

Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов

И.О. Баюк¹, Н.В. Дубиня¹, С.А. Тихоцкий¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Адреса для связи: ibayuk@ifz.ru, dubinya.nv@gmail.com, sat @ifz.ru

Ключевые слова: трещиноватые карбонатные коллекторы, петроупругое моделирование, анизотропия, геомеханическое моделирование

Проанализированы основные проблемы петроупругого моделирования трещиноватых карбонатных пород, такие как выбор метода теории эффективных сред (Rock Physics) для связи параметров математической модели эффективных упругих свойств коллектора со скоростями упругих волн, полученными в эксперименте. Показано, что даже в случае простой модели трещиноватого коллектора разница в скоростях упругих волн, полученных разными методами, может достигать 40 %.

Другой проблемой петроупругого моделирования является построение модельной среды, адекватно отражающей особенности внутреннего строения породы в рассматриваемом масштабе. В связи с этим уделено внимание сложнопостроенным карбонатным коллекторам, в которых неучет особенностей распределения изометричной пористости приводит к изменению скоростей упругих волн, что может быть ошибочно приписано влиянию трещиноватости. К коллекторам такого типа относятся оолитовые известняки и коллекторы, содержащие каверны.

Рассмотрена также проблема соответствия масштабов, на которых строится петроупругая модель породы и измерены ее упругие свойства. Показано, что разница значений импедансов (как акустических, так и сдвиговых), полученных на одной и той же глубине в масштабе данных геофизических и сейсмических исследований, может достигать 20 % и более.

Важной проблемой петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов является учет анизотропии как вмещающей матрицы, так и результирующих упругих свойств. Проанализирована проблема различия петрофизических зависимостей (таких как, например, скорость – пористость), полученных на керне и по данным геофизических исследований скважин на примере сложнопостроенного карбонатного коллектора Юрубчено-Тохомской зоны. Особое внимание уделено проблеме обнаружения и характеристики флюидопроводящих трещин в масштабе сейсмических данных. Предложен подход, который опирается на результаты геомеханического и петроупругого моделирования и дает возможность не только выделить системы флюидопроводящих трещин, но и охарактеризовать их количественно в терминах ориентации, объемной концентрации, относительного раскрытия и степени связанности.

Some problems of Rock-Physics modeling of fractured carbonate reservoir rocks

I.O. Bayuk¹, N.V. Dubinya¹, S.A. Tikhotskiy¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, RF, Moscow

E-mail: ibayuk@ifz.ru, dubinya.nv@gmail.com, sat @ifz.ru

Keywords: fractured carbonate reservoir rock, petroelastic modeling, anisotropy, geomechanical modeling

The paper analyzes main problems of Rock-Physics (or petroelastic) modeling of fractured carbonate rocks. These problems include the choice of method of effective medium theory (Rock Physics) for connecting the parameters of the mathematical model of effective elastic properties of a reservoir rock with the elastic wave velocities obtained in experiment. It is shown that even in the case of a simple model of a fractured reservoir rock, the difference in the velocities of elastic waves obtained by different methods can reach 40 %.

Another problem of Rock-Physics modeling is a construction of a model medium that adequately reflects characteristics of the internal structure of rock in the scale under consideration. In this regard, attention is paid to carbonate reservoirs of a complex structure, in which the neglect of specific features in a distribution of isometric porosity leads to a change in the velocity of elastic waves, which can be mistakenly attributed to the influence of fracturing. These types of reservoirs include oolitic limestones and rocks containing cavities.

A problem exists of the correspondence of scales on which the Rock-Physics model is constructed, and its elastic properties are measured. It is shown that the difference of impedances (both acoustic and shear) obtained at the same depth but at different scales (logging and seismic), can reach 20 % и even more.

An important problem of petroelastic modeling of fractured reservoirs is the allowance for the anisotropy of both the host matrix and the resulting elastic properties. The problem of differences in petrophysical dependencies (e.g., porosity-velocity) obtained on cores and from logs is analyzed. In this relation a carbonate reservoir of the Yurubcheno-Tokhoma zone is analyzed whose internal structure is rather complex.

Particular attention is paid to the problem of detecting and characterizing fluid-conducting cracks on a seismic scale. To solve this problem, an approach is presented that relies on the results of geomechanical and Rock-Physics modeling. This approach makes it possible not only to reveal fluid-conducting fracture systems, but also to characterize them quantitatively in terms of orientation, volume concentration, relative opening, and degree of connectivity.

