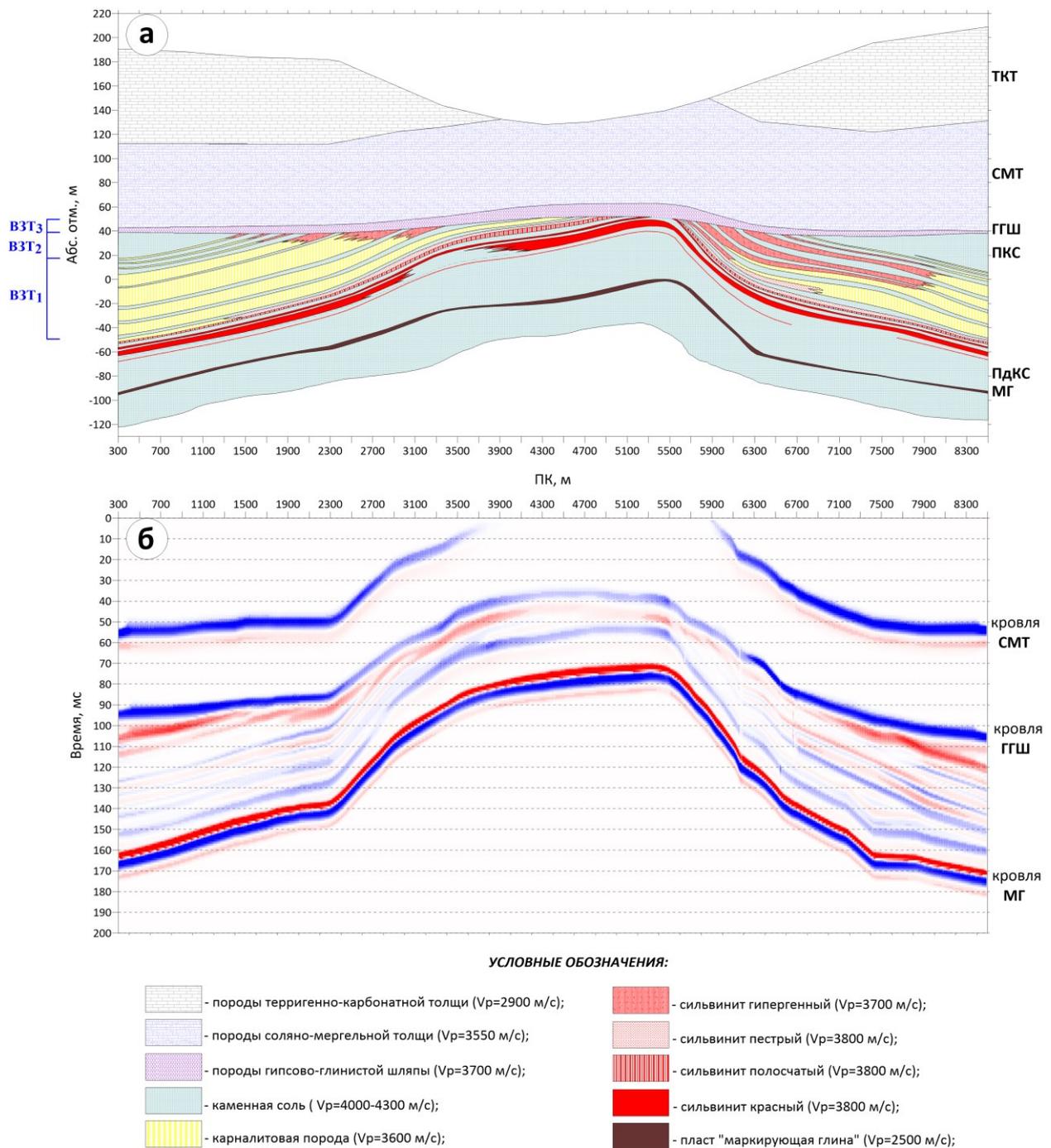
Интервалы неполного строения ВЗТ приурочены, как правило, к участкам развития соляного карста. Карстовые процессы на территории ВКМКС достаточно широко развиты, ими затронуто 27% площади калиеносной залежи [2].

