

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗАТУХАНИЯ В АНИЗОТРОПНЫХ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ

Михаил Александрович Новиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, младший научный сотрудник, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

В работе при помощи численного алгоритма оценки сейсмического затухания в анизотропной трещиновато-пористой флюидонасыщенной среде исследуется влияние анизотропии фильтрационно-емкостных и упругих свойств на затухание, вызванное флюидопотоками между связанными трещинами. Алгоритм оценки затухания основан на решении системы уравнений Био поропругой анизотропной среды. Для численного решения уравнений Био используется конечно-разностная схема на разнесенных сетках. Проведен ряд численных экспериментов по распространению сейсмической волны в трещиноватых средах различной степени связности, где трещины заполнены анизотропным материалом, обеспечивающим индуцированные волной флюидопотоки между связанными трещинами. По зарегистрированным сигналам построены численные оценки величины, обратной добротности, свидетельствующие о влиянии анизотропии заполняющего трещины материала на частотно-зависимое затухание.

Ключевые слова: модель Био, поропругость, анизотропия, распространение сейсмических волн, сейсмическое затухание, конечно-разностный метод

NUMERICAL ALGORITHM OF SEISMIC ATTENUATION ESTIMATION IN ANISOTROPIC FRACTURED POROUS FLUID-SATURATED MEDIA

Mikhail A. Novikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., DSc, Senior Researcher, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

In our work we investigate the effect of transport and elastic properties anisotropy on seismic attenuation due to fracture-to-fracture wave-induced fluid flow using numerical algorithm of estimation of seismic wave attenuation in anisotropic fractured porous fluid-saturated media. Algorithm is based on numerical solution of anisotropic Biot equations using finite-difference scheme on staggered grid. We perform a set of numerical experiments to model wave propagation in fractured media with anisotropic fractured-filling material providing wave-induced fluid flow within interconnected fractures. Recorded signals are used for numerical estimation of inverse quality factor. Results demonstrate the effect of fracture-filling material anisotropy on seismic wave attenuation.

Keywords: Biot model, poroelasticity, anisotropy, seismic wave propagation, seismic attenuation, finite differences

Оценка транспортных свойств трещиноватых резервуаров и мобильность флюида в них является одной из актуальных задач в геофизике, поскольку достоверная информация об этих свойствах позволяет повысить эффективность разработки коллекторов углеводородов, захоронения углекислого газа [1, 2] и добычи геотермальной энергии [3, 4]. Затухание сейсмических волн является сейсмической характеристикой, имеющей большой потенциал применения для локализации и характеристики зон трещиноватости. При прохождении в такой среде сейсмическая волна создает перепады давления, приводящие к перетоку флюида в область с пониженным давлением и, следовательно, диссипации сейсмической энергии. Такие флюидопотоки называются индуцированными волной (от английского *wave-induced fluid flow*, WIFF) [5], в современных исследованиях их принято разделять на два типа. Первый тип – флюидопотоки между вмещающей средой и материалом в трещинах (в англоязычной литературе *fracture-to-background WIFF*, FB-WIFF), интенсивность которых в основном зависит от контраста физических свойств вмещающей породы и материала в трещинах. При наличии связанных трещин проявляются потоки второго типа – перетоки флюида между связанными трещинами (в англоязычной литературе *fracture-to-fracture WIFF*, FF-WIFF), зависящие от свойств материала в трещинах и степени связности трещин. Потоки первого типа наиболее интенсивно проявляют себя на низких частотах, в то время как потоки второго типа наиболее интенсивны на высоких частотах (порядка десятков кГц и выше). Таким образом, частотно-зависимое затухание вследствие потоков флюида, индуцированных сейсмической волной, может служить индикатором транспортных свойств трещиноватых резервуаров.

