

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИГГЕРНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО И ГЕОДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССОВ ПРИ НАГНЕТАНИИ ЖИДКОСТИ В ГЕОСРЕДУ

А.Е. Заболотин¹, А.В. Лоскутов¹, А.В. Коновалов¹, С.Б. Турунтаев²

¹ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: a.konovalev@imgg.ru

²ФГБУН Институт динамики геосфер РАН, Ленинский пр-т 38, кор. 1, г. Москва, 119334;
e-mail: s.turuntaev@gmail.com

Поступила в редакцию 29 декабря 2015 г.

Осуществлена программная реализация модуля моделирования сейсмического и гедеформационного процессов при отборе и закачке жидкости в геосреду. В расчетах напряженно-деформированного состояния геосреды используется модифицированная модель М. Био, которая учитывает скорость изменения объемной деформации в уравнении Дарси. Для программной реализации модуля моделирования при перемещении флюида в рамках модели Био был применен свободный пакет C++ библиотек OpenFOAM 2.4.0. Пакет представляет собой набор скомпилированных модулей, а также их исходных кодов, инкапсулирующих в полном соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования все наиболее распространенные объекты и операции вычислительной механики сплошных сред. Построение модуля расчета напряжений базируется на стандартном решателе из пакета OpenFOAM для упругой деформации изотропного тела. К его коду была добавлена процедура дискретизации и решения уравнения Дарси для порового давления. Гедеформационные эффекты оцениваются путем прямого расчета смещений на свободной поверхности вблизи источников закачки и отбора жидкости, что может привести, в частности, к опасному проседанию поверхности и возникновению индуцированной сейсмичности. Триггерные сейсмические эффекты оцениваются путем расчета скорости накопления избыточных касательных напряжений в зоне разлома на глубине сейсмогенного слоя (5–15 км) с учетом соотношений, связывающих историческую сейсмичность и скорость накопления тектонических напряжений в рамках модифицированной модели Дитриха. Выполнено сейсмологическое обоснование возможных максимальных магнитуд техногенных землетрясений и их периодов повторяемости в районе промышленного освоения шельфовых месторождений нефти и газа на северо-востоке о. Сахалин, а также уточнены модели активизации сейсмического процесса в результате техногенного воздействия на геосреду.

Ключевые слова: моделирование, сейсмический процесс, наведенная сейсмичность, месторождения нефти и газа, программная реализация, напряженно-деформированное состояние, геомеханика, геосреда, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что при эксплуатации месторождений нефти и газа возникают различные явления, приводящие к нежелательным экологическим последствиям. К их числу относятся нарушения природного механического равновесия в зоне коллектора, в первую очередь, за счет отбора и закачки флюида и соответствующего изменения баланса механических напряжений как в зоне коллектора, так и в окружающей толще. Это проявляется в виде различных сейсмических деформаций: техногенной (наведенной)

сейсмичности и относительно быстрых современных тектонических деформаций, в частности, оседании земной поверхности.

По-видимому, гидравлическая передача порового давления через разломы и систему трещин в массиве является главной причиной перераспределения напряжений в геосреде, связанной с извлечением углеводородов и закачкой жидкости [1]. В совокупности это может спровоцировать разрядку ранее накопленных естественных напряжений в близлежащих зонах с активными тектоническими нарушениями, где комбинация эффективных напряжений в породе близка к

критическим значениям. Такие события классифицируются как триггерные.

Наиболее сильные сейсмические проявления, по всей видимости, вызваны серией катастрофических землетрясений в 1976–1984 гг. ($M \sim 7.0$) вблизи Газлийского месторождения (Узбекистан), идентифицируемые как наглядный пример триггерного механизма техногенной сейсмичности. Кроме того, возможен механизм, при котором длительная эксплуатация месторождений может спровоцировать серию сильных землетрясений индуцированного или триггерного характера, в то время как произошедшие землетрясения могут стать триггерами более сильного сейсмического события вблизи активных геологических структур, как это, например, было в 2011 г. близ города Прага (штат Оклахома, США) [26]. Однако энергия триггерных событий не может быть выше энергии землетрясений естественного происхождения [1].

Последние два десятилетия на севере о. Сахалин ведутся интенсивные работы по развитию нефтегазодобывающей отрасли. При этом районы промышленной разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и подавляющая часть сопутствующей инфраструктуры расположены в зоне активных тектонических нарушений разного ранга и возраста, выявленных по результатам многочисленных геолого-геофизических исследований. Поэтому триггерная сейсмичность представляет серьезную опасность при разработке месторождений.

Цель настоящей работы – разработка модели активизации сейсмичности триггерного характера в результате нагнетания жидкости на основе моделирования напряженно-деформированного состояния геосреды с параметрами закачки флюидов, близкими к эксплуатационным, а также сейсмологическое обоснование возможных максимальных магнитуд техногенных землетрясений и их периодов повторяемости в районе промышленного освоения шельфовых месторождений нефти и газа на северо-востоке о. Сахалин.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ ПОРОУПРУГОЙ СРЕДЫ

Процесс нагнетания и извлечения флюидов при разработке нефтегазовых месторождений приводит к изменению порового давления и массы жидкости в пластах закачивания и, соответственно, к перераспределению полей напряжения в геосреде. Так, значительное изменение естественного пластового давления способно вызывать объемные деформации в окрестности резервуара и, как результат, приводить к оседанию земной поверхности и возможному возбуждению сейсмической активности. Для решения задачи, позволяющей оценить распределение напряже-

ний в окрестности месторождения, выбрана модель на основе теории пороупругой флюидонасыщенной среды, разработанной М. Био [13]. Уравнения теории М. Био могут быть адаптированы для решения широкого круга задач геомеханики. Как показано в фундаментальной работе Дж. Райса и М. Клеры [22], когда в качестве определяющих параметров выбраны напряжение и поровое давление, среда описывается двумя уравнениями:

$$2\mu\epsilon_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1+\nu)(1+\nu_u)}p\delta_{ij}, \quad (1)$$

$$\Delta m = m - m_0 = \frac{3\rho_0(\nu_u - \nu)}{2\mu B(1+\nu)(1+\nu_u)}\left[\sigma_{kk} + \frac{3}{B}p\right], \quad (2)$$

которые содержат только четыре упругие константы: дренированные – модуль сдвига и коэффициент Пуассона μ и ν , и недренированные – коэффициенты Скемптона и Пуассона B и ν_u , соответственно [22]. Так, уравнение (1) связывает деформацию среды ϵ_{ij} , напряжение σ_{ij} и поровое давление p . Уравнение (2) связывает изменение флюидной массы Δm , среднее нормальное напряжение $\frac{\sigma_{kk}}{3}$ и поровое давление p .

