



УДК 550.3

Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения

Ю.А.КАШНИКОВ, А.О.ЕРМАШОВ , А.А.ЕФИМОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Крупные аварии на ОАО «Уралкалий» поставили вопрос о необходимости детального изучения геологического строения Верхнекамского месторождения калийных солей, выявления аномальных сложнопостроенных зон в надсолевых породах и, прежде всего, в водозащитной толще (ВЗТ).

Предложен метод выделения ослабленных зон в ВЗТ и калийных продуктивных пластах, основанный на комбинированном использовании геомеханических (лабораторные испытания керна) и геофизических (акустический широкополосный каротаж в скважинах и наземная сейсморазведка) исследованиях. По сути дела, предложена методика районирования ВЗТ и калийных пластов по физико-механическим свойствам с получением их конкретных значений. Данная методика поможет решить наиболее актуальную проблему обеспечения промышленной безопасности при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей – сохранности ВЗТ.

Реализация предложенного метода рассматривается для Романовского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. Проведена сейсмика 2D, выполнены испытания физико-механических свойств и получены статистические зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами. На основе обработки материалов сейсмики и полученных зависимостей создана геолого-геомеханическая модель данного участка и выделены зоны с различными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: сейсмика; геомеханика; геология; физико-механические свойства; акустический импеданс

Благодарность. Авторы статьи выражают искреннюю благодарность главному инженеру ПАО «Уралкалий» Е.К.Котляру, который инициировал проведение данных исследований, а также главному маркшейдеру ПАО «Уралкалий» А.М.Мачерету за постоянное внимание и помощь в проведении исследований.

Как цитировать эту статью: Кашников Ю.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения / Ю.А.Кашников, А.О.Ермашов, А.А.Ефимов // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 259-267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259

Введение. Геологической особенностью большинства калийных месторождений мира является наличие обводненной толщи пород, залегающих непосредственно над продуктивными калийными пластами. Часть горного массива, расположенную между калийными пластами и обводненными породами, принято называть водозащитной толщей (ВЗТ). На Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) водозащитной толщей является часть водонепроницаемого разреза горного массива (мощность 50-140 м), расположенная между обрабатываемым горными работами пространством и горизонтом, содержащим слабоминерализованные воды и имеющим активный водообмен с вышележающими пресноводными горизонтами мощностью от 150 до 350 м.

Аномальные особенности в геологическом строении водозащитной толщи, представляющие опасность для затопления калийных рудников надсолевыми водами, представляют зоны развития гипергенных сильвинитов, трещиноватости, с неполным разрезом водозащитной толщи, развития динамических разновидностей каменной соли, пликативных дислокаций с высокой амплитудой, замещением каменной солью сильвинита промышленных пластов [4, 8].

Постановка проблемы. При отработке месторождения для выявления аномальных зон в калийных продуктивных пластах и водозащитной толще, через которые возможно проникновение надсолевых вод в горные выработки, применяются наземные, подземные и наземно-подземные методы и комплексы геофизики и геомеханики [1]. Авторы статьи предлагают эффективный метод выделения зон с различными физико-механическими свойствами в ВЗТ и продуктивных калийных пластах, основанный на комбинированном использовании геомеханических и геофизических подходов [2, 10, 12].

Описание предлагаемого метода. Суть метода заключается в получении на соответствующем лабораторном оборудовании корреляционных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами, корректировании полученных зависимостей по резуль-

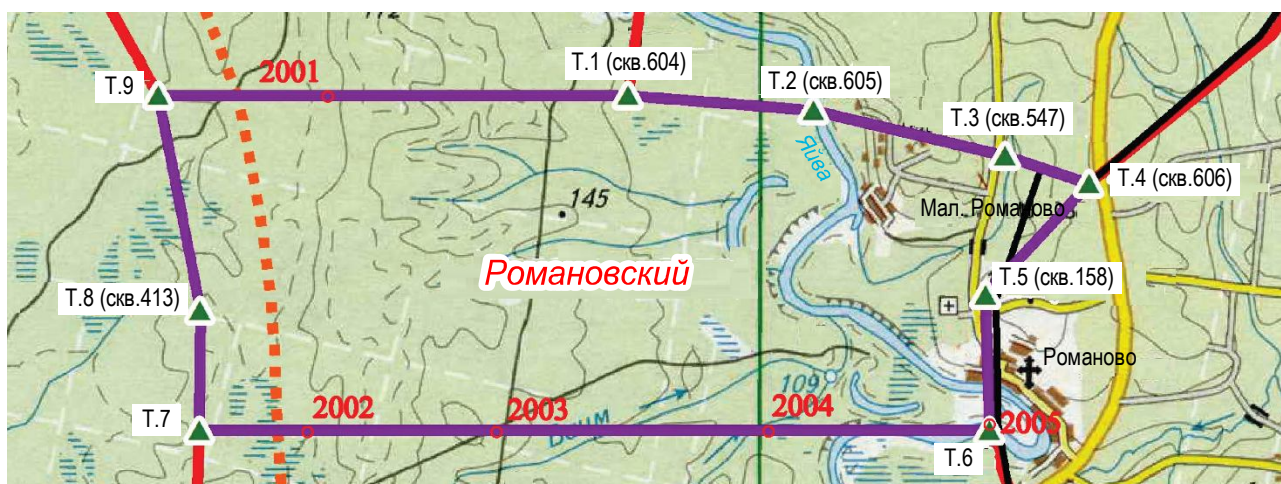


Рис.1. Схема расположения Романовского участка

татам геофизических исследований скважин, получении на основании обработки данных сейсмики 2D и 3D распределения скорости продольной волны и акустического импеданса и, наконец, выделении с использованием полученных зависимостей в массиве ВЗТ и калийных пластах зон с различной степенью уплотнения. По сути дела, возникает возможность получить в любом слое (в любой точке) массива ВЗТ распределенные значения таких геомеханических параметров, как прочность на одноосное сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона и ряд других. Последующее решение задачи геомеханического моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ предполагает использование уже конкретных значений физико-механических свойств пород, слагающих ВЗТ и калийные пласты.

