

УДК 550.34

## ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ШЕЛЬФОВЫХ ЗОН НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

© 2015 г. А. А. Крылов, А. И. Иващенко, С. А. Ковачев

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: artyomkrlyv@ocean.ru, aii\_imgg@mail.ru, kovachev@ocean.ru*

Поступила в редакцию 17.06.2015 г.

В данной работе производится оценка сейсмической опасности для районов нефтяных месторождений на Северном Каспии с помощью методики, хорошо зарекомендовавшей себя в работах, выполняемых Институтом океанологии РАН на различных акваториях. Для этой цели используются данные общего сейсмического районирования, доступные региональные базы данных о повторяемости сейсмических сотрясений, известные модели затухания движений грунта в сейсмически активных регионах, а также данные геологических и геофизических изысканий в исследуемом районе. Проведено уточнение исходной сейсмичности района посредством вероятностного анализа, дезагрегация, синтез акселерограмм, необходимых для проведения сейсмомикрорайонирования отдельных площадок с помощью численного нелинейного анализа сейсмического отклика грунтовой толщи. В результате получены амплитудные и спектральные характеристики движений грунта, необходимые для сейсмостойкого проектирования и строительства нефтегазовых объектов.

DOI: 10.7868/S0030157415060088

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и строительстве ответственных сооружений в сейсмоопасных районах необходимо выполнить оценку сейсмической опасности с учетом сеймотектонической обстановки в регионе и сейсмических свойств грунта в месте строительства. Актуальность этой задачи растет во многом благодаря развитию инфраструктуры, связанной с добычей и переработкой полезных ископаемых в шельфовых зонах.

Масштаб карт общего сейсмического районирования слишком мелок для учета местных особенностей, важных для оценки ожидаемых сейсмических воздействий на конкретной площадке строительства. Поэтому, как правило, на первом этапе проводится уточнение исходной сейсмичности района строительства (УИС), а затем выполняется сейсмическое микрорайонирование (СМР) площадки.

УИС может производиться детерминистскими и вероятностными методами. При детерминистском анализе сейсмической опасности (ДАСО) оценивается максимальный сейсмический эффект в интересующих точках от самых близких к ним зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). При вероятностном анализе (ВАСО) учитываются различные модели зон ВОЗ, кривые затухания сейсмического эффекта с расстоянием, повторяемость сейсмических сотрясений, различные неопределенности из-за случайного характера возникновения землетрясений и неточного знания некоторых параметров [4]. Большое распростра-

нение получили программные реализации ВАСО SEISRISK I, II, III [9, 10].

Однако ВАСО не позволяет генерировать временные зависимости движений грунта, для чего необходимо определить параметры землетрясения, соответствующего рассчитанному уровню сейсмического воздействия. Численное моделирование такого землетрясения (синтез акселерограммы) необходимо для инженерных расчетов при строительстве в сейсмоопасных районах. Определение магнитуды и эпицентрального расстояния выполняются с помощью процедуры “дезагрегации” результатов ВАСО [8, 12].

При оценке сейсмической опасности также необходимо оценивать влияние местных грунтовых условий на распространение сейсмических волн, что является задачей СМР.

В течение последних десятилетий широкое развитие получило создание вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, предназначенных для численного моделирования отклика грунтовой толщи. Они представляют собой реализации разных подходов к оценке влияния грунтовых условий: линейный анализ [6, 16], а также нелинейный анализ отклика [7, 13].

Наибольший интерес представляет реализация нелинейного анализа отклика грунтовой толщи [7]. Этот метод нашел применение во многих работах по сейсмическому микрорайонированию.

Целью настоящей работы является оценка сейсмической опасности районов морской неф-

тедобычи на примере месторождения им. Ю. Корчагина на севере Каспийского моря.

Для этого использовались алгоритмы и модифицированные авторами программные средства, хорошо зарекомендовавшие себя в работах, выполняемых Институтом океанологии РАН на различных акваториях.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Первым этапом оценки сейсмической опасности является уточнение исходной сейсмичности на основе вероятностного анализа. Исследуемой площадкой является место расположения морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) им. Ю. Корчагина.

Для практической реализации ВАСО использовалась программа SEISRISK III [10]. Данный алгоритм позволяет найти такие значения параметра движений грунта (ускорения, скорости или спектра) для каждой исследуемой точки, которые не будут превышать в заданный промежуток времени с заданной вероятностью. В качестве этого параметра мы использовали спектр реакции по ускорению грунта SA (затухание 5%) [14].