К сожалению, в последних теоретических исследованиях WIFF зачастую рассматриваются лишь простейшие трещиноватые модели, к примеру, ограничиваемые попарным пересечением трещин двух ориентаций [6]. Имеются работы, где используются более сложные трещиноватые модели [7], однако не обеспечиваются большие длины перколяции по связанным трещинам. Поскольку мобильность флюида в значительной обеспечивается существованием в среде длинных цепочек связанных трещин, в исследованиях нужно рассматривать среды с сильной глобальной связностью трещин. Нами ранее был проведен ряд численных экспериментов с использованием трещиноватых моделей с глобальной связностью трещин, обеспечивающих заданную длину перколяции [8]. Однако для материалов в трещинах характерна микромасштабная анизотропия транспортных свойств (проницаемости, извилистости), что не учитывается в большинстве работ. Таким образом, для выявления зависимостей между структурой трещиноватости среды и частотно-зависимым затуханием вследствие потоков флюида, индуцированных волной, необходимо разработать и использовать алгоритм численной оценки сейсмического затухания волн в трещиноватых средах с учетом анизотропии среды.

В данной работе с использованием разработанного алгоритма численного моделирования распространения сейсмической волны в анизотропной трещиновато-пористой флюидонасыщенной среде, основанного на численном решении уравнений Био методом конечных разностей на разнесенных сетках, проведен ряд численных экспериментов для изотропного и анизотропного наполнителя трещин. По результатам численного моделирования проведена численная оценка величины, обратной добротности. Результаты демонстрируют влияние анизотропии и связности трещин на частотно-зависимое затухание волны.

Рассматривается задача распространения плоской продольной волны в прямоугольной области, схематически изображенной на рис. 1. Волна распространяется в области, содержащей неоднородную подобласть, представленную трещиноватым слоем, в котором необходимо оценить частотно-зависимое затухание волны. Рассматриваемая область – пороупругая флюидонасыщенная среда, материал в трещинах в которой отличается высокой проницаемостью и пористостью по сравнению с вмещающей породой. Размер расчетной области в направлении оси Ox – $L_x = 1$ м, в направлении оси Oz L_z зависит от центральной частоты исходного сигнала. Граничные условия на границах $x = 0$ м и $x = L_x$ – периодические, на границах, параллельных оси $z = 0$ м и $z = L_z$ для избавления от отражений строятся идеально согласованные слои [13].

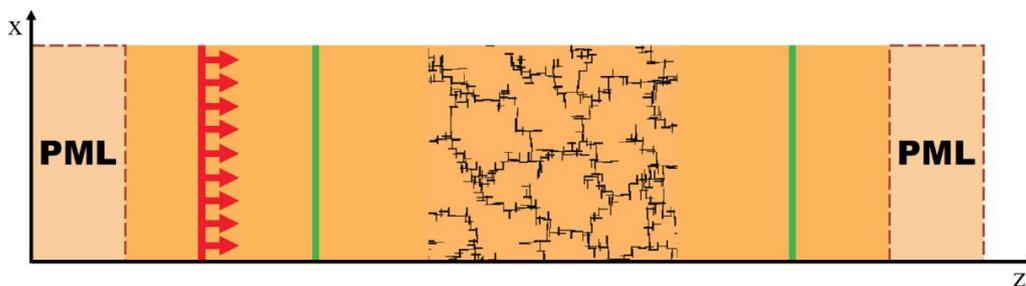


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области, содержащей трещиноватый участок. Красная линия – линия источников, зеленые линии – линии приемников

В рассматриваемой области решается система уравнений Био анизотропной пороупругой флюидонасыщенной среды в двумерной постановке [9,10]:

$$\begin{aligned} \rho_f \frac{T_x}{\phi} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\eta}{k_x} q_x &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ \rho_f \frac{T_z}{\phi} \frac{\partial q_z}{\partial t} + \frac{\eta}{k_z} q_z &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_f \frac{\partial v_z}{\partial t} \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho_f \frac{\partial q_x}{\partial t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \rho_f \frac{\partial q_z}{\partial t} \\
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{13} \frac{\partial v_z}{\partial z} + M \alpha_x \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\
\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_x}{\partial x} + c_{33} \frac{\partial v_z}{\partial z} + M \alpha_z \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \\
\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= c_{55} \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\
-\frac{\partial p}{\partial t} &= M \alpha_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + M \alpha_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + M \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right)
\end{aligned}$$

Уравнения Био описывают скорость смещения твердых частиц (v_x, v_z), относительную скорость смещения флюида (q_x, q_z), компоненты тензора напряжений в упругом скелете $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$, давление флюида p . В коэффициенты уравнений входят плотность флюида ρ_f , пористость ϕ , вязкость флюида η , плотность флюидонасыщенного скелета ρ , модуль взаимодействия между фазами M . Анизотропия выражается в параметрах извилистости T_x, T_z , проницаемости k_x, k_z (нижний индекс указывает на ось, в направлении которой определяется параметр). Наконец, в уравнениях присутствуют компоненты тензора жесткости неосушенного скелета c_{ij} анизотропные параметры Био-Уиллиса α_x, α_z . Уравнения Био аппроксимируются явной конечно-разностной схемой со вторым порядком по пространству и времени на сдвинутых сетках, где различные компоненты скоростей смещений и напряжений находятся в разных узлах сетки [11, 12].

