

Д.С. Грачев¹, В.А. Минаев², Н.Г. Топольский¹, А.О. Фаддеев³
(¹Академия ГПС МЧС России, ²МГТУ им. Н.Э. Баумана,
³Академия ФСИН РФ; e-mail: m1va@yandex.ru)

ОЦЕНКА ОПАСНЫХ ЭНДОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ

Анализируется проблема оценки опасных эндогенных геологических процессов на территориях нефтегазодобычи. Показана практическая значимость предложенных моделей для оценки геодинамической устойчивости платформенных и сейсмоактивных регионов, где осуществляется нефтегазодобыча и происходит строительство объектов нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: нефтегазовый комплекс, опасные эндогенные геологические процессы.

D.S. Grachev, V.A. Minaev, N.G. Topolsky, A.O. Faddeev
**ASSESSMENT OF DANGEROUS
ENDOGENOUS GEOLOGICAL PROCESSES
ON TERRITORIES OF OIL AND GAS PRODUCTION**

The dangerous endogenous geological processes assessment problem in oil and gas production areas was analyzed. A conclusion is made about the practical importance of proposed models for assessing the geodynamic stability of platform and seismically active regions where oil and gas production is carried out and construction of oil and gas industry facilities is taking place.

Key words: oil and gas industry, dangerous endogenous geological processes.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 1 ноября 2016 г.

Введение

Теме исследования опасных природных эндогенных геологических процессов, связанных с энергией, возникающей в недрах Земли, посвящено большое количество монографий, диссертаций, научных статей и других публикаций [1-5].

Тем не менее, до сих пор не найден ответ на самый злободневный вопрос – где и когда произойдёт следующее землетрясение или пробудится очередной вулкан? Всё это говорит о сложности решения этого глобального вопроса современности, в частности, применительно к задачам риск-менеджмента в сфере нефтегазового комплекса [6].

Но уже намечены контуры решения этой проблемы, разработаны математические модели и методы восстановления полей геодинамических напряжений и смещений, созданы технологии выявления потенциально опасных в сейсмическом отношении территорий как на платформах, так и в областях орогенов, решены многие другие важные задачи.

Всё это позволяет с определённой вероятностью указать место, где возможно возникновение сейсмического события. Когда же это произойдёт – ни одна существующая технология или методика до сих пор не могут дать однозначного ответа.

Между тем, в имеющейся литературе затрагивался вопрос о миграции сейсмодинамической энергии, разрабатывались модели, позволяющие строить траектории миграции этой энергии для небольших территорий. Однако вопросы оценки пространственно-динамических характеристик опасных эндогенных геологических процессов, с точки зрения их использования для построения траекторий миграции деформационной энергии, выделившейся в результате возникновения сейсмического или вулканического события, практически не затронуты в соответствующей литературе.

Кроме того, недостатком существующих моделей является использование в них осреднённых прочностных и вязких свойств геологической среды, а в большинстве своём в этих моделях геологическая среда вообще полагается исключительно упругой. Только совсем недавно появились попытки представления геологической среды сейсмически активных регионов с позиций нечёткого моделирования. Для платформенных областей такие модели на сегодняшний день отсутствуют, не имеется и соответствующего этим моделям программного обеспечения.

Таким образом, несмотря на уже имеющуюся проработку проблемы изучения пространственно-временных характеристик *опасных эндогенных геологических процессов (ОЭГЛП)*, такие задачи как выявление пространственной динамики ОЭГЛП в глобальном масштабе, для конкретных регионов, разработка методик построения траекторий миграции сейсмической энергии и многие другие связанные с ними задачи требуют своего скорейшего разрешения.

Рассмотрим современные математические модели оценки пространственно-динамических характеристик ОЭГЛП и вызываемых ими рисков для регионов различного геологического строения, подвергающихся воздействию этих процессов.

Комплекс математических моделей

Первая из созданных и рассматриваемых авторами моделей является двумерной, разработанной для платформенных территорий, в которой реализован новый подход к учёту граничных условий [7-9].

Дело в том, что выбор условий ограничен заданием четырёх уравнений. Связано это с тем, что в основе аналитического представления компонент тензора геодинамических напряжений и составляющих вектора смещений в модели лежит бигармоническая функция, содержащая четыре коэффициента. Вместе с тем, практика показывает, что для более адекватного описания геологической среды необходимо задание большего числа условий.