В методе используется распределение Пуассона, которое служит для определения вероятности того, что в течение заданного периода времени не произойдет ни одного события. В вычислениях принималось значение вероятности 90% и задавались интервалы времени 10, 20, 50, 100, 200, 500 и 1000 лет.

В алгоритме используются графики повторяемости для основных зон ВОЗ в регионе (рис. 1), а также таблицы затухания движений грунта, рассчитанные по NGA (New Generation Attenuation) моделям [5, 11].

В основе процедуры дезагрегации лежит алгоритм программы SEISRISK III, который был модифицирован в соответствии с работой [8]. Результатом дезагрегации являются зависимости условной вероятности  $P$  превышения расчетного значения SA от магнитуды  $M$  и расстояния  $R$  до источника. Использовались значения магнитуды  $M$  от 4.0 до 8.0 с шагом 0.5 и значения расстояния  $R$  от 0 до 1024 км с шагом 1 км.

Для расчета ансамбля наиболее вероятных акселерограмм на исследуемой площадке использовался метод, предложенный в работе [15]. Он позволяет синтезировать акселерограммы, зная лишь основные параметры землетрясения: магнитуду  $M$ , расстояние  $R$  до источника и тип грунта на площадке.

В настоящей работе используется алгоритм нелинейного анализа отклика грунта NERA [7], т.к. он позволяет найти временные зависимости ускорения, скорости и смещения частиц грунта в

разных точках грунтовой толщи при прохождении через нее сейсмических сигналов, а также спектры реакции и спектры Фурье.

Помимо входного сигнала (акселерограммы исходного воздействия) необходимо знать также свойства среды: мощности, плотности и скорости  $V_S$  для всех слоев грунта, тип материала среды (песчаный, глинистый, скальный и т.п.) и кривые изменения нормированного модуля сдвига  $G/G_{\max}$  в зависимости от относительной деформации  $\varepsilon$ , опубликованные для различных типов грунтов.

Грунтовые разрезы были получены на основе инженерно-геологических изысканий на месторождении и данных о скоростях поперечных волн, полученных по записям донных сейсмографов системы геодинамического мониторинга, установленной на МЛСП им. Ю. Корчагина [1, 2].

Для района месторождения им. Ю. Корчагина характерны два вида грунтового разреза (табл. 1): в районе установки ЛСП-1 (разрез № 1) и в районе мангышлакского вреза (древнее русло) на месторождении (разрез № 2).

Последний слой принят за базовый грунт второй категории по сейсмическим свойствам в соответствии со СНиП-7-81\* [3], к кровле которого прикладывалось исходное сейсмическое воздействие.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 изображена кривая спектра реакции по ускорению грунта для времени ожидания  $t = 500$  лет (что соответствует периоду повторяемости  $T_p = 5000$  лет) для характерных спектральных периодов (периоды  $T_c > 5$  с не представляют инженерного интереса). Согласно практике сейсмостойкого строительства в нашей стране и за рубежом, сейсмическая опасность, отвечающая повторяемости сотрясений 1 раз в 200–500 лет, соответствует так называемому проектному землетрясению (ПЗ). Сотрясения с повторяемостью 1 раз в 3000–5000 лет соответствуют максимальному расчетному землетрясению (МРЗ). В настоящей работе рассматривается верхний уровень сейсмической опасности с периодом повторяемости 5000 лет.

В результате дезагрегации результатов ВАСО выяснилось, что для спектральных периодов  $T_c = 0.01–0.5$  с основной вклад в расчетное значение спектра реакции на площадке расположения МЛСП дают землетрясения с магнитудами  $M = 4.0–5.0$ , возникающие на небольших расстояниях  $R = 0–20$  км от площадки. Это землетрясения, рассеянные по площади доменов D049 и D148 в модели зон ВОЗ (рис. 1).