Термин «трещиноватый коллектор», как правило, является характеристикой карбонатной породы, поскольку этот тип коллектора углеводородов обладает наибольшей хрупкостью по сравнению с коллекторами другого типа. Трещины в карбонатных коллекторах проявляют себя в разных масштабах и имеют разные происхождение и геометрические характеристики. В масштабе зерна это, как правило, трещины между границами зерен. Поскольку зерна карбонатных минералов (кальцита, доломита), как правило, имеют хаотическую ориентацию, то и эти трещины ориентированы хаотически. В масштабе геофизических исследований скважин (ГИС) и сейсмических наблюдений в карбонатных породах отмечаются системы трещин, имеющих преимущественную ориентацию, которая обусловлена напряжениями, действующими в массиве пород.

Объемная концентрация трещин в породе обычно невелика (десятые доли процента). Однако наличие трещин в коллекторе благоприятствует флюидоперетокам

между более изометричными пустотами (порами, кавернами), поэтому поиск зон повышенной трещиноватости является одним из приоритетных направлений разведочной геофизики.

Для повышения достоверности интерпретации полевых геофизических данных используют петроупругое моделирование, которое позволяет интерпретировать измеренные упругие характеристики пород в терминах параметров, характеризующих их пустотное пространство. Такими параметрами могут быть объемная концентрация пустот разного типа (трещин, пор, каверн), их форма и степень связанности. Поскольку при петроупругом моделировании пустоты представляются в виде эллипсоидов (чаще – эллипсоидов вращения), под параметрами формы понимают аспектное отношение этих эллипсоидов. В результате вместо реальной горной породы исследуется некая «модельная среда», в которой различные неоднородности (поры, трещины, каверны, зерна минералов, частицы органического вещества) рассматриваются либо в виде вмещающей матрицы (односвязной области), либо в виде эллипсоидальных неоднородностей. Для связи параметров модельной среды с измеренными упругими характеристиками пород используются формулы методов теории эффективных сред (методы Rock Physics) – уравнения связи. Методы Rock Physics применимы, если длина волны много больше размера неоднородностей, и этих неоднородностей в породе достаточно много для определения статистических характеристик физических полей. Триада, состоящая из модельной среды, параметров модели и уравнений связи называется параметрической математической моделью эффективных физических (в частности, упругих) свойств породы. Успех инверсии полевых данных в терминах строения пустотного пространства пород во многом зависит от того, насколько качественно построена математическая модель его физических свойств. В данной статье рассмотрены проблемы построения таких моделей применительно к карбонатным коллекторам, которые проявляют широкое разнообразие внутреннего строения, включая строение пустотного пространства. Эти проблемы выявлены и классифицированы авторами на основе их многолетнего опыта петроупругого моделирования.

Проблема выбора уравнений связи

Проблема определения эффективных физических свойств сводится к проблеме учета взаимодействия многих тел и поэтому может быть решена лишь приближенно. Это приводит к тому, что существует много методов теории эффективных сред, которые приводят к различным результатам. Это вызвано тем, что в каждом методе использованы различные упрощающие предположения о распределении физических полей в неоднородном теле (в частности, полей напряжений и деформаций), что напрямую связано с особенностями распределения неоднородностей в объеме породы и их формой. Например, классический метод самосогласования [1, 2] предполагает, что каждая неоднородность может быть представлена в виде

включения квази-эллипсоидальной формы. Верхняя граница Хашина – Штрикмана предполагает структуру типа «жесткая матрица – изолированные мягкие включения», а нижняя – инверсную структуру «мягкая матрица – изолированные жесткие включения» [2]. Для моделирования промежуточных структур может быть использован метод обобщенного сингулярного приближения (ОСП) [1, 3], в котором степень связности компонент учитывается с помощью некоторого эмпирического параметра, варьируя который от 0 до 1, можно получить решения для эффективного тензора упругости внутри границ Хашина – Штрикмана. При выводе формул метода Кастера – Токсоза, который часто применяется для оценки эффективных упругих свойств изотропных пород, используется теория рассеяния. При этом суммируется влияние каждого единичного рассеивателя (включения) на поле деформаций матрицы. Краткая характеристика этого метода и других, наиболее простых и популярных методов Rock Physics, дана в книге [4]. Большая часть этих методов применима лишь к изотропным средам, а для анизотропных сред рассматривается только случай изотропных компонент.