В основе этого метода лежит геологическая информация по строению ВЗТ, геофизическая информация, полученная, прежде всего, из результатов обработки сейсмики 3D (или 2D), геофизические исследования скважин (ГИС) и геомеханические зависимости, полученные в результате испытаний кернового материала. Все это в совокупности является основой геолого-геомеханической модели (ГГМ) ВЗТ и калийных пластов, которая, в свою очередь, является основой для достижения последующей цели – получения в результате геомеханического моделирования надежных, отражающих реальность данных о развитии деформационных процессов в ВЗТ и калийных пластах при различных параметрах системы разработки.

Отметим, что геолого-геомеханические модели широко используются авторами данной работы и зарубежными специалистами для выделения уплотненных и разуплотненных зон в продуктивных объектах нефтяных и газоконденсатных месторождений [6, 9, 11-13]. В рамках данной статьи рассматривается создание геолого-геомеханической модели Романовского участка ВКМКС по линии солеразведочных скважин 2002-2003-2004-2005 (рис.1).

Комплекс работ по созданию модели состоял из следующих этапов.

1. Обработка комплекса геофизических исследований по определению динамических значений физико-механических свойств пород ВЗТ методом скважинного акустического широкополосного каротажа в скважинах 2004 и 2005.

2. Отбор керна из пород соляной толщи в скважинах 2004 и 2005, подготовка образцов для определения их физико-механических свойств.

3. Определение физико-механических статических и динамических характеристик образцов керна на установке ПИК-УИДК/ПЛ.

4. Установление статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками пород. Сопоставление с ранее установленными зависимостями.

5. Проведение геофизических исследований методом сейсмики 2D (12,5 км) по линии скважин 2002-2003-2004-2005, получение скоростных характеристик разреза и определение динамических характеристик пород ВЗТ и калийных пластов по линии данных скважин.

6. Создание геолого-геомеханической модели участка месторождения в специализированном программном обеспечении, прогноз физико-механических свойств пород ВЗТ по скважинам

2002 и 2003 и сравнение полученных результатов с фактическими результатами испытаний kernового материала из этих скважин.

Для установления статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками пород ВЗТ и продуктивной толщи был отобран kern диаметром 100 мм из геологоразведочных скважин 2004 и 2005 Романовского участка Верхнекамского месторождения калийных солей. Интервал глубин отбора kern составил от 215 до 318 м по скв. 2005 и от 300 до 390 м по скв. 2004 и охватывал почти весь разрез соляной толщи: породы пластов переходной пачки, покровной каменной соли, сильвинит-карналлитовой зоны и сильвинитовой зоны.

Из проб kernового материала изготавливались цилиндрические образцы с отношением высоты к диаметру 2:1 (60×30 мм). Всего было изготовлено 145 образцов (см. таблицу).

Исследования геомеханических свойств kernового материала выполнялись на установке Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) ПИК-УИДК/ПЛ. Основное внимание в работе было уделено испытаниям на одноосное сжатие (102 образца) [7], так как данный физико-механический параметр представляет наибольший интерес для инженерных расчетов [8]. Для определения параметров паспорта прочности также были проведены испытания в трехосном напряженном состоянии (43 образца).

Общая программа объемных (трехосных) и одноосных испытаний образцов на упругие и прочностные свойства следующая:

1) нагружение образца до пластовых условий; в качестве пластовых условий для данных образцов принято гидростатическое поле напряжений ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H$);

2) выдержка образца до стабилизации деформаций $\partial \varepsilon_{vol} / \partial t = 0$;

3) измерение скоростей продольных и поперечных волн V_p , V_s в пластовых условиях;

4) создание условий эксперимента (одноосное или трехосное сжатие);

5) увеличение осевой нагрузки с постоянной скоростью осевой деформации ($2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) вплоть до разрушения образца.

По результатам проведенных испытаний были найдены зависимости:

- статического модуля упругости в атмосферных и пластовых условиях от динамического модуля упругости, скорости продольной волны, акустического импеданса;

- предела прочности на одноосное сжатие от скорости продольной волны и акустического импеданса.

Для примера на рис.2 представлены зависимости предела прочности на одноосное сжатие от скорости продольной волны. Установлено, что для каменной соли зависимость предела прочности от параметра V_p имеет меньшую корреляцию, чем для сильвинита, это связано с значительной неоднородностью образцов (наличием включений, слоистости, различным размером зерен и т.д.).