Для оценки влияния анизотропии материала в трещинах на затухание, вызванное FF-WIFF, проводится ряд численных экспериментов распространения волны в трещиноватых средах, где связность трещин обеспечивает перколяцию на заданное расстояние, причем рассматриваются модели разной степени связности. Дискретные системы трещин (рис. 2) сформированы двумя семействами трещин взаимно перпендикулярных трещин (ориентированных в направлении осей координат), длина и ширина которых одинакова и составляет 30 мм и 4 мм, соответственно. Генерация систем трещин проводится с использованием метода имитации отжига, детали алгоритма представлены в [8]. Всего рассматривается 6 различных степеней связности (длин перколяции), по 10 реализаций на каждую степень. Во всех рассматриваемых моделях вмещающая среда по сравнению с материалом, заполняющим трещины, имеет крайне низкую проницаемость и низкую пористость, что обеспечивает практическое отсутствие флюидопотоков из вмещающей среды в трещины и наоборот и затухание волны происходит в основном за счет флюидопотоков в связанных трещинах. Отметим, что для наблюдения эффектов, вызванных интенсивными флюидопотоками в трещинах, необходимо рассматривать достаточно высокую частоту сигнала. Используемый в численных экспериментах шаг сетки по пространству в направлениях обоих

осей координат $\Delta x = \Delta z = 2$ мм, обеспечивает достаточное число точек на длину волны в рассматриваемом диапазоне центральных частот исходного сигнала от 1 до 10 кГц.

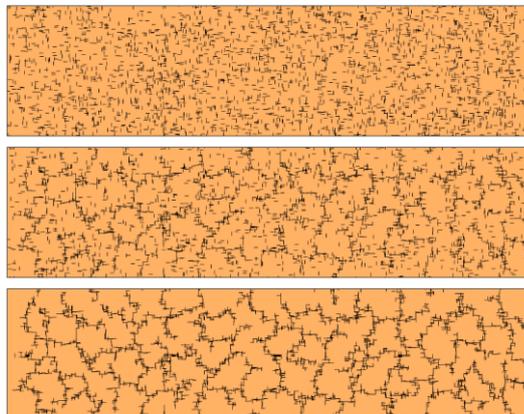


Рис. 2. Модели трещиноватой среды с разной длиной перколяции (возрастающей от верхней модели к нижней).

В первой серии экспериментов трещины заполнены анизотропным материалом, причем большая проницаемость, меньшая извилистость, и меньшая жесткость упругого скелета обеспечивается именно в направлении ориентации трещин. Физические свойства вмещающей породы, материала в трещинах, параллельных оси Ox , материала в трещинах, параллельных оси Oz , материала в пересечениях трещин разной ориентации указаны в таблице 1 (1-4 столбцы соответственно). Здесь и в дальнейших численных экспериментах плотность флюида 1000 кг/м^3 , вязкость флюида $0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Физические свойства материалов реалистичны и соответствуют свойствам оолитового известняка до и после частичного растворения раствором углекислоты (рис. 3) [14].