Если в качестве определяющих переменных выбрать напряжение σ_{ij} и изменение массы Δm , то, обратив уравнения (1) и (2), получим уравнения, используемые при численном моделировании [22–24]:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \frac{2\nu_u\mu}{1-2\nu_u}\epsilon_{kk}\delta_{ij} - \frac{BK_u}{\rho_0}\Delta m\delta_{ij}, \quad (3)$$

$$p = \frac{B}{3}\left[\frac{E(1+\nu_u)}{3\rho_0(\nu_u - \nu)}\Delta m - \sigma_{kk}\right], \quad (4)$$

где K_u по смыслу представляет собой недренированный объемный модуль упругости:

$$K_u = \frac{2\mu(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)}. \quad (5)$$

Дополнительно к уравнениям (3), (4) необходимо добавить закон Дарси, определяющий диффузию поровой жидкости, который в линеаризованной модели без учета влияния объемных сил имеет вид:

$$q_i = -\frac{\rho_0 k}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx_i}, \quad (6)$$

где q_i – скорость фильтрации, а ρ_0 и η – соответственно, плотность и динамическая вязкость поровой жидкости, k – коэффициент проницаемости, а также уравнение сохранения массы:

$$\frac{d\Delta m}{dt} + \frac{dq_i}{dx_i} = y, \quad (7)$$

где y – пространственная плотность источников (и стоков).

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Анализ сейсмологических данных [10–12, 16, 17, 20, 21 и др.] показывает, что развитие сейсморазрыва происходит как череда подвижек по относительно узким зонам: каждая такая подвижка инициирует подвижку в соседней зоне, а сама через короткое время Δt останавливается (залечивается). При этом генеральный разрыв продолжает распространяться.

Возникновение каждой подвижки контролируется заданным критерием, например критерием Кулона-Мора (коэффициентами статического и динамического трения): достижение предельных значений касательных напряжений в заданной ячейке пространства инициирует подвижку. Далее происходит передача сброшенного напряжения в соседние ячейки, и, если в них достигаются предельные напряжения, происходит сброс и трансфер напряжения и т.д. Формируется некоторая область локальной неустойчивости.

Когда такая область достигает размера, сопоставимого с размером области зарождения динамической неустойчивости, происходит динамический пробой из зоны зарождения и переход к сейсмическому разрыву, который может вырасти до большего размера. Оценки размеров области зарождения динамической неустойчивости и иллюстрации этого перехода для трения, зависящего от скорости скольжения и состояния поверхности скольжения, даны в [10, 21 и др.]. Подобные переходы характеризуют процессы деформации, связанные с докритическим ростом трещины и разупрочнением при трении скольжения.

Таким образом, происходит переход от асейсмического скольжения к динамическому разрыву на участке зарождения конечного размера. Дж. Дитрих [16] и Я. Бен-Зион [10] оценили, что магнитуда землетрясения, эквивалентного фазе зарождения, определяемой лабораторными значениями параметров трения, находится в диапазоне от -2 до -4. Результаты исследований, суммированные в [10], показывают, что неровность поверхностей скольжения и мощность зон скольжения в природных разломных структурах уменьшается при увеличении размера разлома. Более того, геодезические измерения с высоким разрешением и наблюдения за землетрясениями с $M < -1$ на нескольких крупных зонах разломов, включая разлом Сан-Андреас, позволяют считать, что зоны зарождения на больших разломах ненамного больше тех, что связаны с лабораторными экспериментами [12]. Это позволяет оценить размер зоны локальной неустойчивости, который не превосходит первых десятков метров. Вместе с тем, результаты детального обзора геологических, сейсмологических и палеосейсмологических исследований показывают, что сейсмиче-

ские подвижки по разломам сосредоточены в пределах чрезвычайно узких зон в масштабе нескольких сантиметров или меньше. Это позволяет оценить минимальный размер сетки, который, исходя из ограниченных ресурсов вычислительного кластера, можно принять равным 100 м. Сам разлом можно смоделировать плоскостью, за пределами которой происходит изменение физических параметров среды.

Дж. Дитрих [17] проанализировал реакцию скорости деформации на скачок напряжения, используя уравнения трения, зависящего от скорости и состояния разлома, вместе с предполагаемым распределением переменных состояния на совокупности не взаимодействующих участков зарождения локальной неустойчивости, предвещающей возникновение магистрального разрыва. Решение для индуцированной деформации имеет вид экспоненциальной функции, обратно пропорциональной времени, которое совместимо с законом Омори-Уцу для затухания афтершоковой активности во времени. Данный подход позволяет получить оценки изменения сейсмической активности на резкий скачок напряжения. В общем же случае, в рамках результатов работы [20], сейсмическая активность R в результате изменения напряженно-деформированного состояния геосреды может быть представлена в виде:

$$R = \frac{r}{\gamma \dot{\tau}_l}, \quad (8)$$

где r – историческая (фоновая) сейсмическая активность; $\dot{\tau}_l$ – скорость тектонической нагрузки; γ – переменная состояния:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{A\sigma}(1 - \gamma \dot{\tau}), \quad (9)$$

где $A\sigma$ – эффективное напряжение, определяемое параметром состояния разлома A (обычно величина $A\sigma$ составляет порядка 0.1 МПа); $\dot{\tau}$ – касательное напряжение, в общем случае зависящее от времени и пространственных координат.

В случае медленных изменений касательных напряжений и отсутствия резких скачков напряжения, вызванных, например, возникновением крупных землетрясений в исследуемом районе, сейсмическая активность R может быть представлена в виде:

$$R = \frac{r \dot{\tau}}{\dot{\tau}_l}, \quad (10)$$

где $\dot{\tau}$ есть скорость накопления касательных напряжений. В нашей задаче величина $\dot{\tau}$ определяется аддитивным вкладом скорости накопления тектонических касательных напряжений $\dot{\tau}_l$, вызванных медленным скольжением берегов разлома, и скорости накопления избыточных касательных напряжений $\dot{\tau}_r$ в зоне разлома, вызванных закачкой жидкости.

СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Модель М. Био основана на трех положениях: 1) изменение давления в поровой жидкости вызывает только объемную деформацию; 2) деформации среды равновесны и обратимы; 3) движение жидкости подчиняется закону Дарси.

Так, последнее положение теории, как показано в [22], приводит к важному результату – уравнение сохранения массы приобретает вид классического уравнения диффузии. При последовательной подстановке уравнений (4)→(6)→(7) получим:

$$\frac{\partial \Delta m}{\partial t} - c \nabla^2 (\Delta m) = y, \quad (11)$$

где c – коэффициент пьезопроводности, определяемый комбинацией всех параметров задачи:

$$c = \frac{K_s}{\eta} \left[\frac{2\mu(1-\nu)}{(1-2\nu)} \right] \cdot \left[\frac{B^2(1+\nu_u)^2}{9(1-\nu_u)(\nu_u-\nu)} \right], \quad (12)$$

где K_s , η – проницаемость пороупругой среды и вязкость сжимаемой жидкости, соответственно.