На рис. 3 видно, что на спектральном периоде  $T_c = 0.5$  с вклад сильных удаленных землетрясе-

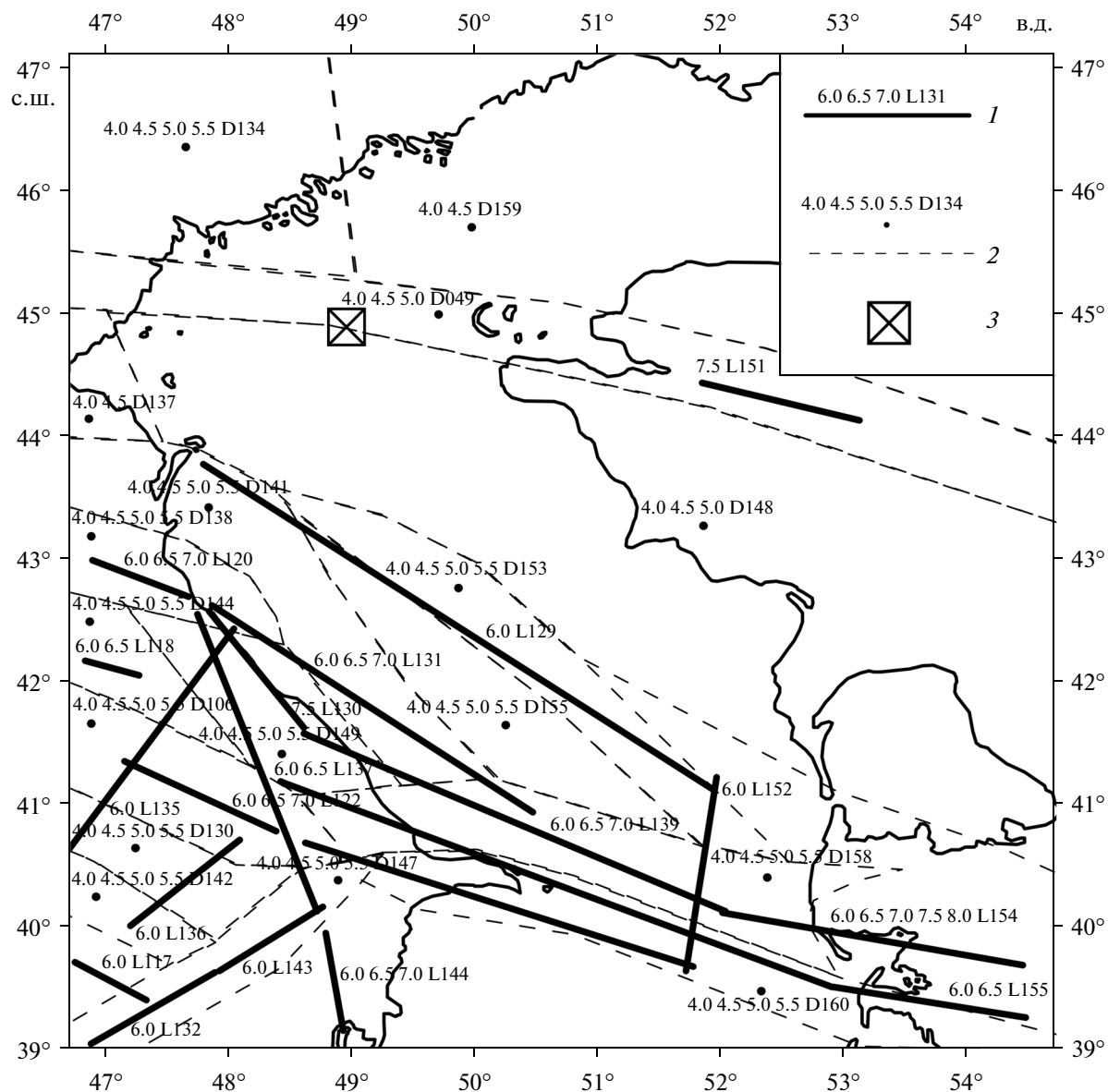


Рис. 1. Зоны ВОЗ для районов Северного и Среднего Каспия, согласно базе данных Уломова [17]: 1 – линеаменты (магнитуды, название); 2 – домены (магнитуда, название); 3 – МЛСП им. Ю. Корчагина.

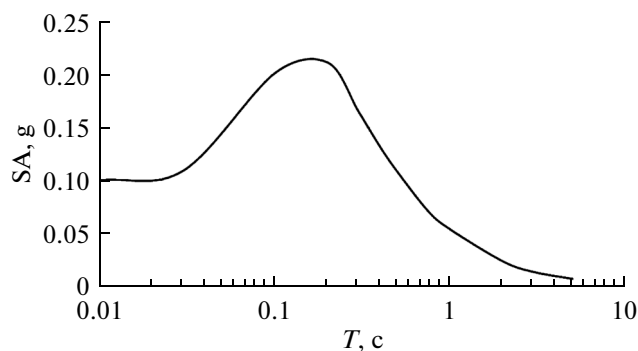


Рис. 2. Спектры реакции по ускорению грунта  $SA(T, 5\%)$  для периода повторяемости 5000 лет на площадке расположения МЛСП им. Ю. Корчагина.