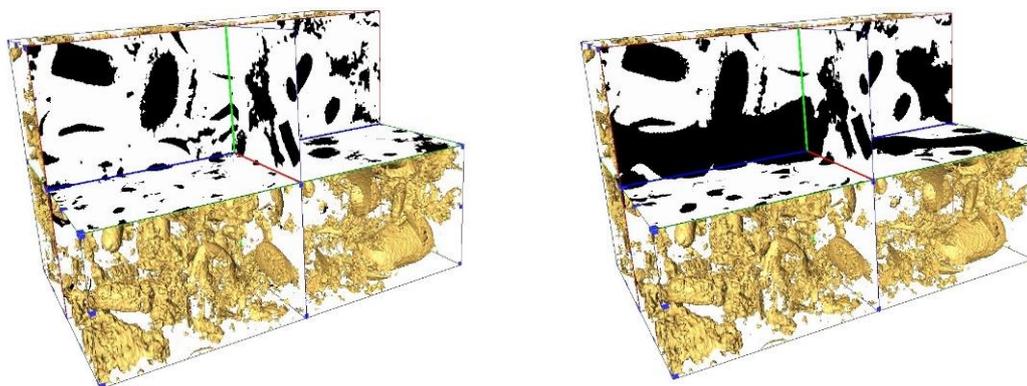


Рис. 3. Изображения известняка до насыщения раствором CO_2 (слева), и после (справа), полученные методом компьютерной томографии. Черным цветом показано поровое пространство, белым – скелет, желтым – поверхность раздела.

Высокая анизотропия упругого скелета наполнителя трещин обуславливается влиянием химически активного раствора. Поскольку протекание раствора углекислоты происходит по трещинам вдоль них, частичное растворение породы-наполнителя оказывает наибольшее влияние именно на упругие свойства материала в направлении ориентации трещин, уменьшает извилистость порового пространства в этом направлении.

Таблица 1

Физические свойства трещиноватой среды

Параметр	Вмещающая порода	Анизотроп., трещины Вдоль O _x	Анизотроп., трещины Вдоль O _z	Анизотроп., пересечения трещин	Изотроп., мягкий	Изотроп., жесткий
Осушенный материал						
ϕ , кг/м ³	0.1	0.225	0.225	0.225	0.225	0.1425
k_x , м ²	10 ⁻¹⁵	1.4·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻¹³	1.4·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻¹³
k_z , м ²	10 ⁻¹⁵	5.3·10 ⁻¹³	1.4·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	1.4·10 ⁻¹⁰	5.3·10 ⁻¹³
T_x	1.83	1.17	1.83	1.17	1.17	1.83
T_z	1.83	1.83	1.17	1.17	1.17	1.83
α_x	0.2962	0.6896	0.6418	0.6915	0.7346	0.7346
α_z	0.2962	0.6418	0.6896	0.6915	0.7346	0.7346
Неосушенный материал						
ρ , кг/м ³	2485	2318	2318	2318	2318	2458
c_{11} , ГПа	69.097	38.958	46.432	38.958	38.958	46.432
c_{33} , ГПа	69.097	46.432	38.958	38.958	38.958	46.432
c_{13} , ГПа	7.159	19.811	19.811	19.811	16.337	23.81
c_{55} , ГПа	30.969	11.311	11.311	11.311	11.311	11.311
M , ГПа	20.1	9.4287	9.4287	9.4026	9.33	9.488

Результирующие поля давления флюида для моделей с различной степенью связности трещин представлены на рис. 4. Действительно, при крайне низкой проницаемости вмещающей среды значительные перепады давления наблюдаются лишь в трещинах. Причем перепады давления не наблюдаются в случае практически непересекающихся трещин (рис. 4, А), но сразу возникают при формировании кластеров протяженностью больше длины микротрещины (рис. 4, В). Перепады давления флюида более интенсивны в системах трещин, обладающих сильной связностью и едва различимы для последних степеней связности (поля давлений D, E и F на рис. 4.). Результаты свидетельствуют о наличии интенсивного FF-WIFF при сильной глобальной связности трещин.

Для оценки влияния анизотропии на сейсмическое затухание вследствие FF-WIFF проводится ряд численных экспериментов распространения волны в трещиноватой среде, где материал в трещинах заполнен изотропным

материалом. В частности, рассматриваются две модели материала – мягкий материал, обладающий большими пористостью, проницаемостью и меньшей извилистостью и жесткий материал; свойства материалов указаны в таблице 1. (пятый и шестой столбцы, соответственно). Полученные в результате численных экспериментов поля давлений для первой и последней степеней связности трещин показаны на рис. 5. Здесь снова наблюдаются более интенсивные перепады давления для сильно связанных трещин, однако, при сравнении результатов для мягкого и жесткого наполнителя в случае второго перепады давления практически не наблюдаются и при наличии сильной глобальной связности.