На рис. 1 показаны скорости продольных упругих волн, полученные с помощью различных методов Rock Physics, для модели карбонатной породы с хаотическими трещинами (аспектное отношение 0,003), заполненными пластовым флюидом (водой). Из него видно, что скорости упругих волн для трещинной пористости от 0 до 2 %, могут различаться в пределах 40 % в зависимости от метода Rock-Physics.

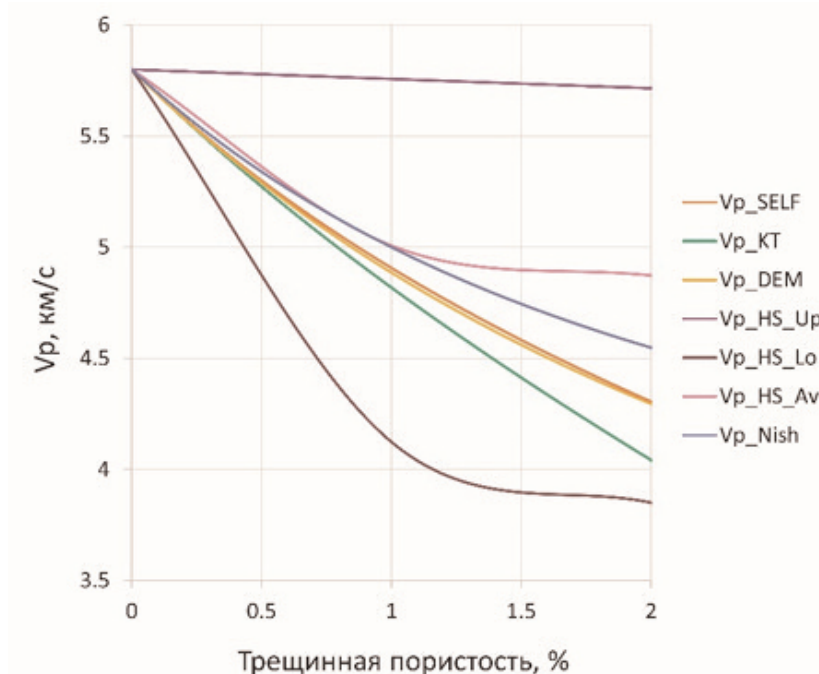


Рис. 1. Скорости упругих волн v_p в модели карбонатной породы с хаотическими трещинами, полученные с помощью различных методов Rock Physics (SELF – метод самосогласования; KT – метод Кастера – Токсоза; DEM – дифференциальная схема [4]; HS_Up, HS_Lo, HS-Av – соответственно верхняя, нижняя граница Хашина – Штрикмана и их усредненное значение; Nish – метод Нишизавы [5])

Заметим, что для петроупругого моделирования трещиноватых карбонатных коллекторов наиболее перспективным является метод ОСП, поскольку позволяет учитывать анизотропию как матрицы, так и включений (без ограничений на ее тип), а также степень связности компонент.

Формулы этого метода для самого общего случая анизотропии компонент имеет вид [1, 3]

$$\mathbf{C}^* = \left\langle \mathbf{C}(\mathbf{r}) \left[\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{C}(\mathbf{r}) - \mathbf{C}^C) \right]^{-1} \right\rangle \left\langle \left[\mathbf{I} - \mathbf{g}(\mathbf{C}(\mathbf{r}) - \mathbf{C}^C) \right]^{-1} \right\rangle^{-1}, \quad (1)$$

где $\mathbf{C}(\mathbf{r})$ – тензор упругости микронеоднородной среды (кусочно-постоянная функция координат); \mathbf{I} – единичный тензор 4 ранга; \mathbf{g} – тензор, зависящий от формы включений и свойств тела сравнения (формулы для его вычисления приведены в работах [1, 3]; $\mathbf{C}^C = (1 - f)\mathbf{C}^M + f\mathbf{C}^I$ – тензор упругости тела сравнения, который может быть произвольным, и часто выбирается в виде линейной комбинации свойств матрицы (\mathbf{C}^M) и включений (\mathbf{C}^I); значения $f = 0$ и $f = 1$ позволяют получить соответственно верхнюю и нижнюю границы Хашина – Штрикмана; угловые скобки означают объемное усреднение.