Второе положение теории приводит к тому, что в процессе деформирования пороупругой среды должны выполняться уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0. \quad (13)$$

Подставляя уравнение (3) в (13) и используя тот факт, что определение тензора деформации через вектор смещения u_i задается в виде

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (14)$$

получим следующее уравнение для вектора смещения:

$$\mu(\nabla^2 u_i + \frac{1}{1-2\nu_n} \cdot \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j}) - \frac{BK_u}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \Delta m}{\partial x_i} = 0. \quad (15)$$

Таким образом, получаем следующую схему решения задачи:

1) Определить распределение Δm как решение уравнения (11) при условии равенства нулю потока жидкости на бесконечности и начальном условии $\Delta m = 0$. Зависящая от времени плотность объемных источников флюидов отвечает распределению скважин и скорости закачивания.

2) Решить уравнение (15) для всей области относительно вектора смещения u_i в каждый момент времени.

3) По вектору смещения u_i из (14) и (3) вычислить деформации и напряжения, индуцированные в среде в процессе закачивания.

4) Вычислить индуцированное поровое давление жидкости из (4).

5) Рассчитать касательные напряжения, вызванные движением флюида, на пространственных разме-

рах больше, чем размер области зарождения неустойчивости, что соответствует выбору ячейки с линейным размером около 100 м.

6) Оценить максимальные касательные напряжения в сейсмогенном слое и скорость их изменения в каждой ячейке.

7) По результатам комплексных сейсмологических, геодезических, геологических и палеосейсмологических исследований оценить период повторяемости (или частоту возникновения) сильных землетрясений и их максимальную магнитуду на заданном разломе, который, исходя из постановки задачи, находится в окрестности разрабатываемого месторождения.

8) Для заданных максимальных магнитуд землетрясений на заданном разломе оценить длину сейсморазрыва, например используя среднемировые или (если есть) региональные переходные зависимости магнитуда–длина разрыва.

9) Исходя из анализа имеющихся сейсмологических, геодезических, геологических и палеосейсмологических данных оценить скорость накопления тектонических касательных напряжений $\dot{\tau}_i$.

10) На заданном линейном масштабе сейсморазрыва оценить среднюю величину скорости накопления избыточных касательных напряжений $\dot{\tau}_{tr}$, вызванных закачкой жидкости.

11) Применить формулу (10) для прогноза наведенной сейсмической активности за соответствующий период времени эксплуатации месторождения.

СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В РАЙОНЕ ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА НА СЕВЕРЕ О. САХАЛИН

В пределах северо-восточного шельфа с 52.5° по 55.0° с.ш., в районе нефтегазовых месторождений (немного восточнее осевой линии Восточно-Сахалинского глубинного разлома, изображенной на рис. 1), вдоль простирания его основных структур были локализованы очаги слабых и умеренных землетрясений в ходе проведения непрерывных детальных сейсмологических наблюдений [7]. Это подтверждает современную активность данной геологической структуры, протяженность которой составляет приблизительно 250–300 км (рис. 1). Модель пространственного распределения современной коровой сейсмичности на севере о. Сахалин, предложенная в работе [4], позволила идентифицировать новый активный разлом, находящийся в непосредственной близости от разрабатываемых шельфовых месторождений нефти и газа. В пределах данного разлома произошло сильное коровое землетрясение 12 июня 2005 г. с моментной магнитудой $M_w = 5.6$ восточнее месторождения

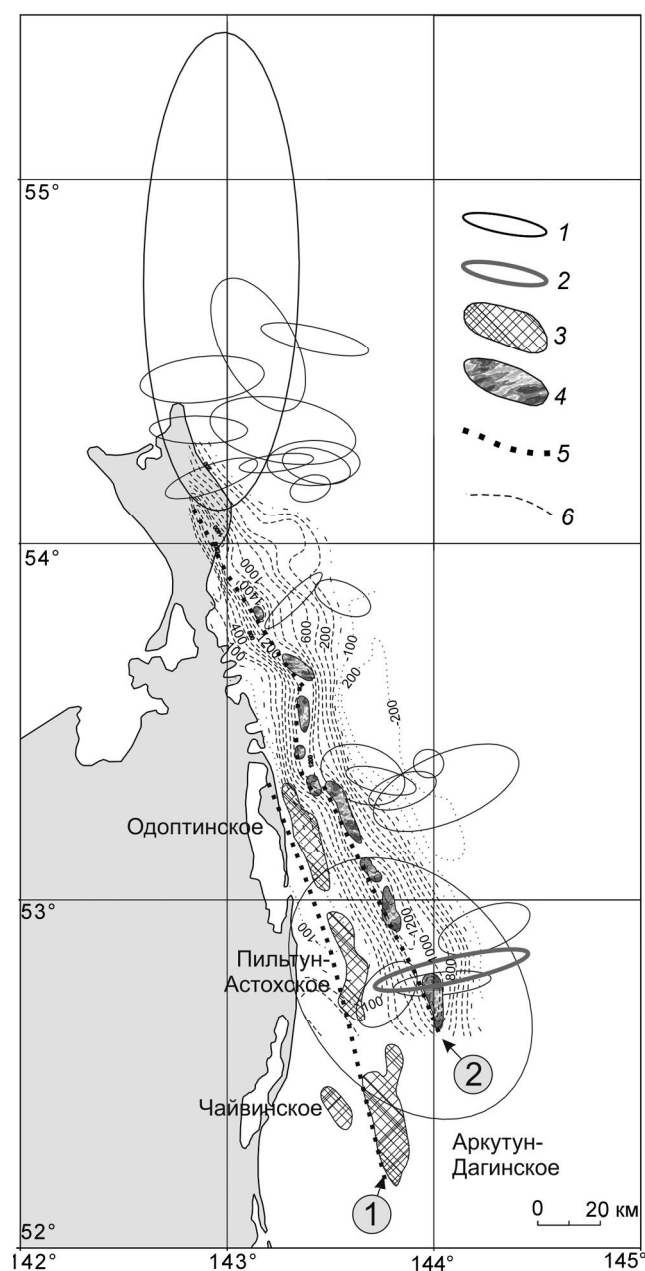


Рис. 1. Карта аномального магнитного поля и основных структурных элементов северо-восточного шельфа о. Сахалин [4].