Новый подход состоит в том, что мы требуем одновременного выполнения не одного набора граничных условий, а сразу нескольких, с последующей интеграцией полученных решений.

В первой составной модели учтём влияние аномалий гравитационного поля и распределение плотности геологической среды, во второй составной модели учтём влияние на напряжённое состояние возмущений, возникающих на границе Мохо, обусловленных её рельефом, и в третьей составной модели отражён факт влияния на напряжённое состояние возмущений, определяемых неоднородностями кристаллического фундамента.

В представляемой комплексной модели использовалась информация по плотностным и прочностным свойствам геологической среды, известной вдоль геодезического профиля Белозерск – Семёнов. Рассмотрим результаты, полученные в ходе количественной реализации этой модели (рис. 1, 2).

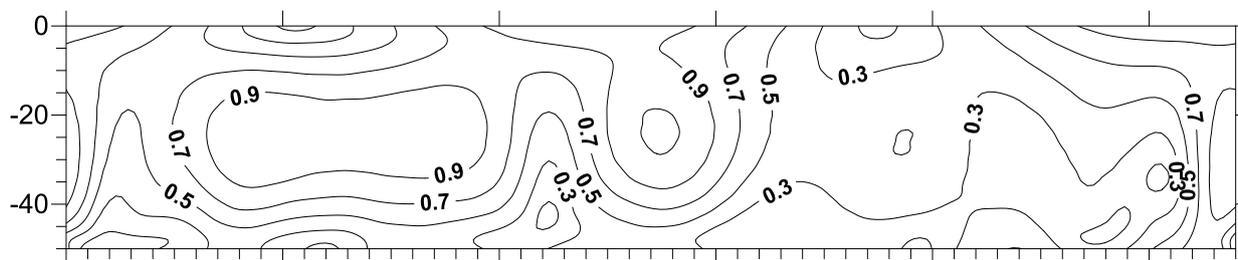


Рис. 1. Распределение сдвиговых напряжений (в МПа) вдоль профиля Белозерск – Семёнов, рассчитанные с учётом аномального гравитационного поля (традиционная модель)

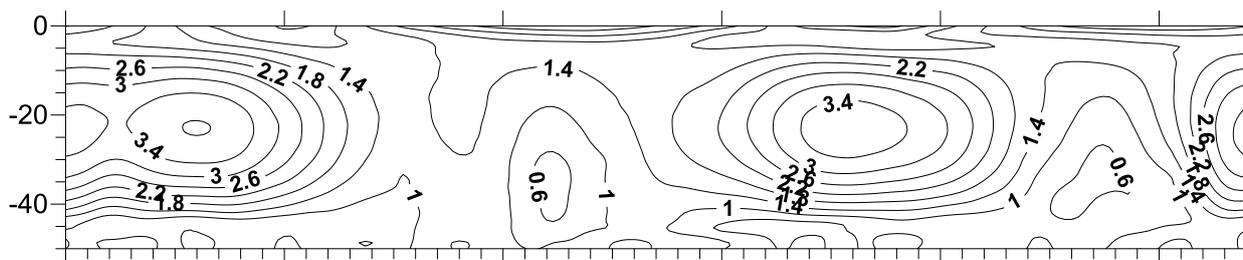


Рис. 2. Распределение сдвиговых напряжений (в МПа) вдоль профиля Белозерск – Семёнов, рассчитанные по комплексной модели

Распределения сдвиговых напряжений для традиционной и комплексной моделей существенно отличаются друг от друга не только по своей структуре, но и по значениям. Для комплексной модели ярко выражены два максимума напряжений: в начале профиля в интервале отметок "0" – "100" и в интервале отметок "300" – "400", что хорошо согласуется с реальными данными по проявлениям опасных геологических процессов в этих районах, особенно во втором случае ("300" – "400"), где профиль пересекает Горьковское водохранилище.

Таким образом, новая модель, конструируемая на основе системы граничных условий, позволяет получить более достоверные оценки и распределения напряжений и смещений, что имеет большое прогнозное значение при разработке различных проектов по нефтегазодобыче, строительных и иных проектов. Кроме того, учёт вариаций упругих модулей в глубинном и латеральном направлениях даёт возможность выявлять и исследовать особенности тектонических процессов, протекающих в земной коре платформенных территорий.