Апскейлинг на сейсмические частоты

Для масштабирования упругих свойств, полученных в масштабе ГИС, на сейсмические частоты, среда представляется как тонкослоистая. Толщина пачки слоев зависит от частоты проводимых сейсмических работ и, как показали исследования, примерно равна половине длины волны, рассчитанной на этой частоте. Толщина каждого слоя соответствует шагу каротажа. Считается, что каждый слой имеет упругие свойства, полученные на этой глубине в результате проведения каротажа. Для карбонатных коллекторов каждый слой может иметь анизотропные упругие свойства. Вследствие этого определение эффективных упругих свойств каждой пачки выполняется с помощью анизотропного варианта метода Бейкуса, в котором нет ограничений на тип анизотропии слоев [1].

Проблема выбора масштаба построения модели

Модельная среда, которая описана выше, должна отражать внутренне строение породы именно в том масштабе, на котором получены экспериментальные данные. В практике геофизических работ такие масштабы определяют измерения на керне, материалы ГИС и сейсмические данные. Вследствие этого при построении математических моделей эффективных физических свойств выделяют три масштаба, соответствующих этим типам работ. Строение карбонатных пород даже в масштабе образцов стандартного размера (первые сантиметры) и полноразмерного керна может быть различно. Например, в масштабе полноразмерного керна, могут

наблюдаться сантиметровые трещины, которых нет в стандартных образцах, поскольку они выбуривались между этими трещинами. По этой же причине расщепление поперечных волн, наблюдаемое по данным акустического дипольного каротажа, нельзя интерпретировать на основе анализа шлифов. Трещины, размер которых превышает несколько метров и которые видны на данных каротажа FMI, нельзя включать в модели масштаба работ ГИС, поскольку размер таких трещин либо сопоставим с длинами волн акустического каротажа, либо превышает их (первые десятки сантиметров – первые метры).

На рис. 2 показаны акустический и сдвиговый импедансы, построенные для модели карбонатного коллектора, но в разных масштабах – ГИС и сейсмических исследований. Разница в значениях импедансов в зависимости от выбора масштаба модели может достигать 20 % и более.

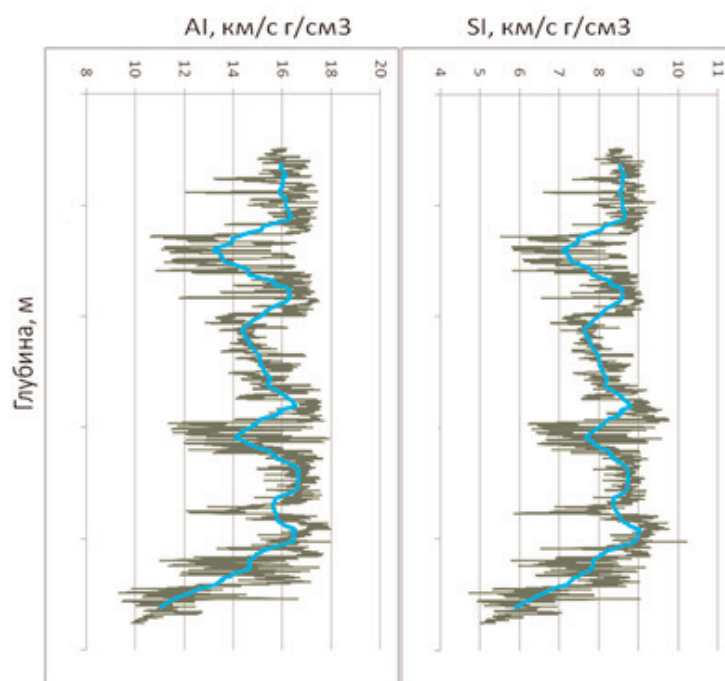


Рис. 2. Акустический (AI) и сдвиговый (SI) импедансы в масштабах ГИС и сейсмических исследований