1 – эллипсы ошибок в определении координат эпицентров землетрясений в 2006–2011 гг. (90 % доверительная область); 2 – эллипс ошибок в определении координат эпицентра землетрясения 12 июня 2005 г. (90 % доверительная область); 3 – месторождения нефти и газа; 4 – антиклинальные поднятия вдоль Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны; 5 – разломы: 1 – Западно-Одоптинский, 2 – Восточно-Сахалинский; 6 – изодинамы.

нефти и газа Пильтун-Астохское (рис. 1), разрабатываемого с 1999 г., на расстоянии около 20–35 км от него. Несколько землетрясений с магнитудой, близкой к $M \sim 5.5$, ранее уже были зарегистрированы на северо-восточном шельфе (восточнее п-ва Шмидта), их возникновение обычно связывали с современной тектонической активностью западного борта впадины Дерюгина. Событие 12 июня 2005 г. произошло значительно южнее упомянутых событий и пока является самым сильным в этой шельфовой зоне острова за всю историю инструментальных сейсмологических наблюдений (с 1905 г. по настоящее время).

По совокупности независимых определений механизма очага сильного землетрясения 12 июня 2005 г. ($M_w = 5.6$) установлено, что землетрясение с подвижкой взбросо-сдвигового типа произошло в условиях субширотного сжатия и связано с перемещением по глубинному разлому, расположенному в основании восточного крыла Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны (рис. 1). Подвижка в очаге произошла по плоскости, падающей на запад [4].

Одна из последних моделей зон ВОЗ (возникновения очагов землетрясений) ИМГиГ, которая использовалась для расчетов сейсмической опасности в Сахалинской области [5], включает в себя 10 площадных зон (или доменов, по терминологии, принятой при составлении карты ОСР-97), соответствующих определенным структурным элементам Северного и Центрального Сахалина и прилегающей части материка, а также ряд линейных зон (или сейсмолинеаментов), которые отвечают достоверно установленным или предполагаемым активным разломам. На рис. 2 показаны границы площадных зон ВОЗ (доменов) D1–D10 и положение линейных зон (сейсмолинеаментов).

Площадная зона D3 включает в себя практически весь северо-восточный шельф Сахалина, за исключением небольших участков, примыкающих к побережью и включенных в зоны D1 и D2. По уровню фоновой сейсмической активности зона D3 значительно уступает зонам D1 и D2 (в 5 раз и более), что неоднократно отмечалось и ранее [3 и др.], а также отмечено по результатам сейсмического мониторинга, проводимого на севере острова с 2006 г. В последние годы это мнение еще более укрепилось после того, как было выполнено переопределение координат эпицентров ряда исторических землетрясений с $MLH = 4.5–5.5$, произошедших вблизи северо-восточного побережья острова в период 1932–1964 гг. [6], а также уточнение положения сильного землетрясения 12 июня 2005 г. [4], описанного выше. В результате переопределения положения очагов землетрясений координаты эпицентров этих событий были перемещены к западу на 10–20 км и оказались расположенными на суше, в

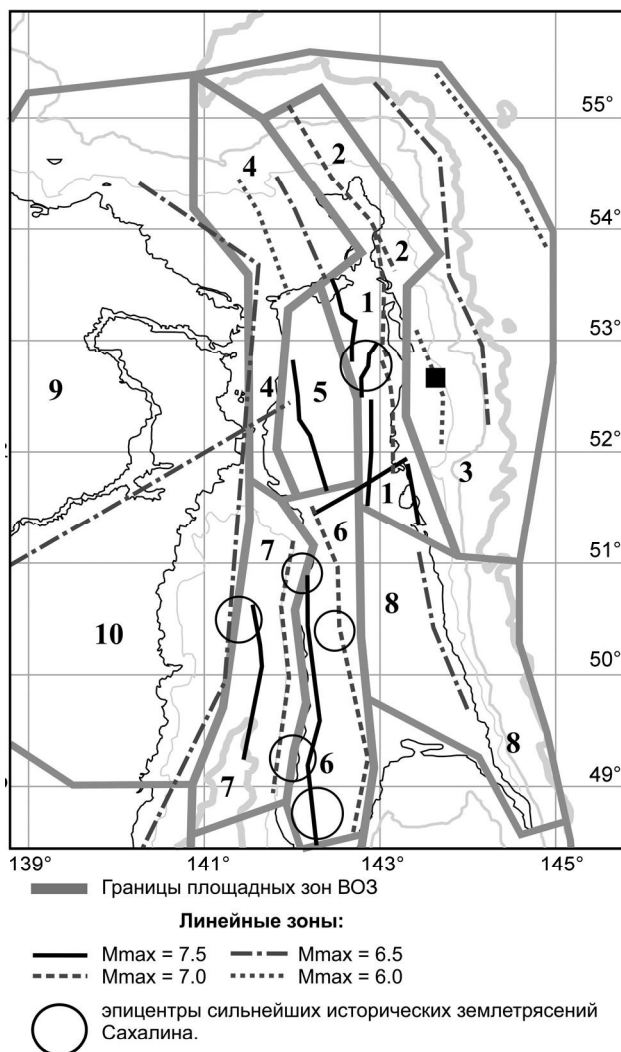


Рис. 2. Модель ИМГиГ зон ВОЗ для Северного и Центрального Сахалина, которая использовалась для расчетов сейсмической опасности [5].

Цифрами обозначены площадные зоны D1–D10 с различной повторяемостью землетрясений и выделенные внутри них линейные зоны ВОЗ.

основном в пределах упомянутой выше зоны главных активных разломов, выделяемой в пределах площадной зоны D1. А эпицентры землетрясений, зарегистрированных с 2006 по 2015 гг. сетью высокочувствительных сейсмических станций, расположились существенно восточнее оси Восточно-Одоптинской антиклинальной зоны, а в центральной и особенно северной ее частях они сместились на восток на 30 и более км (рис. 1).

Сколько-нибудь значительных и достоверно установленных активных разломов на северо-восточном шельфе о. Сахалин к настоящему моменту не выявлено. По совокупности имеющихся геолого-геофизических и сейсмологических данных здесь

выделено 3 сейсмолинеамента. Главный сейсмолинеament L3 с $M_{max} = 6.5$ отвечает зоне протяженного Восточно-Сахалинского разлома, наиболее крупного тектонического нарушения, выделяемого в пределах северо-восточного шельфа [9]. Два других сейсмолинеамента с $M_{max} = 6.0$ соответствуют менее крупным тектоническим нарушениям: Западно-Охотскому разлому, разделяющему структуры сахалинского шельфа и глубоководной впадины Дерюгина, для которой в кайнозойское время были характерны интенсивные прогибания и рифтогенные процессы [9]; возможному продолжению на юго-восток зоны активных разломов п-ова Шмидта (Западно-Одоптинский разлом, по В.В. Харахинову, изображенный на рис. 1). В настоящий момент данная структура сейсмически менее активна, чем Восточно-Сахалинский разлом. Это подтверждает общая картина пространственного распределения современной сейсмичности на севере острова: магнитуда немногочисленных землетрясений, зарегистрированных в этой зоне в 2006–2015 гг., составила $M \sim 2.0–3.0$.