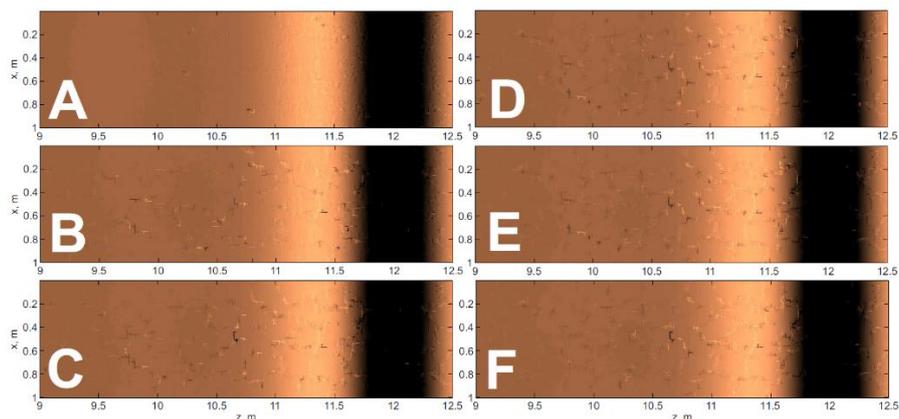


Рис. 4. Поле давления во флюиде в анизотропных трещиноватых средах с различной длиной перколяции при центральной частоте волны 3 кГц. Связность трещин растет от изображения А до изображения F

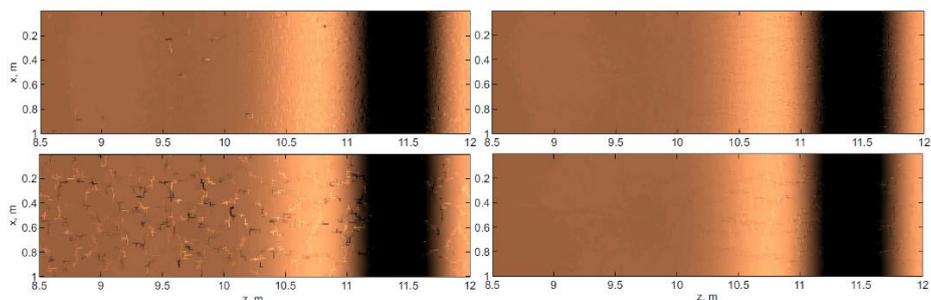


Рис. 5. Поле давления флюида в изотропных трещиноватых средах. Верхние изображения соответствуют наименьшей длине перколяции, нижние изображения – наибольшей. Изображения слева соответствуют мягкому наполнителю трещин, справа – жесткому. Центральная частота сигнала – 3 кГц

Наконец, зарегистрированные на линиях приемников (рис. 1.) трассы для всех проведенных численных экспериментов осредняются по реализациям и направлению оси Ox и используются при численной оценке величины $1/Q$, обратной добротности, характеризующей частотно-зависимое затухание волны.

Численная оценка величины $1/Q$ проводится при помощи деконволюции сигналов до и после прохождения через трещиноватую среду [15]. Результаты оценки представлены на рис. 6. С ростом связности трещин для всех трех моделей наполнителя трещин (анизотропный, изотропный мягкий, изотропный жесткий) наблюдается рост затухания во всем рассматриваемом частотном диапазоне. В целом, рост затухания также ожидаемо наблюдается и с ростом центральной частоты сигнала. Пик затухания вблизи 5 кГц для всех моделей может быть связан неоднородностью плотности трещин в модели в направлении оси Ox . Как и для перепадов давления, более значительный рост затухания наблюдается от практически непересекающихся трещин к системам, где начинают формироваться кластеры размера больше отдельных трещин. Практически на всем частотном диапазоне и для всех степеней связности наибольшее затухание волны происходит на системе трещин, заполненных мягким изотропным материалом. С другой стороны, жесткий материал в трещинах приводит к наименьшему затуханию при всех степенях связности трещин кроме случая практического отсутствия пересечений. Такой результат для непересекающихся трещин, где отсутствуют флюидопотоки между трещинами, может объясняться доминированием затухания, вызванного рассеянием, которое слабо зависит от проницаемости и прочих параметров. Ожидаемым результатом является то, что оценки затухания для анизотропного материала в трещинах заключены между оценками в случае жесткого и мягкого изотропных материалов. Однако затухание в случае анизотропии значительно отличается от затухания, полученного в случае изотропных наполнителей трещин, что свидетельствует о влиянии анизотропии фильтрационно-емкостных и упругих свойств среды на сейсмическое затухание.