Количество испытанных образцов

Порода	Сжатие	
	одноосное	трехосное
Каменная соль	45	22
Сильвинит	45	17
Карналлит	12	4
Сумма	102	43

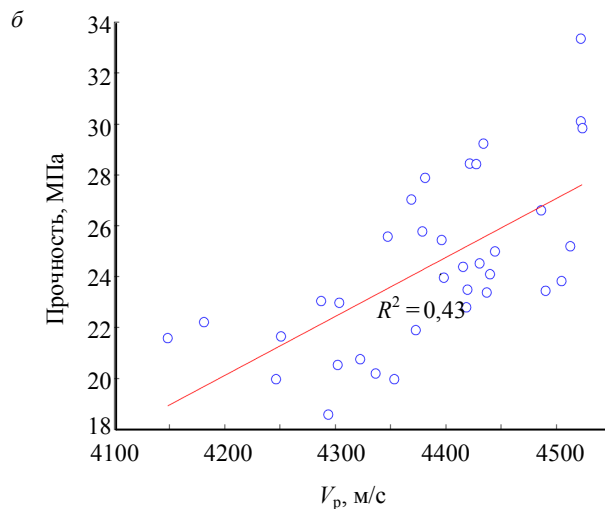
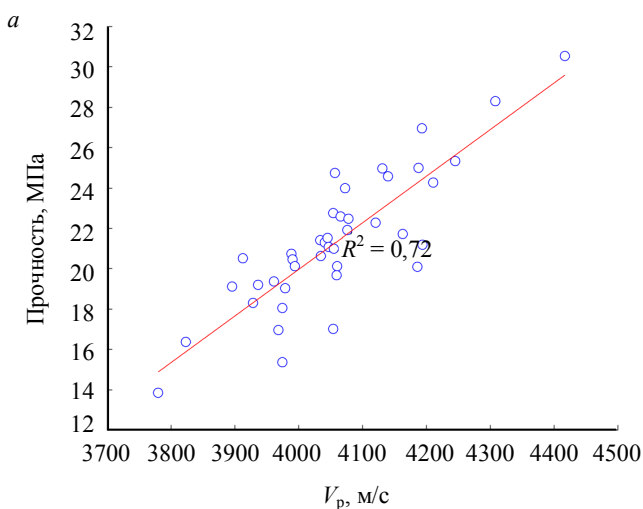


Рис.2. Зависимость прочности на одноосное сжатие сильвинита (а) и каменной соли (б) от скорости продольной волны

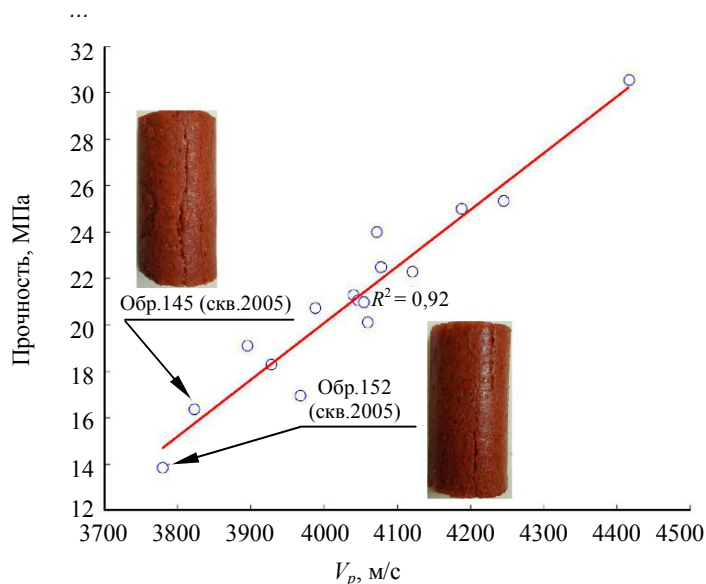


Рис.3. Зависимость прочности на одноосное сжатие образцов сильвинита от скорости продольной волны

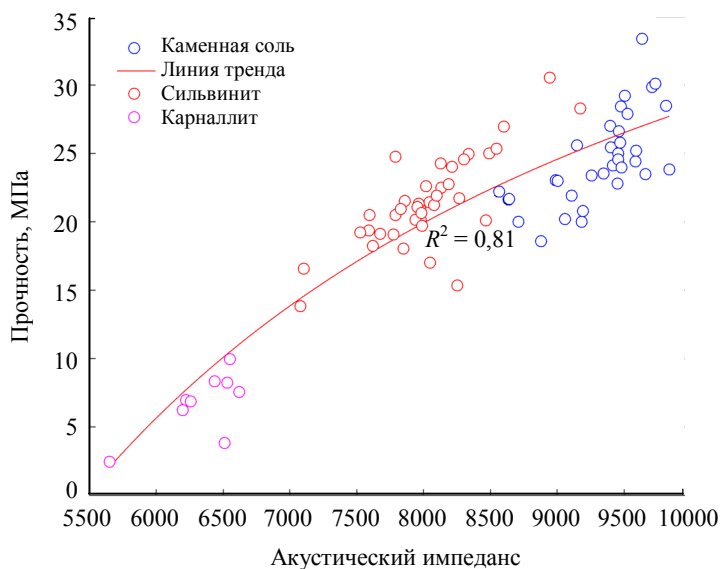


Рис.4. Зависимость прочности на одноосное сжатие от акустического импеданса

Следующим этапом было решение задачи определения упругих динамических характеристик соляной и надсоляной толщ в районе исследуемого участка на основе определения скоростей продольных и поперечных волн V_p и V_s и объемной плотности ρ . Для решения этих задач использовались материалы сейсмоки 2D, выполненные по линии скважин в комплексе с результатами геофизических исследований скважин 2004 и 2005.

В работе использован один из нескольких методов сейсморазведки – метод отраженных волн по методике общей глубинной точки. Работы выполнены по линии в направлении с запада на восток по скважинам 2002-2003-2004-2005 одним непрерывным профилем, что позволяет провести непрерывное прослеживание отражающих горизонтов на всем протяжении указанной линии.