На рис. 1 представлена схема месторождений нефти и газа на севере острова, которые уже сейчас находятся в стадии промышленной эксплуатации. Еще несколько крупных месторождений, которые, по всей видимости, будут разрабатываться в будущем, примыкают с запада к отмеченному на рис. 1 разлому.

Таким образом, рассматриваемый сейсмолинеament площадной зоны D3 представляет наибольшую опасность в связи с возможностью возникновения триггерных подвижек, вызванных воздействием на геосреду. В табл. 1 приведена информация о максимальной магнитуде землетрясений для рассматриваемого сейсмолинеамента и дана оценка периода повторяемости землетрясений, согласно ранее проведенным комплексным изысканиям [5]. Выбор максимальной магнитуды $M_w = 6.5$ для исследуемой зоны разломов соответствует консервативным оценкам, если учесть, что максимальная зарегистрированная магнитуда составила $M_w = 5.6$ [4]. Однако необходимо учитывать, что точность определения моментной магнитуды составляет 0.2 единицы (это видно из обзора, представленного в [4]). Кроме того, сейсмологическая практика оценки максимальной магнитуды основывается на корректировке максимальной зарегистрированной магнитуды плюс 0.5 единицы.

Оценим скорости накопления тектонических напряжений $\dot{\tau}_i$. За сейсмический цикл происходит накопление напряжений в очаговой зоне будущего сильного землетрясения, размер которого определяется его максимальной магнитудой, а далее происходит сброс накопленного напряжения и залечивание (афтершоковый процесс). Согласно последним исследованиям [8],

Таблица 1. Основные сейсмологические и геодезические данные для оценки скорости накопления тектонических напряжений.

Магнитуда M_w	Длина разлома L (км)	Период повторяемости T (лет)	Сброшенные напряжения сахалинских землетрясений $\Delta\sigma$ (МПа)	Скорость межплито- вого скольжения v_l (мм/год)	Модуль сдвига μ (Па)
6.5	30	600	1.7–4.5	1–7	$5 \cdot 10^{10}$
Скорость накопления тектонических напряжений $\dot{\tau}_l = \frac{\Delta\sigma}{T}$ (МПа/год)	0.0028–0.0075		Скорость накопления тектонических напряжений $\dot{\tau}_l = \frac{\mu}{L} v_l$ (МПа/год)	0.0017–0.012	

сброшенные напряжения сахалинских землетрясений $\Delta\sigma$ характеризуются величиной 1.7–4.5 МПа. Период повторяемости T землетрясений с максимальной магнитудой $M_w \sim 6.5$ на сейсмолинеamente площадной зоны D3 оценивается в 600 лет. Тогда скорость накопления тектонических напряжений $\dot{\tau}_l = \frac{\Delta\sigma}{T}$ лежит в пределах от 0.0028 до 0.0075 МПа/год.

С другой стороны, согласно современным представлениям, скорость накопления тектонических напряжений пропорциональна скорости скольжения берегов разлома и задается соотношением $\dot{\tau}_l = \frac{\mu}{L} v_l$ [20], где L – длина разлома, v_l – скорость межплитового скольжения. По данным спутниковых геодезических наблюдений для сахалинского региона величина v_l лежит в диапазоне 1–7 мм/год [2]. Очаги сахалинских землетрясений локализуются в интервале глубин 5–15 км, где, по-видимому, и происходит накопление упругих деформаций, обусловленных общим региональным сжатием зоны разломов. Модуль сдвига μ для соответствующей части коры составляет порядка $5 \cdot 10^{10}$ Па. Размер длины разлома, на котором происходит накопление и разрядка упругой деформации, оценивался, используя эмпирическое соотношение [28], связывающее магнитуду землетрясения M_w с характерным размером сейсмодислокации L для произвольного типа подвижки в очаге: $M_w = 4.38 + 1.49 \lg L$. Для землетрясения с магнитудой $M_w \sim 6.5$ длина разлома составила 30 км. Таким образом, $\dot{\tau}_l$ лежит в диапазоне 0.0017–0.012 МПа/год, что близко к независимым оценкам по сейсмологическим данным. Примем для дальнейших расчетов среднее значение $\dot{\tau}_l = 0.006$ МПа/год.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Моделируемый регион представлен как непрерывная (сплошная) среда, состоящая из двух областей, в одной из которых расположена нагнетательная скважина и во второй – присоединенный по разлому

однородный по физическим свойствам блок (рис. 3). По глубине первая область разделена на три слоя и имеет размеры $20 \times 30 \times 10$ км³. Верхний слой области мощностью 1500 м почти непроницаемый. Средний слой, в пределах которого производится закачка флюида, – высокопроницаемый слой с переменным коэффициентом пьезопроводности – имеет мощность 750 м. Нижний – слабопроницаемый слой распространяется до нижней границы модели. Вторая область за зоной разлома имеет соответственно размеры $5 \times 30 \times 10$ км³ и является слабопроницаемой. Начало координат расположено на пересечении верхней поверхности с вертикальной осью нагнетательной скважины. Ось Z направлена вертикально вверх, ось X – перпендикулярно плоскости разлома.

Физические параметры для рассматриваемой области в зависимости от глубины представлены в табл. 2.

Коэффициент Скемптона B , отношение Пуассона в недриенированных и дренированных условиях ν_u, ν равны 0.6, 0.33 и 0.2, соответственно, и используются во всей модели. Также предполагается, что плотность среды составляет 2300 кг/м³ и величина модуля сдвига за зоной разлома равна $5.5 \cdot 10^9$ Па.

Для простоты предполагается, что закачивание воды выполняется одной скважиной. Источник флюидов моделируется цилиндром высотой 35 м и диаметром 0.18 м. Закачивание воды в недра зависит от времени, график этой зависимости представлен на рис. 4.

В силу того, что расчетная область имеет достаточно простую форму, а слоистая структура моделируемого грунта описывается распределением упругих и

Таблица 2. Распределение по глубине коэффициента пьезопроводности и модуля сдвига.