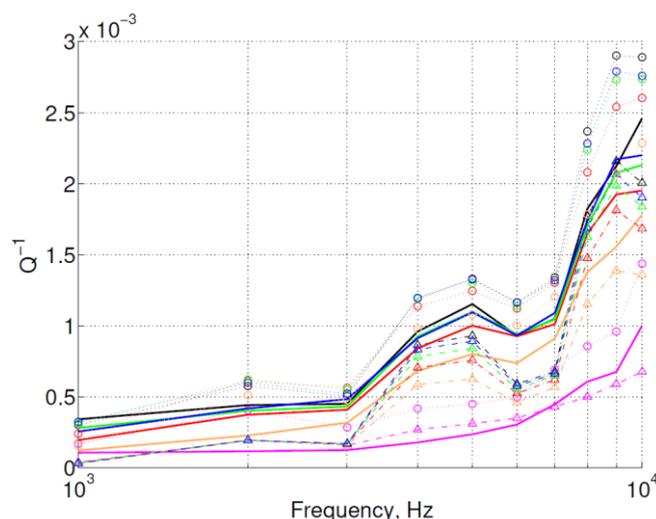


Рис. 6. Численная оценка величины, обратной добротности, для трещиноватых сред. Сплошные линии соответствуют оценкам для анизотропного наполнителя трещин, пунктирные с кружками – мягкого изотропного, штрихпунктирные с треугольниками – жесткого изотропного. Цвет линий соответствует длине перколяции модели, росту длины перколяции соответствует порядок цветов: розовый, желтый, красный, зеленый, синий, черный

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 20-45-540004 и гранта Президента РФ на поддержку молодых ученых – кандидатов наук МК-3947.2021.1.5. Моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Salaun N., Toubiana H., Mitschler J.B., Gigou G., Carriere X., Maurer V., Richard A. High-resolution 3d seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the upper rhine graben // *The Leading Edge*. – 2020. – Vol. 39. – № 12. – P. 857-863.
2. Marty N.C.M., Hamm V., Castillo C., Thiery D., Kervevan C. Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the dogger carbonate aquifer (paris basin) based on in-situ geothermal well data // *Geothermics*. – 2020. – Vol. 88. – P. 101899.
3. Menke H.P., Reynolds C.A., Andrew M.G., Pereira Nunes J.P., Bijeljic B., Blunt M.J. 4d multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales // *Chemical Geology*. – 2018. – Vol. 481. – P. 23-37.
4. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Luth S., Ivanova A., Kempka, T., Hennings, J., Sopher, D., Zhang, F. The First post-injection seismic monitor survey at the ketzin pilot co2 storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – Vol. 66. – № 1. – P. 62-84.
5. Muller T.M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks – a review // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 5. – P. 75A147-75A164.
6. Kong L., Gurevich B., Zhang Y., Wang Y. Effect of fracture fill on frequency-dependent anisotropy of fractured porous rocks // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – Vol. 65. – № 6. – P. 1649-1661.
7. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J. G., Krause R., Holliger K. Seismic attenuation and stiffness modulus dispersion in porous rocks containing stochastic fracture networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123. – № 1. – P. 125-143.
8. Novikov M.A., Lisitsa V.V., Bazaikin Y.V. Wave propagation in fractured porous media with different percolation length of fracture systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – Vol. 41. – № 8. – P. 1533-1544.
9. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. i. low-frequency range // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1956. – Vol. 28. – P. 168-178.
10. De la Puente J. Seismic wave simulation for complex rheologies on unstructured meshes / PhD thesis. – Ludwig-Maximilians Universitat, Munich, Germany, 2008. – 171 p.
11. Masson Y. J., Pride S. R. Finite-difference modeling of biot's poroelastic equations across all frequencies // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 2. – P. N33-N41.
12. Новиков М.А., Базайкин Я.В., Лисица В.В., Козяев А.А. Моделирование волновых процессов в трещиновато-пористых средах: влияние связности трещин на поглощение сейсмической энергии // *Вычислительные методы и программирование*. – 2018. – Т. 19. – С. 235-252.
13. Lisitsa V. Optimal discretization of PML for elasticity problems // *Electronical transactions on Numerical Analysis*. – 2008. – Vol. 30. – P. 258-277.
14. Lebedev M., Zhang Y., Sarmadivaleh M., Barifcani A., Al-Khdheewi E., Iglauer S. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. – 2017. – Vol. 66. – P. 106–119.