В процессе выполнения сейсморазведочных работ использовался взрывной источник упругих колебаний – аммонит 6ЖВ, патронированный по 200 г, с электродетонатором. Взрывы производились в скважинах глубиной от 1,5 до 2 м, диаметром 60-80 мм, заряды в скважинах тапировались.

Обработка сейсмических материалов. Главной целью обработки полевых сейсмических материалов являлось получение сейсмического разреза с высоким соотношением сигнал – помеха

Отдельно была получена зависимость прочности на одноосное сжатие для образцов, взятых из пласта КрII (рис.3). Прочность на одноосное сжатие продуктивных пластов является одним из основных физико-механических параметров, определяющих степень нагружения целиков и, соответственно, параметры системы разработки [8]. Коэффициент детерминации превышает 0,9, что говорит о весьма высокой функциональной связи параметров. Более высокая связь параметров по сравнению с общей зависимостью для сильвинита связана с достаточно однородными образцами, полученными из пл.КрII.

Прочность на одноосное сжатие сильвинита пл.КрII, как и скорость ультразвука, варьирует в широких пределах ($\sigma_{сж} = 13 \div 30$ МПа, $V_p = 3800 \div 4400$ м/с). Низкие значения прочности связаны с трещинами в образцах (рис.3), что отражалось и на скорости ультразвука. Высокие же значения прочности объясняются наличием в образцах включений каменной соли, что приводит к увеличению скорости ультразвука.

Для объединения прочности на одноосное сжатие в единую зависимость для всех типов пород применялся акустический импеданс (рис.4). Данная зависимость была использована при построении геолого-геомеханической модели по линии скважин 2002-2003-2004-2005. Для получения механических свойств по длине ствола скважины проводилась «увязка» статических упругих и прочностных параметров с каротажными данными.



в верхнем интервале записи для дальнейшего проведения сейсмической инверсии [3, 5]. Расчет статических поправок производился по первым вступлениям преломленных волн. Уровень приведения выбран по верхней точке рельефа.

В рамках процесса обработки была выполнена компенсация затухания амплитуд, для которой применялись коэффициенты усиления, рассчитанные как степенная функция времени. Для поверхностно-согласованной коррекции амплитуд сначала рассчитывались усредненные кривые изменения амплитуд в зависимости от удаления, а затем амплитудные поправки для каждого пункта взрыва (ПВ) и пункта приема (ПП). Для расчета коэффициентов усиления применялось окно, включающее полезный интервал записи.

С целью эффективного подавления низко- и среднескоростных волн-помех использовалась фильтрация в F-K-области, с применением симметричного с широким веером на подавление (eject) фильтра. Скорости линейных волн-помех для выбора фильтра оценивались по сейсмограммам общей точки возбуждения (ОТВ) и общей точки приема (ОТП). Фильтрация применялась по подборкам сейсмограмм, как ОТВ, так и ОТП совместно. Вычитание проводилось как до процедуры деконволюции, так и после.

Для выравнивания частотного спектра сеймотрасс с целью компенсации неидентичности условий возбуждения и приема была применена многофакторная минимально-фазовая поверхностно-согласованная деконволюция сжатия. С целью снижения уровня низко- и высокочастотных шумов применена постоянная по времени полосовая фильтрация в полосе частот $F_1 = 6 \div 10$ Гц, $F_2 = 80 \div 90$ Гц.

Автоматическая коррекция статических поправок проводилась несколько раз после уточнения кинематических поправок. Полученные корректирующие статические поправки позволили более полно учесть влияние неоднородностей верхней части разреза и повысить надежность последующего скоростного анализа.

По окончательным сейсмограммам была проведена коррекция остаточных фазовых сдвигов. Практика показывает, что выполнения процедур коррекции статических и кинематических поправок недостаточно для полного спрямления годографов отраженных волн. Как правило, в сейсмограммах остаются переменные по времени фазовые сдвиги, препятствующие синфазному суммированию полезного сигнала. Для повышения разрешенности сейсмической записи и устранения остаточного случайного шума по суммарным данным были применены такие процедуры, как амплитудная деконволюция и медианная фильтрация частотных срезов. Окончательным этапом обработки явилась процедура миграции.

Акустическая детерминистическая инверсия. Для решения задачи определения упругих характеристик (скоростей продольных волн V_p и объемной плотности ρ) целевых толщ в межскважинном пространстве (скважины 2002, 2003, 2004, 2005) применена технология акустической инверсии. В качестве исходных данных использовались результаты сейсмических работ 2D в комплексе с результатами ГИС. Подготовительный этап включал анализ и корректировку данных ГИС по скважинам для привязки, моделирования и построения фоновых моделей скоростей продольных волн и плотности.

Алгоритм динамической инверсии волнового поля включал следующие этапы:

1. Оценка формы сейсмического импульса проведена по материалам сейсмического профиля во временном интервале $\Delta T = 50 \div 300$ мс.

2. Выполнена детальная стратиграфическая привязка разрезов скважин к сейсмическим данным. Модельные сейсмические трассы, рассчитанные по данным ГИС, сопоставлялись с трассами сейсмического профиля с контролем по соответствию положения реперных отражающих границ на модельной и полевых трассах. Для привязки и последующей интерпретации использовались четыре отражающих горизонта (ОГ), которые были выделены и протрассированы в волновом сейсмическом поле: ОГРРАСНКА – кровля отложений переходной пачки; ОГCarnal – кровля карналлитового пласта; ОГSilvin – кровля сильвинитового пласта; ОГPodSilvin – подошва сильвинитового пласта.