Глубина, м	c , м ² /с	μ , Па
0–1500	10^{-4}	$5.33 \cdot 10^9$
500–1770	0.2	$5.43 \cdot 10^9$
1770–2050	0.6	$5.58 \cdot 10^9$
2050–2250	0.2	$5.6 \cdot 10^9$
2250–10000	10^{-3}	$5 \cdot 10^{10}$

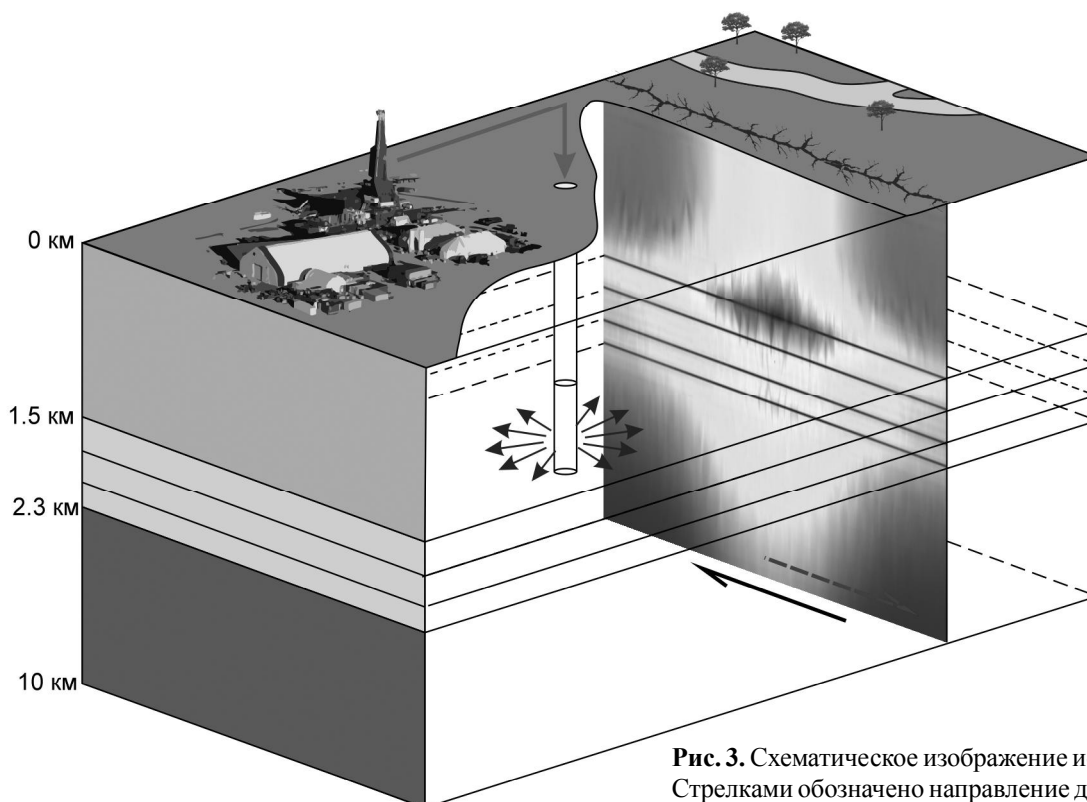


Рис. 3. Схематическое изображение исследуемой области. Стрелками обозначено направление движения по разлому.

вязких параметров, для решения задачи моделирования напряженного состояния геосреды и оценки влияния закачки флюидов в пласт на сейсмичность целесообразно применять метод конечных объемов. При использовании этого метода сама область остается неподвижной (хотя метод легко допускает построение динамической пространственной сетки), а все искомые параметры описываются как динамические поля, будь то вектор смещения или тензор напряжений. Точ-

но так же распределением в виде поля, в ячейках расчетной сетки, могут быть описаны поровое давление и величины, являющиеся определяющими для того или иного критерия разрушения сплошной породы.

Одним из наиболее развитых пакетов численного решения задач теории поля является свободно распространяемая библиотека – OpenFOAM (Open-source Field Operation and Manipulation) [18]. В состав этой библиотеки входит большое число функций, направленных на решение той или иной задачи из динамики сплошной среды. Но главным ее достоинством, в отличие от многих коммерческих продуктов, таких как ANSYS или COMSOL, является возможность построения собственных функций (как в среде Linux, так и в среде Windows) для решения узкоспециализированных задач геофизики.

OpenFOAM широко применяется в задачах динамики жидкости и газа [15], а в последнее время находит практическое применение в задачах расчета напряжений и разрушения в геосреде [14].

Построение модуля расчета напряжений (smod) базируется на стандартном решателе из пакета OpenFOAM для упругой деформации изотропного тела – solidDisplacementFoam. К его коду была добавлена процедура дискретизации и решения уравнения Дарси с соответствующими граничными и начальными условиями, согласно современной интерпретации

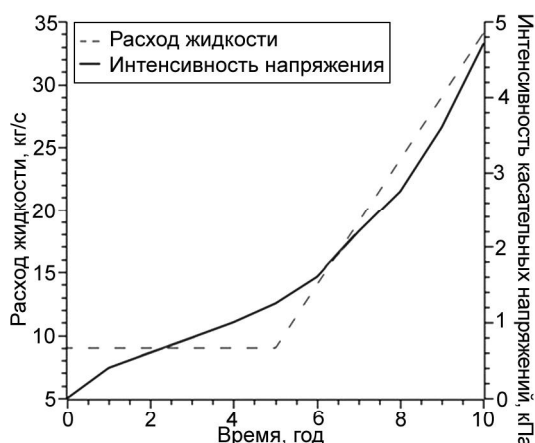


Рис. 4. График планируемой закачки воды и интенсивности максимальных касательных напряжений, возникающих вдоль линии разлома на глубине 5 км в зависимости от времени.

модели флюидонасыщенной геосреды, сформулированной в работах [16, 22–24, 27].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для описанной нами выше области, схематически представленной на рис. 3, в зависимости от планируемой закачки флюида (рис. 4), произведены численные расчеты избыточных касательных напряжений, возникающих в результате техногенного воздействия на среду в течение 10 лет. Под величиной избыточного касательного напряжения принята такая скалярная мера, как интенсивность касательных напряжений по Мизесу. На рис. 5 представлены интенсивности касательных напряжений, возникающих на глубине 5 км вдоль плоскости разлома длиной 30 км на расстоянии 10 км от скважины. Из результатов численного моделирования следует, что избыточные касательные напряжения достигают максимальных значений в центре и плавно спадают к краям исследуемой области в течение всего исследуемого временного периода (рис. 5). Так, на рис. 4 представлена зависимость максимальных значений избыточных касательных напряжений, возникающих на глубине 5 км, от времени разработки месторождения. Отметим, что значения максимальных величин избыточного касательного напряжения монотонно возрастают на протяжении всего периода разработки месторождения и достигают своего максимального значения $4 \cdot 10^{-3}$ МПа на 10-ом году даже при равномерной закачке флюида в течение 5 лет.