Соляной карст отличается от карста карбонатных и гипсовых пород тем, что он не связан с образованием карстовых полостей и пещер. Сущность соляного карста заключается в выщелачивании (подземном растворении соляных пород) каменной и калийной солей подземными водами и накоплении на их месте нерастворимых компонентов, содержащихся в соляных породах [3]. Последние формируют так называемые гипсово-глинистые и гипсово-ангидритные шляпы. Выщелачивание соляных пород подземными водами наиболее интенсивно протекает на участках тектонических поднятий и куполов, где практически отсутствует верхний водоносный горизонт, а также там, где местоположение поверхностных водостоков совпадает с вершинами тектонических структур.

В большинстве случаев зоны выщелачивания обладают достаточно высоким контрастом скоростей распространения упругих волн по сравнению с вмещающими породами, вследствие чего их картирование может быть облегчено применением сейсморазведочных исследований. Так, в гипсово-глинистых отложениях скорость упругих волн составляет 3300-3700 м/с, а в более распространенных гипсово-ангидритовых – порядка 3700-3800 м/с. Это обеспечивает возможность локализации подобных неоднородностей по аномалиям волнового поля, хотя подобного вида геологические аномалии при соблюдении всех регламентов очистных работ прямой угрозы для безопасности их ведения не представляют.

Для выявления закономерностей распределения волновых полей однократно-отраженных волн в области выклинивания соленосных пластов на уровне отражающего горизонта «соленое зеркало» (граница между карстогенными и соляными породами)

выполнено математическое моделирование для геологического разреза верхней части соленой толщи на Харюшенском поднятии ВКМКС.



**Рис. 1.** Сейсмогеологическая модель зоны выщелачивания (а) и полученный для нее синтетический временной разрез (б) для условий наземной малоглубинной сейсморазведки высокого разрешения

Волновое поле (Рис. 1, б) получено при моделировании следующей наземной системы наблюдения: тип расстановки – симметричная, длина расстановки – 64 канала, шаг между пунктами приёма и пунктами возбуждения – 8 метров, длина записи – 500 мс, шаг дискретизации – 1 мс, в качестве импульса для свертки использована затухающая синусоида с частотой 80 Гц, протяженность профильной линии 8200 м.

В пределах участка вышележащие породы на границе «соляное зеркало» представлены высокоскоростными породами (3500-3700 м/с) гипсово-глинистой шляпы (мергель глинистый, гипс белый мелкозернистый до 70-80%), нижележащие подклинивающие породы представлены гипергенными соленосными пластами карналлита (сильвинитовые шляпы), сильвинита, каменной соли со скоростями прохождения продольных волн в диапазоне от 3600 до 4300 м/с (Рис.1, а). В данном случае имеет место периодическая (физически шероховатая) отражающая граница, для которой характерна сложная интерференция волн, дифрагированных от разных участков границы, что обусловлено изменением физических свойств соприкасающихся сред, приводящим к изменению коэффициентов отражения (прохождения) [5].