3. Опорная фоновая модель импеданса была построена на базе скоростных и плотностных характеристик четырех скважин. В качестве геометрического каркаса модели послужили поверхности четырех основных отражающих горизонтов.

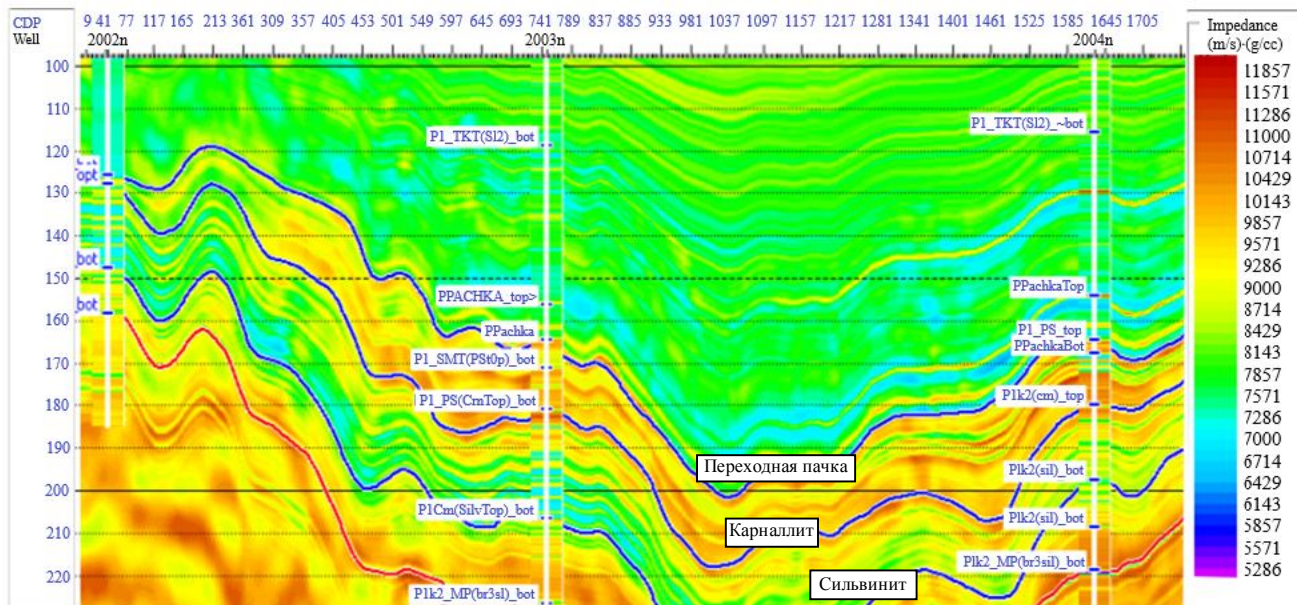


Рис.5. Сопоставление разреза псевдоакустического импеданса с импедансом по ГИС в скважинах 2002, 2003, 2004

4. Выбранный по итогам тестирования алгоритм инверсии (modelbased в модификации hard-constraint) обеспечил расхождение модельной и реальной кривых акустической жесткости до $415 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ ($\pm 7\%$).

5. Амплитудная инверсия выполнялась на основе оптимизационного подхода, который заключается в минимизации целевой функции, включающей в качестве слагаемых невязку между наблюдаемым и синтетическим волновым полем. Дополнительно накладываются различные ограничения на допустимую степень отклонения результата от опорной модели среды, обеспечивающие устойчивость и пространственную связность решения. В результате инверсии был получен куб акустического импеданса, соответствующий оптимальной модели.

Контроль качества результатов инверсии показал хорошее соответствие между сейсмическим и скважинным импедансом, что демонстрирует фрагмент финального разреза акустического импеданса, совмещенного с цветовыми колонками значений акустического импеданса по ГИС (рис.5).

Обсуждение результатов. Качественное выявление ослабленных зон ВЗТ, осложняющих разработку калийной залежи, основывается на анализе скоростных характеристик волнового поля. Снижение значений скоростей может быть обусловлено трещиноватостью, литологическим замещением более слабыми породами (глиной, карналлитом), тектоническими нарушениями, структурно-литологическими неоднородностями. Для количественной оценки снижения прочностных свойств были использованы зависимости акустического импеданса от физико-механических параметров соляных пород (см. рис.4). Эти зависимости и полученные на их основе распределения физико-механических свойств являются, по сути дела, геомеханической частью геолого-геомеханической модели ВЗТ и продуктивных калийных слоев. Таким образом, на основе полученного в результате обработки данных сейсмики 2D распределения акустического импеданса было установлено распределение прочности на одноосное сжатие по линии сейсмо-разведки скважин 2002-2003-2004-2005 (рис.6). Сплошными линиями показано положение кровли переходной пачки (ПП), сильвинитовой зоны (СЗ), пл. Е, сильвинит-карнеллитовой зоны (СКЗ), пл. КрII, пл. КрIII, а также маркирующей глины (МГ).

Из представленных результатов видно, что прослеживается слоистость разреза, т.е. чередование пород с низкой прочностью (карналлит, глина) и пород со средней и повышенной прочностью (сильвинит и каменная соль). Так, в районе скв. 2002 четко выделяются карналлитовые пласты прочностью менее 8 МПа, разделенные пластами каменной соли прочностью 22-28 МПа.