Используя полученные результаты численного моделирования, произведена оценка средней величины скорости накопления избыточных касательных напряжений $\dot{\tau}_{tr}$, вызванных закачкой жидкости. Оценивалось среднее напряжение по длине разлома (30 км). Используемая нами модель дает следующие оценки средней величины скорости накопления избыточных

касательных напряжений $\dot{\tau}_{tr} = \frac{\Delta \tau_{tr}}{T} = 3.04 \cdot 10^{-4} \frac{\text{МПа}}{\text{год}}$.

Применяя формулу (10) для прогноза наведенной сейсмической активности за соответствующий период времени эксплуатации месторождения, получим следующий результат $\frac{R}{r} = (1 + \frac{\dot{\tau}_{tr}}{\dot{\tau}_l}) = 1.05$. Таким образом,

величина наведенной сейсмической активности за 10 лет эксплуатации месторождения увеличивается на 5 %, другими словами, период повторяемости землетрясений максимальной магнитуды на рассматриваемом разломе уменьшится на 5 %. Однако следует отметить, что реальный срок промышленной эксплуатации месторождений составляет порядка нескольких десятков лет. Кроме того, на каждом месторождении, помимо закачки жидкости, ведется непрерывный от-

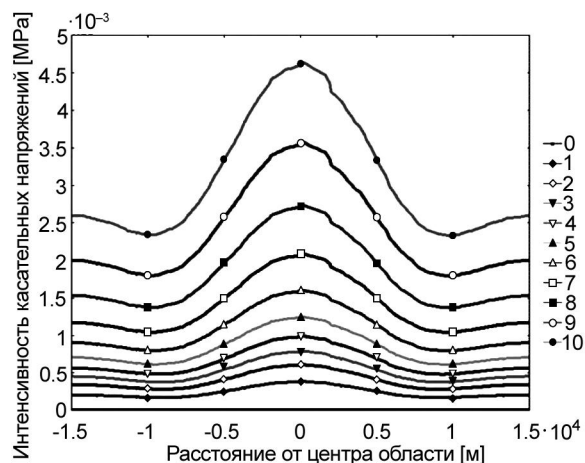


Рис. 5. Зависимость интенсивности касательных напряжений, возникающих в результате закачки жидкости в геосреду, вдоль линии разлома на глубине 5 км.

Каждая линия на графике имеет свой маркер и номер, который соответствует времени, измеряемому годом, прошедшим от начала закачки.

бор нефтепродуктов. Число скважин на одном месторождении может достигать 10. Рассматривая карту шельфовых месторождений на севере о. Сахалин, можно отметить их близость к активным разломам. Поэтому следует ожидать, что наведенный (триггерный) эффект может привести к гораздо большему увеличению сейсмической активности, в том числе и землетрясений максимальной магнитуды.

Вместе с тем, после выработки месторождения следует релаксация избыточных напряжений до фоновых тектонических значений. Применяя формулу (10) для оценки изменения сейсмической активности, мы предполагаем, что темп накопления избыточных напряжений будет постоянен в течение всего сейсмического цикла. Однако такой цикл оценивается продолжительностью в 600 лет. То есть в первые 10 лет после начала промысла на месторождении следовало бы изменение сейсмической активности согласно полученной оценке. Однако оставшиеся 590 лет сейсмическая активность будет определяться только тектоническими (природными) факторами. Но, с другой стороны, мы не знаем, когда в последний раз произошло землетрясение с максимальной магнитудой, тем более на шельфе острова. По крайней мере есть данные не более, чем за прошедшие 100 лет. Исходя из этого для сейсмического районирования используется методология вероятностного анализа сейсмической опасности. Поэтому полученные расчеты для реальных условий (темпов закачки/извлечения, количество скважин и т.д.), могут быть использованы как экспертные (в определенном смысле консерватив-

ные) оценки частоты возникновения землетрясений в методологии вероятностного анализа сейсмической опасности.

Обсуждая дальнейшее развитие и применение метода моделирования следует обратить внимание на то, что для построения региональной модели сейсмичности необходимо использовать критерии хрупкого разрушения. В общем случае геосреда может характеризоваться параметром поврежденности, который для идеально упругой среды будет равен нулю, а в предельном состоянии трещиноватости перед хрупким разрушением будет стремиться к единице. В [10–12, 19] получены уравнения для эволюции параметра поврежденности, при этом показано, что эволюцию поврежденности можно выразить через критическую деформацию, разделяющую хрупкое разрушение и залечивание геосреды, и безразмерный коэффициент скорости эволюции.

В работе [25] выполнялось моделирование, как в настоящей работе, используя критерий разрушения на основе модели трения, зависящего от скорости и состояния скольжения на разломе [17]. Показано, что во время закачки жидкости пороупругое сцепление может увеличить или уменьшить сейсмическую активность в зависимости от ориентации плоскости разлома по отношению к источнику закачки. Если избыточное напряжение, вызванное закачкой, препятствует скольжению, то внезапное прекращение закачки может привести к ускоренному росту сейсмической активности; более плавное прекращение закачки смягчает этот эффект. События с максимальной магнитудой наблюдались только после прекращения закачки.

Исходя из вышесказанного, на сейсмический режим существенное влияние может оказывать движение жидкости, в том числе и техногенной природы. Основная проблема состоит в оценке нелинейного влияния перемещения закачиваемой жидкости на поведение геосреды в окрестностях добывающих и нагнетающих скважин и возможных активных разломов. Не менее важной задачей является оценка сейсмогеологических параметров разлома.

Решение этой проблемы видится, с одной стороны, в получении эмпирических данных по наведенной и естественной сейсмичности путем развития системы мониторинга в зонах промышленной разработки месторождения углеводородов; с другой – в моделировании сейсмодеформационного процесса на основе представлений о пороупругой модели среды с учетом эволюции параметра поврежденности и заданных критериев разрушения (известных из механики разрушения).

ВЫВОДЫ

Разработанный нами программный модуль на базе пакета OpenFOAM предназначен для моделирования триггерного сейсмического и геодеоформационного процессов при перемещении флюида в геосреде. В расчетах напряженно-деформированного состояния геосреды используется модифицированная модель М. Био, которая учитывает скорость изменения объемной деформации в уравнении Дарси. Геодеоформационные эффекты оцениваются путем прямого расчета смещений на свободной поверхности вблизи источников закачки или отбора жидкости, что может привести, в частности, к опасному проседанию поверхности. Сейсмические эффекты оцениваются путем расчета максимальных касательных напряжений в пространстве на глубине сейсмогенного слоя (5–15 км) с учетом соотношений, связывающих историческую сейсмичность и скорость накопления касательных напряжений. Оценка медленных деформаций, связанных с проседанием свободной поверхности, не рассматривалась в настоящей работе, однако ее можно использовать для прогноза опасных смещений в сравнении с проектными значениями.