Вторая обоснованная и разработанная авторами модель представляет собой трёхмерную комплексную математическую модель оценки риска проявления опасных эндогенных геологических процессов [7-9].

Предлагаемая модель существенным образом отличается от предыдущей, поскольку в случае трёхмерной модели расчёт напряжений и смещений выполняется для элементарных объёмов (54 км^3), на которые разбит весь объём геологической среды, соответствующий рассматриваемому ограниченному участку территории.

Кроме того, имеются различия и в граничных условиях этих моделей. Так, в случае двумерной модели учитываются аномалии гравитационного поля, рельеф поверхности Мохо и рельеф поверхности кристаллического фундамента. В трёхмерной же модели мы используем аномальное гравитационное поле и рельеф поверхности Мохо. Вклад возмущений от кристаллического фундамента в общее напряжённое состояние геологической среды для обширных территорий полагается достаточно малым.

Также в двумерной модели учитываются латеральное и глубинное изменения модулей упругости, в трёхмерной модели эти величины имеют одинаковое осреднённое значение для каждого элементарного объёма геологической среды.

Поскольку трёхмерная математическая модель также является комплексной, рассмотрена совокупность граничных условий, принадлежащих соответствующим составным моделям.

В первой составной модели учтено влияние на напряжённое состояние геологического слоя возмущений, возникающих на границе Мохо, определяемых отклонениями этой границы от осреднённой глубины её залегания, во второй составной модели учтено влияние аномалий гравитационного поля в изостатической редукции. В качестве соотношений для компонент тензора напряжений и составляющих вектора смещений в среде использовались следующие известные их выражения для трёхмерного случая.

Анализ эквипотенциального распределения сдвиговых напряжений в литосфере для центральной части **Восточно-Европейской платформы (ВЕП)**, рассчитанного по модели с учётом только влияний аномального гравитационного поля, показал, что 13 эпицентров землетрясений из 20, произошедших здесь за последние 100 лет, попадают на участки, оконтуренные изолиниями с повышенными значениями сдвиговых напряжений (более $0,3 \text{ МПа}$). Это говорит о том, что достоверность математической модели, учитывающей только аномалии гравитационного поля для ограниченных платформенных территорий типа центральной части ВЕП, составляет $13:20 = 0,65$.

Совсем другая картина наблюдается, если обратиться к рис. 3, на котором приведены результаты расчётов по модели, учитывающей не только аномальное гравитационное поле, но и возмущения на границе Мохо.