На основе полученного результата можно оценить зоны замещения. Так, по разрезу можно проследить зону замещения карналлита сильвинитом и каменной солью в районе скважин 2004-2005 (рис.6). Например, пласт Е в скв. 2004 имеет среднюю прочность 8 МПа, с удалением от скв. 2004 в сторону скв. 2005 прочность пласта растет и на расстоянии 800 м его значение пре-

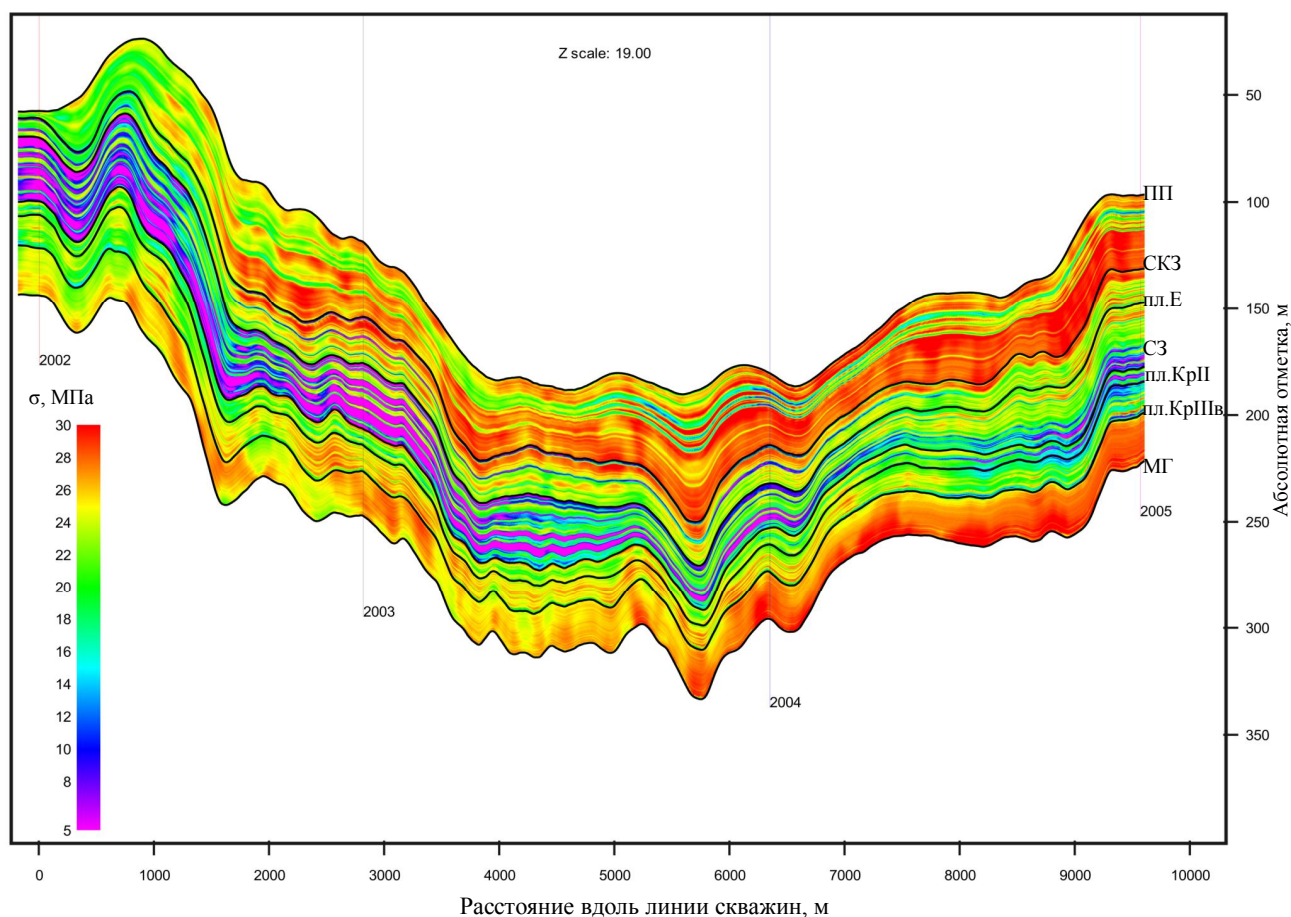


Рис.6. Распределение прогнозной прочности на одноосное сжатие вдоль линии скважин 2002-2003-2004-2005

вышает 15 МПа и дальше увеличивается, что связано с замещением слабых пород карналлита более прочными сильвинитом и каменной солью, что подтверждено результатами испытаний керна. Такой же анализ можно сделать и по остальным карналлитовым пластам.

Полученный результат позволил выделить локальную ослабленную зону в продуктивном пласте КрII на участке скважин 2004-2005 (рис.6). На расстоянии 1700 м от скв. 2004 и дальше к скв. 2005 прочность пласта падает до 16 МПа и ниже, что, скорее всего, связано с повышенным содержанием глин в пласте и наличием трещин. Данный результат подтверждается испытаниями керна, так как именно в скв. 2005 пласта КрII были получены низкопрочные образцы и низкие значения акустического широкополосного каротажа.

В рамках независимой проверки предложенной технологии выделения зон с различными физико-механическими свойствами было выполнено сравнение прогнозных значений распределения предела прочности на одноосное сжатие по скв. 2002 и скв. 2003 с независимыми испытаниями, выполненными специалистами Горного института (ГИ УрО РАН). Сравнительные данные (рис.7) показывают достаточно хорошее соответствие прогнозных и фактических значений прочности по скв. 2002. Средняя квадратическая ошибка составила $\pm 3,2$ МПа при размахе фактических значений прочности от 2 до 28 МПа. Учитывая погрешность привязки образцов по глубине до 0,5 м (иногда и больше), можно констатировать весьма удовлетворительное соответствие прогнозной прочности и прочности, полученной по результатам испытаний ГИ УрО РАН.