Проблема корректного учета внутреннего строения породы в каждом масштабе

Карбонатные коллекторы обладают довольно сложным внутренним строением, и применять ко всем карбонатным коллекторам одну и ту же математическую модель нецелесообразно. В настоящее время многие коммерческие пакеты включают модель Шу – Пейна [6], которая была разработана авторами именно для карбонатных коллекторов. В этой модели предполагается, что общая пористость представлена четырьмя типами пор: 1) поры, связанные с глиной; 2) межгранулярные поры; 3) микротрещины; 4) жесткие поры (квазисферические поры выщелачива-

ния или каверны). Такая модель позволяет рассматривать как изотропные, так и анизотропные породы, однако в большинстве коммерческих пакетов реализована только изотропная модель. Как правило, разделить пустотное пространство на указанные типы пустот на практике часто не представляется возможным. Однако стоит иметь в виду, что неучет перераспределения даже квазиизометричной пористости между указанными типами может приводить к разнице в скоростях 10 % и более. Заниженные скорости ошибочно могут быть интерпретированы как индикаторы трещиноватых зон.

Иная модель анизотропного карбонатного коллектора [7] представляет пустотное пространство карбонатной породы в виде квазиизометричных хаотически ориентированных пустот и ориентированных субвертикальных трещин. Аспектное отношение каждой системы пустот описывается своей плотностью вероятности, что позволяет охватить достаточно широкий диапазон изменения формы как пор, так и трещин. Обе модели применимы для интерпретации как данных, полученных на керне, так и данных дипольного акустического каротажа. Однако эти модели в случае нестандартного строения пустотного пространства в масштабе керна могут дать неверный результат. В частности, для таких пород, как оолитовые известняки или сложнопостроенные коллекторы Юрубчено-Тохомской зоны, требуется построение более сложных моделей пород в масштабе керна.

На рис. 3 показана фотография микроструктуры оолитового известняка, сделанная с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Из анализа этого

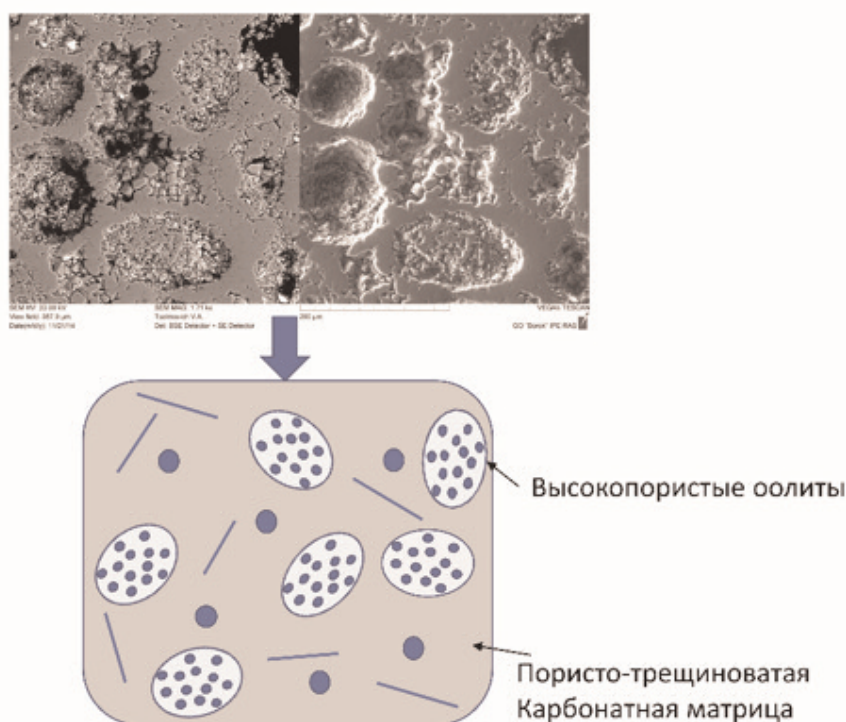


Рис. 3. Фотография РЭМ оолитового известняка (вверху) и модельная среда этой породы в масштабе керна (внизу) (фотография РЭМ В.А. Цельмовича, геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли РАН)

изображения можно заключить, что модель породы можно представить в виде вложения округлых частиц одной пористой среды (оолитов) в иную пористую среду, пористость которой не так интенсивно выражена (меньше по объему, и поры менее связаны). Заметим при этом, что матрицей обеих сред является один и тот же материал – кальцит. На этом же рисунке показана модельная среда, построенная для этой породы. Поры как в оолитах, так и в матрице имеют квазисферическую форму. Помимо пор в матрице содержатся хаотические трещины, которые видны на фотографии при большем разрешении. Степень связности пустот в матрице и оолитах различна.