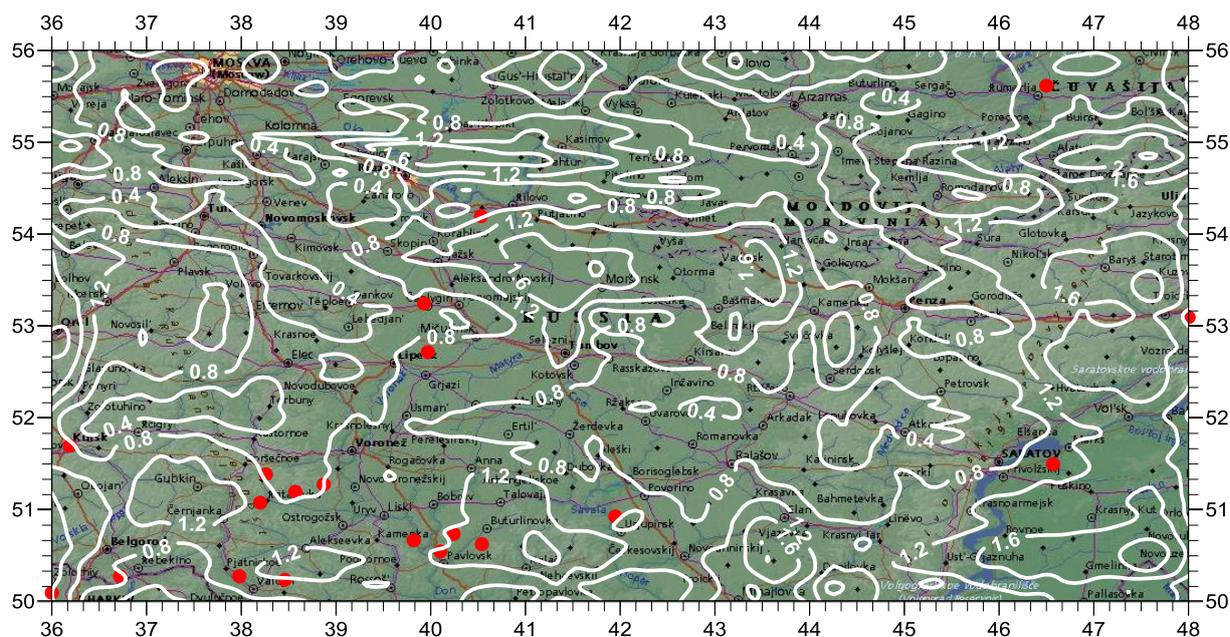


Рис. 3. Эквипотенциальное распределение сдвиговых напряжений (в МПа) в литосфере центральной части ВЕП, рассчитанное по модели с учётом аномалий гравитационного поля в изостатической редукции и возмущений на границе Мохо. Сечение изолиний 0,4 МПа

В этом случае достоверность модели составляет $18:20 = 0,9$, поскольку 18 эпицентров землетрясений из 20 попали на участки повышенных значений сдвиговых напряжений. То есть трёхмерная математическая модель позволяет повысить достоверность оценок риска проявления опасных эндогенных геологических процессов на ограниченных участках платформенных территорий с 0,65 до 0,9.

Рассмотренные нами детерминированные математические модели являются эффективными в том случае, когда имеется достаточно подробная и достоверная информация о характеристиках геологической среды. А если такой исчерпывающей информации нет?

Третья модель, предложенная авторами, как раз и позволяет провести оценку состояния геологической среды в условиях неопределённости, основываясь на нечетких моделях, построенных на базе прямого нечеткого вывода [7-9].

Эмпирические знания о рассматриваемой проблемной области (по устойчивости геологической среды ограниченных участков платформенных территорий) представляются в форме 60-ти эвристических правил для каждого элементарного объёма геологической среды рассматриваемой территории.

При формировании базы правил прямого нечёткого вывода для платформенных территорий входные лингвистические переменные целесообразно определять на основе градиентов аномального гравитационного поля в изостатической редукции, особенностей строения земной коры, проявляющихся в совместном учёте скоростей вертикальных движений, а также информации о трещиноватости геологической среды, получаемой на основании экспертных оценок по данным геоморфоструктурного районирования территории.

В качестве первой входной лингвистической переменной использовалась величина градиента аномального гравитационного поля – "градиентность гравитационного поля"; в качестве второй – "скорость вертикальных движений"; в качестве третьей – степень нарушенности сплошности геологической среды – "трещиноватость геосреды". В качестве выходной лингвистической переменной используется характеристика устойчивости геологической среды – "состояние геосреды".

Для количественной реализации модели нечеткой оценки риска проявления опасных эндогенных геологических процессов на платформенных территориях использовался алгоритм Мамдани.

Рассмотрим результаты, полученные при реализации этой модели.

На участки территории с экстремальными значениями состояния геологической среды, то есть от 0,7 и более попадают 13 из 20 эпицентров произошедших землетрясений, на участки со среднеэкстремальными значениями от 0,6 и выше – 17 из 20 эпицентров. Для платформенных территорий (особенно для ограниченных участков) такие показатели являются очень высокими, знание такой ситуации позволяет заблаговременно выполнять "локально-площадные" оценки геодинамического риска для территорий, что даёт возможность произвести прогнозную оценку успешности проектов по нефтегазодобыче, строительных и иных проектов по освоению территории.

И что важно, при этом не приходится прибегать к различным предположениям, допущениям, столь свойственным предложенным другими авторами детерминированным и вероятностным моделям.

Четвёртая математическая модель является моделью оценки пространственно-динамических характеристик опасных эндогенных геологических процессов, необходимых для решения задачи построения траектории миграции энергии этих процессов [10].

Граничные условия этой модели следующие.

К нижней границе модельного упруго-вязкого пространства приложена некоторая распределённая "нагрузка", определяемая посредством совместного учёта влияний со стороны аномалий гравитационного поля и рельефа границы Мохо. Эта "нагрузка" уравнивается вертикальными нормальными геодинамическими напряжениями и воздействием от вертикальных смещений, возникающими в упруго-вязком пространстве на границе раздела земная кора – литосферная мантия (на границе Мохо). На этой границе необходимо учесть скачок плотности, который имеет в среднем величину 260 кг/м^3 .