Решение, полученное с помощью разработанного модуля, сравнивалось с решением в демоверсии COMSOL для рассматриваемой нами области с теми же параметрами. Были получены численно согласующиеся результаты для избыточных касательных напряжений, возникающих в результате техногенного воздействия на среду в течение 10 лет. Для десятилетней непрерывной закачки жидкости скорость накопления избыточных касательных напряжений не превосходит скорость накопления естественных тектонических напряжений. Сейсмичность, вызванная возникновением избыточных напряжений, изменится в рамках модели не более, чем на 5 %. Для реальных условий этот показатель может возрасти, в связи с чем необходимо учитывать полученные экспертные оценки на стадии проектирования и проведения инженерно-геологических изысканий.

Сейсмологические наблюдения показали, что выбор максимальной магнитуды $M_w=6.5$ в шельфовой зоне разломов, прилегающей к месторождениям, для целей сейсмического районирования является обоснованным.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы Минобрнауки России «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEF160714X0105).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
2. Василенко Н.Ф., Прытков А.С. Моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS наблюдений // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 42–28.
3. Ким Чун Ун, Бондаренко Г.А. Оценка предельной магнитуды землетрясений северо-востока Сахалина // Сейсмическое районирование шельфа. Владивосток, 1990. С. 117–129.
4. Коновалов А.В., Патрикеев В.Н., Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Семенова Е.П., Степнов А.А. Пильтунское землетрясение 12 июня 2005 г. ($M_w = 5.6$) и современная сейсмичность в районе нефтегазовых месторождений северо-восточного шельфа о. Сахалин // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 1. С. 61–71.
5. Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 5. С. 93–103.
6. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 / Отв. ред. Л.Н. Поплавская. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
7. Степнов А.А., Гаврилов А.В., Коновалов А.В. и др. Новая архитектура автоматизированной системы сбора, хранения и обработки сейсмологических данных // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С. 27–38.
8. Сычёв А.С., Коновалов А.В. Сброшенные напряжения афтершоковых последовательностей землетрясений Южного Сахалина // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г. / Сборник материалов. В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 1. С. 188–192.
9. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Науч. мир, 2010. 276 с.
10. Ben-Zion Y. Key formulas in earthquake seismology // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. P. B / Ed. by W. H. K. Lee et al.; appendix 2. 2003. P. 1857–1875, Amsterdam: Academic.
11. Ben-Zion Y., Sammis C.G. Characterization of fault zones // Pure Appl. Geophys. 2003. V. 160, N 3–4. P. 677–715.
12. Ben-Zion Y. Collective behavior of earthquakes and faults: continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes // Rev. Geophys. 2008. V. 46, N 4. 70 p.
13. Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys. 1941. V. 12. P. 155–164.
14. Carrier B., Granet S. Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model // Engineering fracture mechanics. 2012. V. 79. P. 312–328.
15. Chen G., Xiong Q., Morris Ph.J. et al. OpenFOAM for computational fluid dynamics // Notices of the AMS. 2014. V. 61, N 4. P. 354–363.
16. Dieterich J.H. Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength // Tectonophysics. 1992. V. 211. P. 115–134.
17. Dieterich J.H. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N B2. P. 2601–2618.
18. Jasak H., Jemcov A., Tukovic Z. OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations // International workshop on coupled methods in numerical dynamics. 2007. V. 1000. P. 1–20.
19. Hamiel Y., Liu Y., Lyakhovsky V. et al. A visco-elastic damage model with applications to stable and unstable fracturing // Geophys. J. Int. 2004. V. 159, N 3. P. 1155–1165.
20. Helmstetter A., Shaw B.E. Afterslip and aftershocks in the rate- and state friction law // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. N B1.
21. Lapusta N., Rice J.R., Ben-Zion Y. et al. Elastodynamic analysis for slow tectonic loading with spontaneous rupture episodes on faults with rate- and state-dependent friction // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N 23. P. 765–789.
22. Rice J.R., Cleary M.P. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents // Rev. Geophys. Space Physics. 1976. V. 14. P. 227–241.
23. Segall P. Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicentral region of the 1983 Coalinga earthquake // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 6801–6816.
24. Segall P. Earthquakes triggered by fluid extraction // Geology. 1989. V. 17. P. 942–946.
25. Segall P., Lu S. Injection-induced seismicity: Poroelastic and earthquake nucleation effects // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2015. V. 120, N 7. P. 5082–5103.
26. Sumy D.F., Cochran E.S., Keranen K.M. et al. Observations of static Coulomb stress triggering of the November 2011 M 5.7 Oklahoma earthquake sequence // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2014. V. 119, N 3. P. 1904–1923.
27. Tang T., Hededal O., Cardiff P. On finite volume method implementation of poro-elasto-plasticity soil model // Intern. J. Numeric. Analytic. Methods in Geomechanics. 2015. V. 39, N 13. P. 1410–1430.
28. Wells D., Coppersmith K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // Bull. Seism. Soc. Am. 1994. V. 84, N 4. P. 974–1002.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

A.E. Zabolotin, A.V. Loskutov, A.V. Kononov, S.B. Turuntaev

The simulation of the triggered seismic and geodeformation process induced by fluid injection and extraction into geomedium

A module for simulation of seismic and deformation processes of geomedium during fluid injection and extraction is developed. The Biot consolidation theory's equations are used to describe stress state of geomedium with consideration to the volumetric strain rate according to the Darcy equation. The software implementation of the module is based on the OpenFOAM. This package is a collection of compiled modules and source codes, encapsulating all the most common physical objects of the computational continuum mechanics in full compliance with the principles of object-oriented programming. The code of the module is based on the standard solver of the OpenFOAM package for elastic deformation of isotropic solids. A discretization procedure of the solution of the equation of Darcy for pore pressure was added. Stress-strain effects are estimated by direct calculation of the displacement field near the fluid injection and extraction wells, which can lead, in particular, to a dangerous subsidence of the surface and the induced seismicity. Trigger seismic effects are estimated by calculating the accumulation rate of injection-induced shear stresses in the fault zone at depths of seismogenic layer (5-15 km) with correlation linking the historical seismicity and the accumulation rate of tectonic stress within the modified Dietrich rate and state model. We performed a seismic study of the potential maximum magnitude of induced earthquakes and their periods of recurrence in the area of industrial development of offshore oil and gas fields in the northeast of the Sakhalin Island, and also refined the model of activation of the seismic process as a result of anthropogenic impact on the geomedium.

Key words: simulation, seismic process, induced seismicity, oil and gas fields, software implementation, stress-strain state, geomechanics, geomedium, Sakhalin Island.