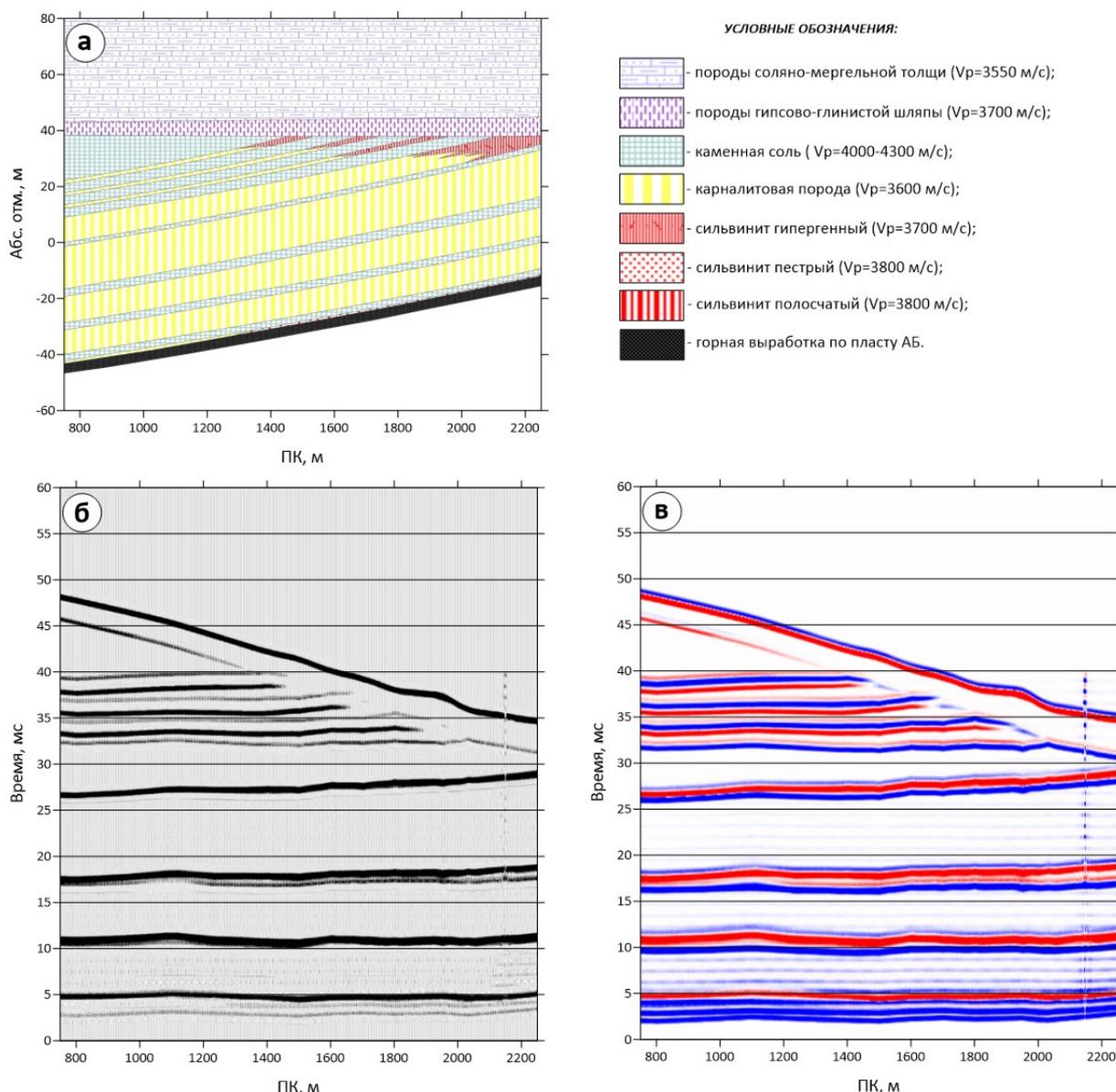
Следует отметить наличие слабой скоростной контрастности, а на некоторых участках границы «соляное зеркало» примыкающие пласты имеют равные скорости, что приводит к образованию обрывистых и слабых отраженных сигналов или полному отсутствию отражений от подошвы гипсово-глинистой шляпы (Рис. 1, б). Данный факт существенно осложняет разделение отражающих границ от представленных горизонтов, к тому же на реальных волновых полях может наблюдаться сложная интерференционная картина с интенсивными дифракционными явлениями.