ний ( $M = 7.5$ ;  $R = 225\text{--}250$  км, линеаменты L130 и L151 на рис. 1) в расчетное значение спектрального ускорения на площадке практически равняется вкладу близких землетрясений умеренной силы. С ростом периода спектра эта тенденция лишь усиливается, и на периодах  $T_c = 1\text{--}5$  с вклад сильных удаленных землетрясений в расчетное спектральное ускорение становится подавляющим по сравнению с вкладом близких землетрясений умеренной силы.

Следовательно, ожидаемые сейсмические воздействия в исследуемой точке могут возникать вследствие землетрясений двух типов:

Таблица 1. Инженерно-геологические разрезы в районе месторождения им. Ю. Корчагина

Разрез № 1					Разрез № 2				
№ слоя	наименование грунта	плотность, г/см <sup>3</sup>	скорость поперечной волны, м/с	мощность слоя, м	№ слоя	наименование грунта	плотность, г/см <sup>3</sup>	скорость поперечной волны, м/с	мощность слоя, м
					1	Песок гравелистый, насыщенный водой	1.97	280	0.6
1	Песок гравелистый, насыщенный водой	1.97	280	0.7	2	Ил глинистый	1.59	150	1.8
2	Песок пылеватый, насыщенный водой	1.94	300	1.5	3	Ил глинистый	1.69	160	4.5
3	Песок пылеватый, насыщенный водой	1.95	320	Базовый грунт	4	Песок пылеватый, насыщенный водой	1.95	320	Базовый грунт

а) землетрясений с магнитудами  $M = 4.0-5.0$ , возникающих на расстояниях  $R = 0-20$  км; вклад этих землетрясений является определяющим для расчетного спектра реакции SA в области периодов спектра  $T_c = 0.01-0.5$  с.

б) землетрясений с магнитудой  $M = 7.5$ , возникающих на расстояниях  $R = 225-250$  км; вклад этих землетрясений является определяющим для расчетного спектра реакции SA в области периодов спектра  $T_c > 0.5$  с.

В 2013 г. в ходе обработки материалов сейсмических наблюдений на геодинамическом полигоне месторождения им. Ю. Корчагина, выполненных Институтом океанологии РАН, было проведено УИС этого района с помощью детерминистских методов.

Анализ сейсмотектонических данных показал, что наиболее близкой и опасной в сейсмическом

отношении для МЛСП является зона ВОЗ, связанная с валом или кряжем Карпинского (западная часть домена D049 на рис. 1). Инструментально зарегистрированные сейсмические события в рассматриваемой зоне отсутствуют. Оценки максимальной магнитуды  $M_{max}$ , полученные разными способами на основе геолого-геофизических данных для зоны разлома Карпинского, оказались близкими ( $M_{max}=5.0-5.6$ ). Было выбрано наиболее вероятное значение  $M_{max} = 5.2$ . Ожидаемая глубина очага землетрясения в этой зоне составляет 10 км, эпицентрального расстояние до месторождения им. Ю. Корчагина – 10 км, а повторяемость землетрясений такой магнитуды – 1 раз в несколько тысяч лет.

Таким образом, вероятностным и детерминистским методами была примерно одинаково установлена характерная первая группа близких