15. Caspari E., Novikov M., Lisitsa V., Barbosa N. D., Quintal B., Rubino J. G., Holliger K. Attenuation mechanisms in fractured fluid-saturated porous rocks: A numerical modelling study // *Geophysical Prospecting*. – 2019. – Vol. 67. – P. 935-955.

REFERENCES

1. Salaun N., Toubiana H., Mitschler J.B., Gigou G., Carriere X., Maurer V., Richard A. High-resolution 3d seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the upper rhine graben // *The Leading Edge*. – 2020. – Vol. 39. – № 12. – P. 857-863.

2. Marty N.C.M., Hamm V., Castillo C., Thiery D., Kervevan C. Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the dogger carbonate aquifer (paris basin) based on in-situ geothermal well data // *Geothermics*. – 2020. – Vol. 88. – P. 101899.

3. Menke H.P., Reynolds C.A., Andrew M.G., Pereira Nunes J.P., Bijeljic B., Blunt M.J. 4d multi-scale imaging of reactive flow in carbonates: Assessing the impact of heterogeneity on dissolution regimes using streamlines at multiple length scales // *Chemical Geology*. – 2018. – Vol. 481. – P. 23-37.

4. Huang F., Bergmann P., Juhlin C., Ivandic M., Luth S., Ivanova A., Kempka, T., Henniges, J., Sopher, D., Zhang, F. The First post-injection seismic monitor survey at the ketzin pilot co2 storage site: results from time-lapse analysis // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – Vol. 66. – № 1. – P. 62-84.

5. Muller T.M., Gurevich B., Lebedev M. Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks – a review // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 5. – P. 75A147-75A164.

6. Kong L., Gurevich B., Zhang Y., Wang Y. Effect of fracture fill on frequency-dependent anisotropy of fractured porous rocks // *Geophysical Prospecting*. – 2017. – Vol. 65. – № 6. – P. 1649-1661.

7. Hunziker J., Favino M., Caspari E., Quintal B., Rubino J. G., Krause R., Holliger K. Seismic attenuation and stiffness modulus dispersion in porous rocks containing stochastic fracture networks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123. – № 1. – P. 125-143.

8. Novikov M.A., Lisitsa V.V., Bazaikin Y.V. Wave propagation in fractured porous media with different percolation length of fracture systems // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2020. – Vol. 41. – № 8. – P. 1533-1544.

9. Biot, M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. i. low-frequency range // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1956. – Vol. 28. – P. 168-178.

10. De la Puente J. Seismic wave simulation for complex rheologies on unstructured meshes / PhD thesis. – Ludwig-Maximilians Universitat, Munich, Germany, 2008. – 171 p.

11. Masson Y. J., Pride S. R. Finite-difference modeling of biot's poroelastic equations across all frequencies // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75. – № 2. – P. N33-N41.

12. Novikov M.A., Bazajkin YA.V., Lisica V.V., Kozyaev A.A. Modelirovanie volnovykh processov v treshchinovato-poristykh sredah: vliyanie svyaznosti treshchin na pogloshchenie sejsmicheskoy energii // *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. – 2018. – T. 19. – S. 235-252.

13. Lisitsa V. Optimal discretization of PML for elasticity problems // *Electronical transactions on Numerical Analysis*. – 2008. – Vol. 30. – P. 258-277.

14. Lebedev M., Zhang Y., Sarmadivaleh M., Barifcani A., Al-Khdheawi E., Iglauer S. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. – 2017. – Vol. 66. – P. 106–119.

15. Caspari E., Novikov M., Lisitsa V., Barbosa N. D., Quintal B., Rubino J. G., Holliger K. Attenuation mechanisms in fractured fluid-saturated porous rocks: A numerical modelling study // *Geophysical Prospecting*. – 2019. – Vol. 67. – P. 935-955.

© M. A. Новиков, В. В. Лисица, 2021