В натуральных условиях в случае приближения очистных работ к участку с неполным строением ВЗТ контроль состояния перекрывающих продуктивные пласты пород осуществляется, в том числе, с привлечением шахтных сейсмоакустических исследований. Оценка информативности подобных мероприятий для модели Харишинского поднятия осуществлялась на основе рассчитанного синтетического волнового поля (Рис. 2) с применением шахтной системы наблюдения: тип расстановки – симметричная, длина расстановки – 64 канала, шаг между пунктами приёма и пунктами возбуждения – 2 метра, длина записи – 60 мс, шаг дискретизации – 0,1 мс, в качестве импульса для свертки использована затухающая синусоида с частотой 800 Гц, протяженность профильной линии 4320 м, регистрация колебаний из пласта АБ.

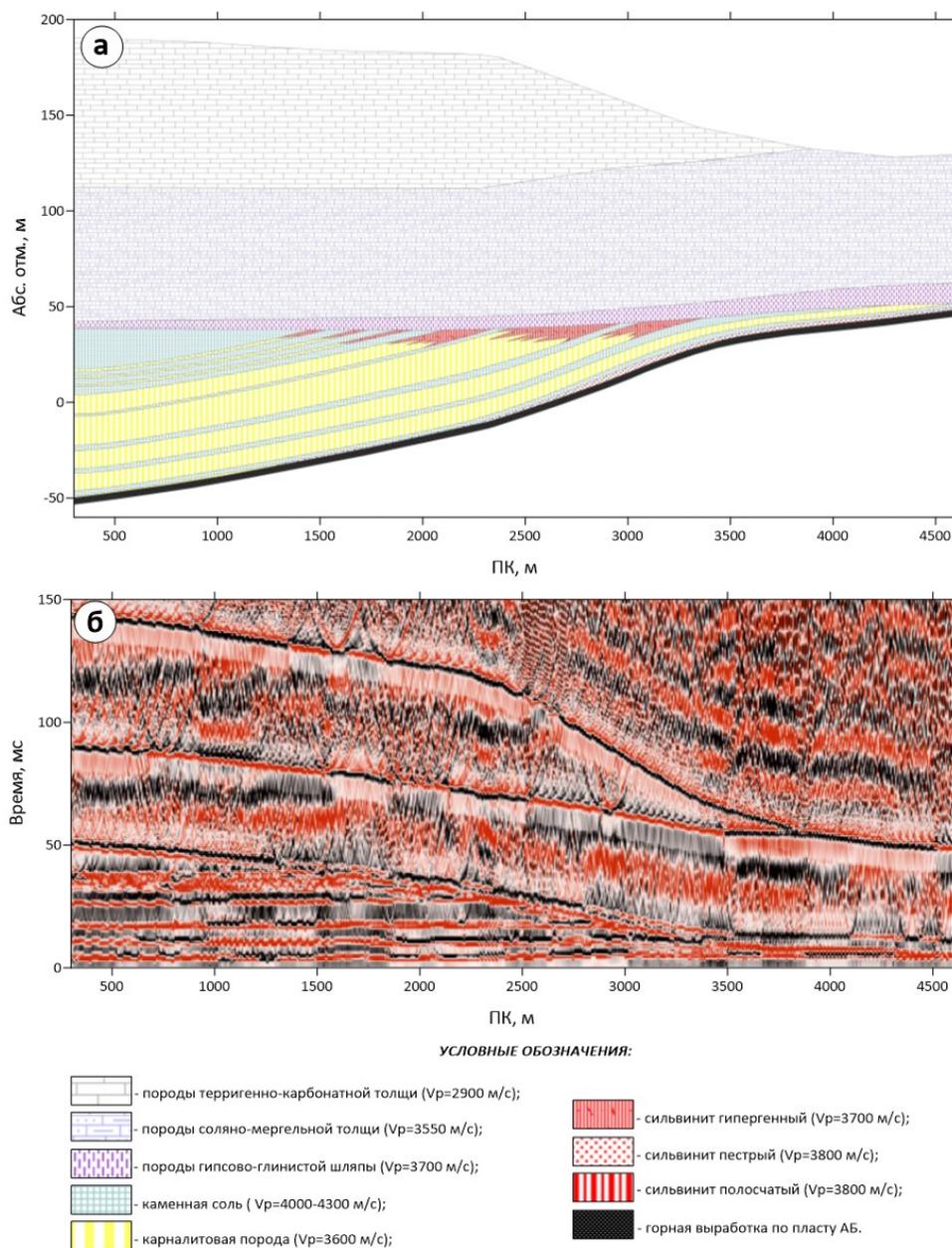
Анализ синтетического волнового поля одиночно-отраженных волн, рассчитанного для условий шахтных наблюдений, выявил ряд особенностей: 1) за счёт высокой вертикальной разрешающей способности метода (1,5-1,7 м), которая на порядок превышает данную характеристику в случае наземных наблюдений, достигается высокая динамическая контрастность горизонта «соляное зеркало» (Рис. 2, б, в); 2) подклинивающиеся пласты гипергенных карналлитов (сильвинитовые шляпы) вносят деструктивный вклад в формирование отражений на границе «соляное зеркало», частично или полностью нарушая прослеживание оси синфазности от указанной границы в местах примыкания пластов (Рис. 2, б, в); 3) кровля гипсово-глинистой шляпы уверенно выделяется во всех интервалах временного разреза (Рис. 2, б, в).