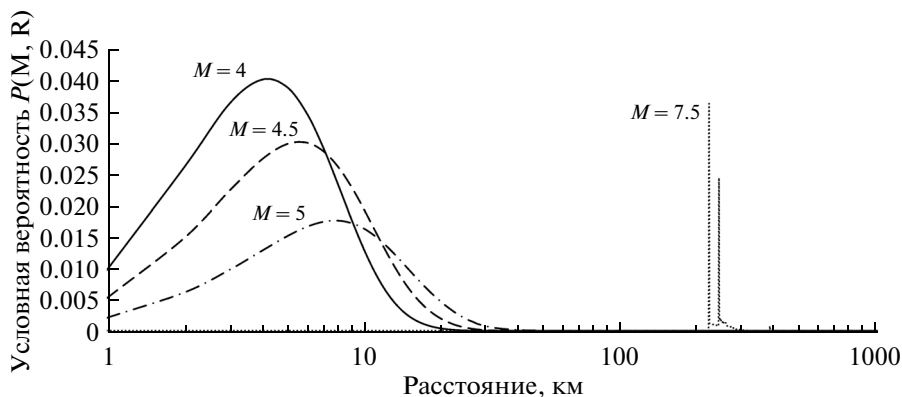
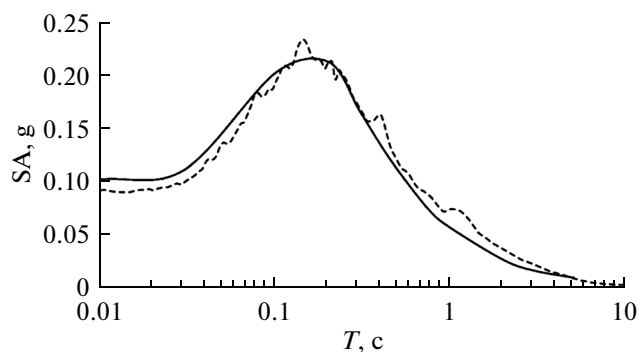


Рис. 3. Результаты дезагрегации расчетного спектра реакции SA на площадке МЛСП. Период повторяемости  $T_{п} = 5000$  лет, спектральный период  $T_c = 0.5$  с.



**Рис. 4.** Сравнение среднего спектра реакции по ускорению для ансамбля из 25 акселерограмм (пунктирная линия) и расчетного спектра реакции по результатам ВАСО (сплошная линия).

землетрясений умеренной силы, представляющих опасность для площадки МЛСП. Однако вторая группа землетрясений ( $M = 7.5$ ;  $R = 225$ – $250$  км) в результате ДАСО не была выделена. Судя по кривым затухания, макросейсмический эффект на площадке от этой группы землетрясений незначителен по сравнению с близкими землетрясениями. Однако, как следует из результатов ВАСО, они вносят заметный вклад в спектральное ускорение на периодах  $T_c > 0.5$  с.

Соотношения, предложенные в работе [15] для синтеза акселерограмм, справедливы только для диапазона магнитуд  $M_s$  от 4.6 до 6.8 и значений эпицентрального расстояния меньше 100 км. Нельзя смоделировать этим методом акселерограммы, характерные для второй группы землетрясений ( $M = 7.5$ ,  $R = 225$ – $250$  км), т.к. значения магнитуды и расстояния лежат вне диапазона применимости.

Чтобы учесть вторую группу землетрясений ( $M = 7.5$ ,  $R = 225$ – $250$  км) необходимо было, изменяя дополнительные входные параметры алгоритма (интенсивность по Ариасу, эффективную длительность наиболее интенсивных колебаний, центральную частоту спектра, эффективную логарифмическую ширину спектра), добиться того, чтобы ансамбль синтезированных акселерограмм давал спектр реакции как можно ближе к рассчитанному с помощью ВАСО во всем диапазоне периодов.

Все акселерограммы были отфильтрованы с помощью НЧ-фильтра с граничным периодом 5 с, т.е. из них удалены составляющие с периодами более 5 с; примерно таким же образом были отфильтрованы наблюдаемые акселерограммы в работе [15]; более длинные периоды не имеют большого инженерного интереса.

Единичная акселерограмма подвержена случайным флуктуациям, и ее спектр реакции может заметно отличаться от расчетного. Чтобы полу-

чить статистически достоверные оценки реакции грунтовой толщи, был рассчитан ансамбль из 25 акселерограмм, который дает средний спектр реакции, незначительно отличающийся от расчетного, и вместе с тем отдельные акселерограммы заметно различаются между собой по форме и, в меньшей степени, по уровню спектра реакции. Тем самым моделируется изменчивость реально наблюдаемых спектров реакции при статистически устойчивых средних значениях параметров колебаний.

На рис. 4 изображен средний спектр реакции для найденного ансамбля акселерограмм и, для сравнения, также приведен расчетный спектр по результатам ВАСО. Видно, что спектр ансамбля немного отличается от расчетного, в частности, наблюдается небольшое смещение вправо. Разница в уровнях для определенного значения периода лежит в пределах 10%. По абсолютным значениям в районе пика различий практически нет, поэтому можно считать такую степень точности приемлемой.