Анализируя прогноз по скв.2002, можно сделать вывод, что наибольшую прочность в сильвинит-карналлитовой зоне имеют слои каменной соли З-И,Е-Ж,В-Г (26 МПа). В остальных пластах (слои Ж-З, Д-Е, Г-Д) имеют значения прочности чуть ниже – до 25 МПа. Минимальная прочность (менее 22 МПа) приурочена к слоям межпластовой каменной соли (пласты Д, Г). Прочность слоев карналлита варьирует от 2 до 9 МПа.

Как уже было отмечено, понижение прочности в слоях каменной соли и сильвинита связано с наличием глинистых прослоев и включений карналлита. Так, например, в пласте Ж-З прочность падает с максимального в «чистой» каменной соли значения 24 МПа до минимального 20 МПа в

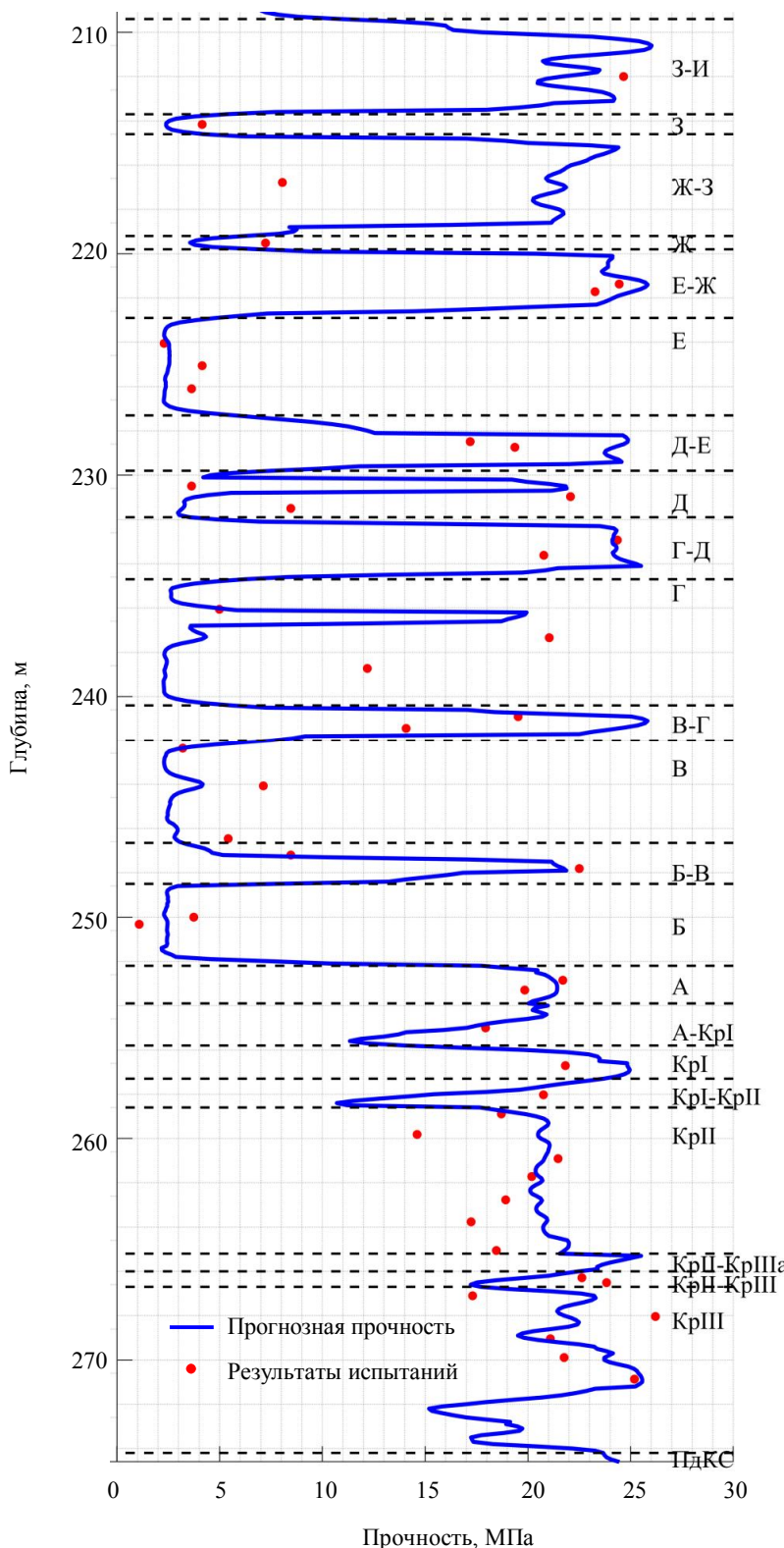


Рис. 7. Распределение экспериментальной (данные ГИ УрО РАН) и прогнозной (данные ПНИПУ) прочности по скв.2002

ском разрезе. На основе сейсмической инверсии было найдено распределение акустического импеданса как в районе скважин, так и в межскважинном пространстве. Последующее использование данного параметра позволило установить прогножное распределение предела прочности на сжатие в разрезе по ВЗТ и калийным пластам по скважинам 2002 и 2003. Независимое сравнение прогножного распределения прочности с результатами определения данного параметра, выполненного ГИ УрО РАН, показало их качественную и количественную сходимость. Все это позво-

местах наличия глин. В среднем в сильвинитовой зоне прочность слоев каменной соли меньше, чем в СКЗ. Минимум прочности (меньше 11 МПа) приурочен к пластам слоев КрI-КрII, А-КрI. Средняя расчетная прочность слоев сильвинита СЗ равна 20-23 МПа. Среднее значение прочности по продуктивному пласту КрII составляет 20,7 МПа, по пласту А – 20,6 МПа.