Эффективные упругие свойства модели оолитового известняка исследованы в работе [8], в которой для определения эффективных упругих свойств использовался метод ОСП. В этой работе показано, что для одного и того же значения общей пористости породы (22 %) перераспределение пор между оолитами и вмещающей их порово-трещинной средой может привести к вариациям скоростей продольных и поперечных волн, достигающим 40 %. Как уже отмечалось выше, при обсуждении модели Шу – Пейна, заниженные скорости могут быть ошибочно объяснены влиянием трещиноватости, которой в породе может и не быть.

На рис. 4 показаны фотографии полноразмерного керна известняка Юрубчено-Тохомской зоны. Как видно, порода довольно неоднородна. Участки мелкопористого доломита (пористость – до 2 %) (серый цвет) сменяются зонами повышенной кавернозности (коричневый цвет). Причем каверны развиваются в веществе иного минерального состава. Вследствие разного строения и объема пустотного пространства и вещественного состава упругие свойства образцов, выбуренных из «серых» и «коричневых» зон, сильно различаются, проявляя, однако, изотропию в масштабе керна. При этом тренды «скорость – пористость», полученные на таких образцах керна, будут как сильно различаться между собой, так и отличаться от трендов, полученных по данным ГИС, поскольку эта порода в метровом масштабе

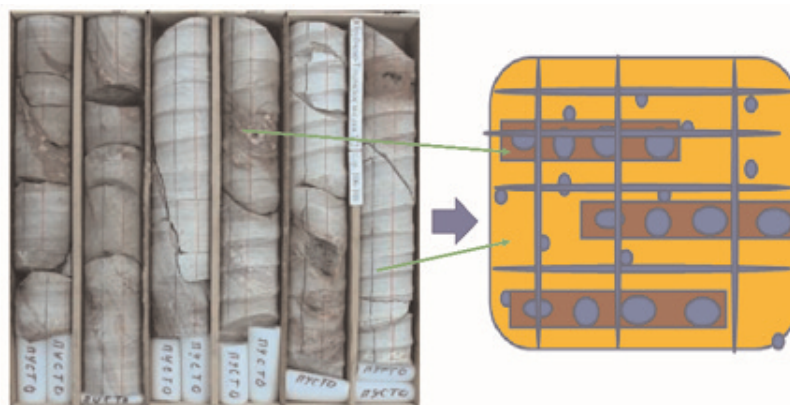


Рис. 4. Фотография керна (слева) и модельная среда в масштабе ГИС пород Юрубчено-Тохомской зоны (справа) (рисунок модифицирован из работы [10]; фотография керна О.В. Постниковой, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина)

работ ГИС будет иметь совершенное иное строение. Модельная среда для масштаба ГИС будет составной (см. рис. 4). Пористая доломитовая матрица будет представлять собой вмещающую среду для вытянутых включений кавернозного материала. Кроме того, согласно описаниям полноразмерного керна, в породе наблюдаются субвертикальные трещины и стиллолитовые швы. Вследствие такого строения эффективные упругие свойства этой породы в масштабе работ ГИС будут относиться к орторомбическому типу симметрии. В работе [9] показано, как с помощью такого моделирования удалось оценить распределение объемной концентрации пустот различного типа – матричной, трещинной и кавернозной пористости – вдоль ствола скважины, пробуренной в указанном коллекторе.

Проблема моделирования трещиноватости в масштабе сейсмических исследований

В отличие от предыдущих масштабов, где трещины либо различимы визуально на керне (стандартном и полноразмерном), либо проявляют себя по данным дипольного акустического или FMI каротажа, определить, какие именно трещины влияют на сейсмические скорости и способны ли они фильтровать флюид, является довольно непростой задачей. Ориентация трещин и их распределение в объеме породы в сейсмическом масштабе зависят от напряженного состояния и его истории. Для определения этих характеристик трещиноватости необходимо знать распределение в объеме среды компонент тензоров напряжений и накопленной необратимой деформации. Для получения этих величин необходимо выполнить трехмерное геомеханическое моделирование. В наших исследованиях использована упругопластическая модель, в которой для каждой ячейки расчетной модели рассчитываются не только компоненты тензора напряжений и деформаций, но и накопленные пластические деформации.