Используя синтезированные акселерограммы, нами было проведено численное моделирование прохождения SH-волны сквозь грунтовую толщу в исследуемом районе.

На рис. 5а видно, что для разреза в районе ЛСП-1 на месторождении им. Ю. Корчагина (разрез № 1) усиление колебаний по ускорению минимально на всех спектральных периодах. Аналогичная картина наблюдается и в спектрах реакции по скорости и смещению.

На рис. 5б изображены результаты расчетов влияния грунтовой толщи на параметры сейсмических воздействий в районе мангышлакского вреза (древнее русло) на месторождении им. Ю. Корчагина (разрез № 2).

В табл. 2 приведены некоторые полученные параметры сейсмических воздействий для обоих разрезов.

Из полученных результатов видно, что распространение сейсмической волны через разрез № 2 значительно отличается от такового для разреза № 1. Наблюдаемую разницу можно объяснить влиянием двух факторов:

1) в разрезе № 2 наблюдается значительное снижение средней сейсмической жесткости толщи близ поверхности по сравнению с основанием, в отличие от практически однородного разреза № 1. Это приводит к общему повышению уровня спектра реакции на поверхности разреза № 2 по отношению к основанию на периодах менее 0.5 с.

2) в разрезе № 2 также происходят значительное резонансное усиление сейсмических волн при их прохождении через толщу грунта.

**Таблица 2.** Параметры сейсмических воздействий в районе месторождения им. Ю. Корчагина

	Разрез № 1	Разрез № 2
Пиковое горизонтальное ускорение (PGA)	0.09g	0.12g
Интенсивность $I$ (шкала MSK-64)	6.9 балла	7.8 балла
Амплитуда спектра реакции по ускорению ( $SA_{max}$ )	0.22g	0.34g
Период $\tau$ ( $SA_{max}$ )	0.15 с	0.23 с
Амплитуда спектра реакции по скорости ( $SV_{max}$ )	12.4 см/с	15 см/с
Период $\tau$ ( $SV_{max}$ )	2.8 с	4 с
Максимальный коэффициент усиления $k_{max}(SA)$ относительно грунта II категории	1.1	3.18
Период $\tau$ ( $k_{max}$ )	0.04 с	0.23 с

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы было уточнение исходной сейсмичности районов нефтегазовых месторождений Северного Каспия на основе вероятностного анализа сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования с использованием модифицированных авторами программных средств.

Определены спектры реакции по ускорению и основные параметры характерных для исследуемого района землетрясений с учетом сейсмостек-

тонической обстановки региона Северного и Среднего Каспия. Результаты вероятностного анализа в целом соответствуют результатам, полученным ранее на основе детерминистского метода. Кроме того, ВАСО позволило выявить другую группу характерных для исследуемого района землетрясений (относительно удаленных) и построить расчетный спектр реакции по ускорению для исследуемой площадки, который в дальнейшем использовался для построения ансамбля искусственных акселерограмм.

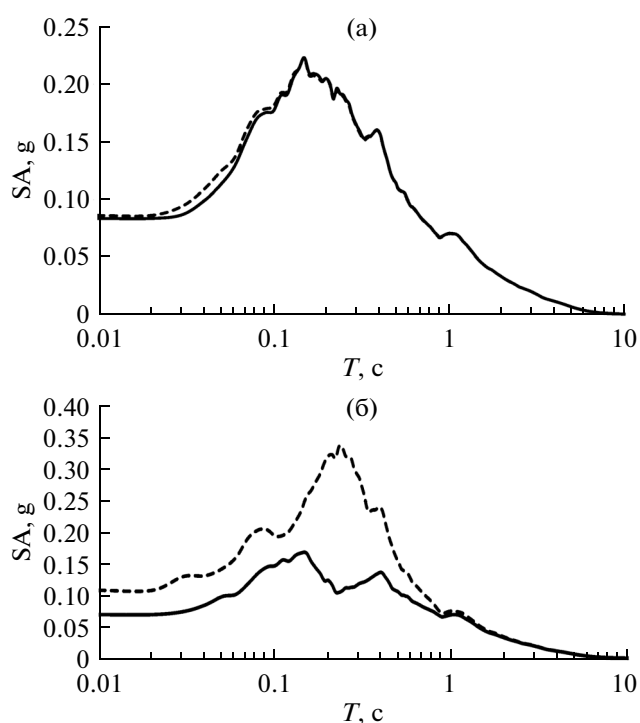
Синтезированные ансамбли акселерограмм для ожидаемых характерных сейсмических событий на площадке, в свою очередь, позволили провести численное моделирование прохождения сейсмических волн через слоистую грунтовую толщу.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что использованный в работе способ оценки сейсмической опасности для районов строительства объектов нефтегазовой добычи дает достаточно полную информацию, необходимую для сейсмостойкого проектирования и строительства.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 14-50-00095.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет ИО РАН по договору № 4577 между ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть» и ИО РАН «Корректировка инженерно-геологических разрезов и карт глубин моря по трассам подводных трубопроводов от райзерного блока (РБ) месторождения им. В. Филановского до ЛСП-1 месторождения им. Ю. Корчагина». Москва, 2010.
2. Отчет КФ ИО РАН о выполнении второго этапа по договору № 12V0474 между ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» и ИО РАН «Обработка материалов сейсмологических наблюдений на геодинамическом полигоне месторождения им. Ю. Корчагина». Астрахань, 2012.
3. СНиП II-7-81\* Строительные нормы и правила. Ч. II. Гл. 7. Строительство в сейсмических районах. М.: ФАУ ФЦС, 2014.