Выявленные особенности также проявляются в акустической модели среды, где используются распределения продольных скоростей и плотностей пород, что позволило оперативно оценить волновые 2-D эффекты распространения сейсмической энергии в рассматриваемой геологической ситуации (Рис. 3). Полученное синтетическое волновое поле существенно осложнено интенсивными дифракционными явлениями, которые наиболее ярко проявляются в местах контакта соляных пластов с породами гипергенного карста на границе «соляное зеркало». Кроме того в данных областях отмечается инверсия отражённого сигнала за счёт ритмичной смены коэффициентов отражения вдоль границы (Рис. 3, б), что может быть принято за надёжный индикатор наличия физически шероховатого отражающего горизонта и рассматриваться в данном случае как признак проявления границы «соляное зеркало».

По результатам моделирования сейсмических сигналов в зоне развития соляного карста выявлены некоторые особенности распределения волновых полей. Технологии наземных сейсмических наблюдений позволяют разделять в исследуемой толще отражения от горизонтов, характеризующихся высокой контрастностью и тонкой слоистостью. Но наличие на границе «соляное зеркало» физически шероховатого отражающего горизонта, представленного чередующимися пластами сильвинитовых шляп (скорости распространения отраженных волн схожи со скоростями перекрывающей гипсово-глинистой шляпы) и пластов каменной соли существенно осложняет прослеживание данного горизонта как за счёт отсутствия сигнала в схожих по значениям коэффициентов отражения участках, так и за счёт интенсификации дифракционных явлений в местах контакта с высокоскоростной каменной солью. Реализация наблюдений в комплексе с шахтными сейсмоакустическими исследованиями позволяет повысить информативность технологии за счёт повышенной детальности и разрешающей способности метода.



**Рис. 2.** Сейсмогеологическая модель зоны выщелачивания (а) и полученный для неё синтетический временной разрез (б) и синтетический динамический временной разрез (в) для условий шахтных сейсмоакустических наблюдений



**Рис. 3.** Сейсмогеологическая модель зоны выщелачивания (а) и полученный для неё синтетический временной разрез (б) для условий шахтных сейсмоакустических наблюдений

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-45-590015 p\_a)*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Обоснование допустимых условий ведения горных работ при аномальном строении водозащитной толщи // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2011. – Вып. 1. – С. 220-227.
2. Кошнин В.И. Некоторые особенности соляного карста в районе Верхнекамского месторождения // Гидрогеологический сборник. – Свердловск, 1964. – №3. – С. 161-167.
3. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
4. Санфиров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
5. Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. – М.: Недра, 1985. – 288 с.: ил.