При моделировании предполагается, что изменение интенсивности пластических деформаций определяется трещиноватостью – возникновением новых трещин и раскрытием уже существующих, но закрытых трещин. Принимается гипотеза, что относительная интенсивность сдвиговой пластической деформации (текущее значение, деленное на максимальное) прямо пропорционально трещиной пористости. Это предположение используется в дальнейшем для определения границ возможного изменения трещинной пористости при решении обратной задачи оценки этой величины по сейсмическим данным.

Найденные значения компонент тензора напряжений используются для оценки флюидопроводящих трещин в объеме породы [11]. С этой целью в рамках трехмерного геомеханического моделирования рассчитываются величины и направления главных напряжений. Для произвольно ориентированной трещины по этим значениям можно определить нормальное и тангенциальное напряжения, действующие на ее поверхности. Среди произвольно ориентированных трещин выделяются критически напряженные трещины, т.е. такие, для которых тангенциальное напряжение больше

или равно произведению нормального напряжения и коэффициента внутреннего трения. Берега таких трещин могут сдвигаться друг относительно друга. Часто говорят, что такие трещины «могут распространяться».

Пример определения области критически напряженных трещин для некоторого напряженного состояния (максимальное главное напряжение – 80 МПа, промежуточное – 30 МПа, минимальное – 20 МПа, одна из главных осей – субвертикальная) показан на рис. 5.

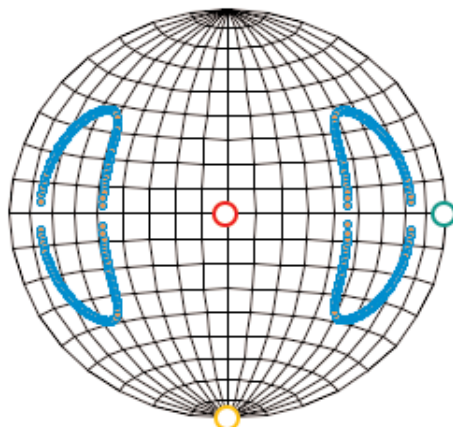


Рис. 5. Пример определения области возможных ориентаций критически напряженных трещин на стереограмме (красная точка – направление действия максимального главного напряжения, желтая – промежуточного, зеленая – минимального; голубые точки ограничивают область возможных ориентаций критически напряженных трещин)

Используется гипотеза о том, что критически напряженные трещины являются флюидопроводящими [12] и именно такие трещины заметно влияют на скорости сейсмических волн. Второе предположение может быть обосновано тем, что такие трещины являются трещинами сдвига и вероятность их соединения выше по сравнению с трещинами, которые не являются критически напряженными. Соединение трещин приводит к повышению связанности пустотного пространства, что в свою очередь понижает модули упругости.

Таким образом, в результате геомеханического моделирования получены ограничения на возможные ориентации флюидопроводящих трещин и трещинную пористость. Эти данные используются затем для инверсии параметров таких трещин по результатам сейсмических наблюдений с использованием методов Rock Physics. Для каждого элемента модели определяется возможная область ориентации флюидопроводящих трещин, для которых в результате инверсии определяются следующие параметры: преимущественная уточненная ориентация каждой системы, относительное раскрытие (аспектное отношение), параметр связности. На рис. 6 показан пример определения трещинной пористости и аспектного отношения трещин, полученные в результате инверсии (срез 3D куба на определенной глубине).

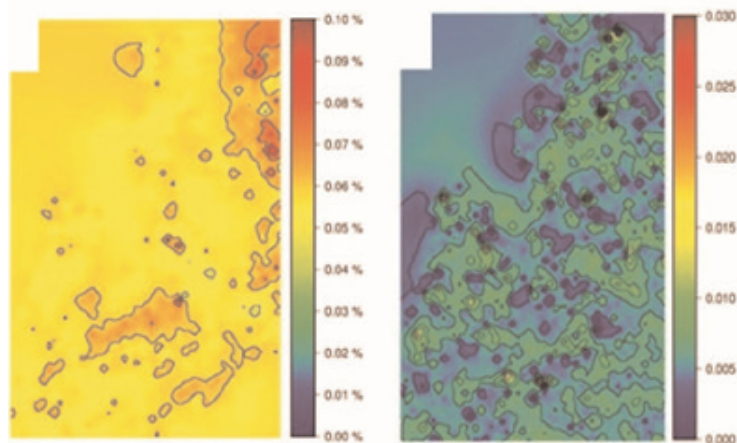


Рис. 6. Трещинная пористость (слева) и относительное раскрытие трещин (справа), полученные по сейсмическим данным в результате инверсии с использованием методов Rock Physics