**Рис. 5.** Спектр реакции по ускорению с 5% затуханием ( $SA$ ) для поверхности и основания грунтовой пачки в районе ЛСП-1 месторождения им. Ю. Корчагина (а) и в районе мангышлакского вреза на месторождении им. Ю. Корчагина (б). Сплошная линия – на основании грунтовой пачки, пунктирная линия – на поверхности грунтовой пачки.

4. Уломов В.И., Шумилина Л.С., Акатова К.Н. Электронная база данных о повторяемости сейсмических сотрясений различной интенсивности на территории Северной Евразии // <http://seismos-u.ifz.ru/electr-earth.htm>
5. Abrahamson N.A., Silva W.J. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations // *Earthquake Spectra*. 2008. V. 24 (1). P. 67–97.
6. Bardet J.P., Ichii K., Lin C.H. EERA: a computer program for equivalent linear earthquake site response analysis of layered soils deposits // *Software manual*. University of Southern California, 2000.
7. Bardet J.P., Tobita T. NERA: a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits // *Software manual*. University of Southern California, 2001.
8. Bazzurro P., Cornell C.A. Disaggregation of seismic hazard // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1999. V. 89 (2). P. 501–520.
9. Bender B., Perkins D.M. SEISRISK II: a computer program for seismic hazard estimation // U.S. Geological Survey Open-File Report 82-293, 1982. 103 p.
10. Bender B., Perkins D.M. SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation // U.S. Geological Survey Bulletin, 1987. 48 p.
11. Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s // *Earthquake Spectra*. 2008. V. 24 (1). P. 139–171.
12. Chapman M.C. A probabilistic approach to ground motion selection for engineering design // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1995. V. 85 (3). P. 937–942.
13. Hashash Y.M.A. DEEPSOIL V 3.7, Tutorial and User Manual. 2002–2009 // University of Illinois at Urbana-Champaign, 2009.
14. Nigam N.C., Jennings P.C. Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1969. V. 59 (2). P. 909–922.
15. Sabetta F., Pugliese A. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1996. V. 86. P. 337–352.
16. Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites // Report No. UCB/EERC-28 - 72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972. 102 p.
17. Ulomov V.I. Earthquake Source Zones of Northern Eurasia – GSHAP Region 7 // [http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/source\\_zones.ans](http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/source_zones.ans)

## Seismic Hazard Assessment of Offshore Oil-and-Gas Fields on the Example of North Caspian Sea

A. A. Krylov, A. I. Ivashchenko, S. A. Kovachev

Seismic hazard assessment of oil fields in the North Caspian Sea is presented. The technique is well-proven in the works carried out by the Institute of Oceanology of RAS in different regions. For this purpose, the general seismic zoning data from available databases, known models of ground motion attenuation for seismically active regions, as well as data of geological and geophysical researches in the study area are used. Detailed seismic hazard assessment is performed using probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). The disaggregation of PSHA results is carried out and synthetic time histories, required for seismic microzoning by numerical nonlinear analysis, are constructed. As a result, we obtained the amplitude and spectral characteristics of ground motions required for earthquake-resistant design and construction.