На верхней границе модельного пространства (на дневной поверхности Земли) все силовые (возмущающие) воздействия должны быть скомпенсированы. Поэтому вертикальные нормальные напряжения на дневной поверхности уравниваются воздействием от вертикальных смещений, которые фактически зависят от топографического рельефа поверхности Земли, включая горные области и океанические понижения с водными массами.

Математически граничные условия представляются системой из четырех уравнений. Первое уравнение системы – это условие о компенсации воздействий на верхней границе модели (дневной поверхности Земли). Второе уравнение – условие влияния возмущений от распределённой "нагрузки" на нижней границе модели (границе Мохо). Третье и четвертое уравнения отражают факт отсутствия вертикальных сдвиговых напряжений на верхней и нижней границах модельного пространства.

Отметим важнейшие отличительные особенности четвертой модели: 1) переменная толщина модельного пространства; 2) учёт рельефа поверхности Мохо; 3) пространственная вариативность упруго-вязких и плотностных характеристик земной коры; 4) учёт кривизны поверхности планеты.

Указанные отличительные особенности модели говорят о её новизне и большей приближённости к описанию реальных условий протекания опасных эндогенных геологических процессов, по сравнению с ранее разработанными.

Выводы

1. Теме исследования опасных природных эндогенных геологических процессов посвящено достаточно большое количество научных публикаций. Тем не менее, применительно к задачам риск-менеджмента в сфере нефтегазового комплекса ощущаются недостатки используемых математических моделей. В частности, это использование в них осреднённых прочностных и вязких свойств геологической среды, а в большинстве своём геологическая среда вообще полагается исключительно упругой. Не имеется и соответствующего современным моделям программного обеспечения.

2. Практическая значимость предложенных авторами моделей заключается в возможности их применения для:

- оценки геодинамической устойчивости платформенных и сейсмоактивных регионов, где осуществляется нефтегазодобыча и происходит строительство объектов нефтегазового комплекса;
- создания эффективных динамических моделей геологической среды территорий различного масштабного уровня для оценки страховых рисков в нефтегазовом комплексе;
- разработки оптимальной стратегии управления безопасным и устойчивым развитием территорий нефтегазодобычи, оценки, анализа и оптимизации размещения различных объектов, систем и транспортных коммуникаций нефтегазового комплекса.

3. Рассмотренные модели могут быть также использованы для информационной поддержки государственных и муниципальных органов управления при принятии решений в области хозяйственной и изыскательской деятельности, совершенствования геофизической и геоэкологической экспертиз различных хозяйственных программ, при разработке программ и планов развития территорий различной протяженности и геологического строения, для информационной поддержки оценки безопасности среды обитания, в том числе антитеррористической безопасности.

Литература

1. *Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Л., Молчан Г.М.* Сейсмический риск для крупнейших городов мира: предварительная оценка // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982. С. 82-98.

2. *Королев В.А.* Мониторинг геологической среды / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: МГУ, 1995. 272 с.

3. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, изд. дом "ИНФРА-М", 2009. 370 с.

4. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Моделирование геоэкологического риска // Спецтехника и связь. 2009. № 2. С. 24-30.

5. *Минаев В.А., Фаддеев А.О., Абрамова А.В., Павлова С.А.* Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.

6. *Кузьмин Ю.О.* Геодинамический риск объектов нефтегазового комплекса / Российская газовая Энциклопедия. М.: изд-во "Большая Российская Энциклопедия", 2004. С. 121-124.

7. *Минаев В.А., Фаддеев А.О., Бондарь К.М. и др.* Математическое моделирование геодинамических рисков: оценки и перспективы. Хабаровск: изд-во Дальневосточного юридического института МВД России, 2015. 212 с.

8. *Минаев В.А., Топольский Н.Г., Фаддеев А.О. и др.* Геодинамические риски и строительство. Математические модели: монография. М.: Академия ГПС, 2017. 298 с.

9. *Минаев В.А., Кузьменко Н.А., Фаддеев А.О.* Моделирование и оценка геодинамических рисков: монография. М.: изд-во "РТСофт" "Космоскоп", 2017. 356 с.

10. *Минаев В.А., Кузьменко Н.А., Фаддеев А.О.* 3-D моделирование миграции опасных эндогенных геологических процессов // Вестник РГРТУ. 2016. № 58. С. 64-74.