Выводы

1. Модельная среда построенной петроупругой модели должна отражать особенности строения породы в том масштабе, для которого моделирование проводится (керна, ГИС, сейсмика). При этом следует учитывать, что внутреннее строение породы на предыдущем масштабе проявляется в особенностях поведения упругих свойств на следующем масштабе.

2. Выбор метода Rock Physics для связывания параметров модели с измеренными физическими свойствами (скоростями упругих волн) в каждом масштабе должен определяться наличием или отсутствием анизотропии этих свойств, а также особенностями взаимного расположения компонент.

3. Экспериментальные данные, используемые для инверсии параметров модели породы, должны соответствовать масштабу построения модели.

4. При интерпретации данных ГИС следует учитывать, что понижение скоростей при одних и тех же литологических особенностях и пористости может быть вызвано не только повышенной трещиноватостью, но и перераспределением изометричных пор между кавернами и матричной пористостью, а также между оолитами и вмещающей их матрицей.

5. Петрофизические зависимости, полученные на керне, могут не соответствовать таковым, полученным по данным ГИС, из-за различного строения породы в данных масштабах.

6. Геомеханическое моделирование позволяет определить наличие флюидопроводящих трещин в породе, их возможную ориентацию и распределение интенсивности в объеме породы. Дополнительное привлечение сейсмических данных и использование петроупругого моделирования позволяют оценить количественные характеристики таких трещин – преимущественную ориентацию, объемную концентрацию, относительное раскрытие и степень связности.

Список литературы

1. *Шермергор Т.Д.* Теория упругости микронеоднородных сред. – М.: Наука, 1977. – 400 с.
2. *Willis J.* Bounds and self-consistent estimates for the overall properties of anisotropic composites // *J. Mech. Phys. Sol.* – 1977. – V. 25. – P. 185–202.
3. *Bayuk I., Chesnokov E.* Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media // *J. Phys. Chem. Earth.* – 1998. – V. 23. – No. 3. – P. 361–366.
4. *Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J.* The Rock Physics Handbook. 2nd Edition. Tools for Seismic Analysis of Porous Media. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 511 p.
5. *Nishizawa O.* Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks – Transversely isotropic case // *J. Phys. Earth.* – 1982. – V. 3. – P. 331–348.
6. *Xu S., Payne M.A.* Modeling elastic properties in carbonate rocks // *The Leading Edge, Rock physics.* – 2009. – V. 28. – P.66–74.
7. *Баюк И.О., Рыжков В.И.* Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // *Технологии сейсморазведки.* – 2010. – № 3. – С. 32–42.
8. *Гасеми М.Ф., Баюк И.О.* Петроупругая модель оолитового известняка в масштабе керна // *Экспозиция Нефть Газ.* – 2018. – Т.63. – № 3. – С. 36 – 40.
9. *Математическое моделирование анизотропных эффективных упругих свойств карбонатных коллекторов сложного строения / И.О. Баюк, О.В. Постникова, В.И. Рыжков, И.С. Иванов // Технологии сейсморазведки.* – 2012. – №3. – С. 42–55.
10. *Математическое моделирование анизотропных эффективных упругих свойств карбонатных коллекторов сложного строения / И.О. Баюк, О.В. Постникова, В.И. Рыжков, И.С. Иванов // Технологии сейсморазведки.* – 2012. – № 3. – С. 42–55.
11. *Localization and characterization of hydraulically conductive fractured zones at seismic scale with the Help of geomechacal and Rock Physics modeling/ N. Dubinya, I. Bayuk, S. Tikhotskiy, O. Rusina // 80th EAGE Conference & Exhibition 2018 11–14 June 2018, Copenhagen, Denmark. Paper Tu C 08.*
12. *Barton C.A., Zoback M.D., Moos D.* Fluid flow along potentially active faults in crystalline rocks // *Geology.* – 1995. – V. 23. – No. 8. – P. 683–686.