Проведенные испытания физико-механических свойств соляных пород из скважин 2004 и 2005 Романовского участка позволили установить статистические зависимости между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород и подтвердили результаты более ранних исследований авторов [1, 2]. При наличии надежной сейсмической информации полученные зависимости могут быть использованы при выделении в массиве ВЗТ и продуктивных пластах зон с различными физико-механическими свойствами. При этом наблюдается достаточно высокий разброс значений, входящих в полученные зависимости параметров, что объясняется неоднородностью массивов сильвинита и карналлита, и, особенно, каменной соли. В связи с этим полученные зависимости нельзя с высокой степенью уверенности распространять на другие участки ВКМКС. Зависимости подлежат дальнейшему уточнению и обобщению.

Детальная обработка результатов проведенной сейсмике 2D с целью получения упругой инверсии позволила выделить основные отражающие горизонты в межскважинном пространстве и кровле основных пластов в геологиче-



ляет утверждать, что ранее предложенная методика выделения зон в ВЗТ и продуктивных калийных пластах с различными физико-механическими свойствами работоспособна.

На основе установленной связи акустического импеданса с прочностью было выполнено районирование геологического разреза по линии скважин 2002-2003-2004-2005 по прочностным свойствам. Установлено, что в разрезе по данным скважинам отсутствуют четко выраженные обширные зоны пород со значительно ослабленными прочностными свойствами. В то же время в продуктивном пласте КрII на участке скважин 2004-2005 присутствует локальная зона с ослабленными прочностными свойствами.

Заключение. Таким образом, подтверждена работоспособность ранее предложенной методики выделения ослабленных зон в ВЗТ и продуктивных калийных пластах, основанной на геомеханических и геофизических исследованиях. Ее использование рекомендуется как на стадии проектирования горных работ, так и на стадии разработки при возникновении нестандартной ситуации с целью получения реальных физико-механических свойств деформирующегося массива и их применения в геомеханическом моделировании. Использование предложенных решений позволит не только существенно продвинуться в решении проблемы сохранности ВЗТ, но и оптимизировать параметры системы разработки и повысить извлечение полезного ископаемого.

Следует также отметить, что предложенный метод выделения в массиве пород зон с различными физико-механическими свойствами, основанный на комплексном использовании геофизических и геомеханических методов, может быть использован практически на любом месторождении полезных ископаемых, где стоит проблема обеспечения промышленной безопасности, связанная с разработкой опасных участков горного массива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях А.А. Система комплексирования геомеханического и геофизического обеспечения безопасности подземных горных работ / А.А.Барях, И.А.Санфиоров // Горный журнал. 2005. № 12. С. 79-83.
2. Кашников Ю.А. Создание геолого-геомеханической модели калийного месторождения с целью выделения зон с различными деформационными и прочностными свойствами в водозащитной толще и калийных пластах / Ю.А.Кашников, А.О.Ермашов, Д.В.Шустов // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ: Сб. научных трудов / Санкт-Петербургский горный ун-т. СПб, 2017. С. 309-319.
3. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2006. 480 с.
4. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение калийных солей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с.
5. Почти все о сейсмической инверсии / Ю.П.Ампилов, А.Ю.Барков, И.В.Яковлев и др. // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3-16.
6. Разработка геолого-геомеханической модели турней-фаменского объекта Гагаринского месторождения / Ю.А.Кашников, Д.В.Шустов, С.Ю.Якимов и др. // Нефтяное хозяйство. 2013. № 2. С. 2-6.
7. Ржевский В.В. Основы физики горных пород: Учебник для вузов / В.В.Ржевский, Г.Я.Новик. М.: Недра, 1984. 359 с.
8. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. Пермь – Березники, 2014. 130 с.
9. Fjaer E. Static and dynamic moduli of weak sandstones // Rock Mechanics for Industry / B.Amadei, R.L.Kranz, G.A.Scott P.H.Smeallie (eds). Rotterdam: Balkema, 1999. P. 675-681.
10. Hiroki Sone. Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs: Phd thesis. Stanford: Stanford University, 2012. 225 p.
11. Reservoir Simulation of Part of Yurubcheno-Tohomskoye Oil Field Based on Geological Geomechanical Model: Program Book 9-th Asian Rock Mechanics Symposium / Y.A.Kashnikov, S.G.Ashikhmin, D.V.Shustov, S.Y.Yakimov, A.E.Kukhtinskii. Bali, Indonesia, October 18-20th. 2016. P. 128.
12. 3D geological geomechanical reservoir modeling for the purposes of oil and gas field development optimization / D.V.Shustov, Yu.A.Kashnikov, S.G.Ashikhmin, A.E.Kukhtinskiy // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. St. Petersburg: CRC Press, 2018. Vol. 2. P. 1425-1430.
13. Zoback Mark D. Reservoir Geomechanics. Cambridge: University Press. 2007. 449 p.

Авторы: Ю.А.Кашников, *д-р техн. наук, профессор, geotech@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия)*, А.О.Ермашов, *канд. техн. наук, ведущий инженер, ermashov.pstu@gmail.com (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия)*, А.А.Ефимов, *канд. геол.-минерал. наук, ведущий инженер, geotech@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия)*.

Статья поступила в редакцию 3.10.2018.

Статья принята к публикации 12.01.2019.