

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ОФФШОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ШЕЛЬФЕ КАСПИЯ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

© 2020 Б.А. Трифонов¹, С.Ю. Милановский², И.А. Миндель¹, В.В. Несынов¹

¹ФГБУ ИГЭ РАН им. Е.М. Сергеева, Москва, Россия, 101000; e-mail: igelab@mail.ru

²ФГБУ ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия, 123242; e-mail: svetmil@mail.ru

В последние годы в мире происходит активное освоение нефтяных и газовых месторождений на шельфе в том числе и в сейсмоактивных районах. На морском дне весьма сложно в полном объеме проводить качественные геолого-геофизические исследования и сейсмологические наблюдения, входящие в комплекс работ по сейсмическому микрорайонированию (СМР). Программы для расчетных методов при СМР позволяют учитывать нелинейные свойства грунтов. В статье рассмотрен опыт исследований по СМР (2012–2015 гг.) для участка установки оффшорных сооружений на шельфе Среднего Каспия. В условиях отсутствия наблюдений донными сейсмическими станциями, показана возможность оценки сейсмической опасности расчетными методами с учетом локальных грунтовых условий. При этом получаемые величины сейсмической интенсивности меньше по сравнению с результатами оценок методом инженерно-геологических аналогий и методом сейсмических жесткостей. Максимальные воздействия из зон возможных очагов землетрясений, наиболее опасных для Среднего Каспия, учитывались особенностями спектрального состава колебаний грунтовых оснований в виде спектров реакции.

Ключевые слова: Каспий, зоны возможных очагов землетрясений, акселерограммы, спектр реакции.

ВВЕДЕНИЕ

Мировые углеводородные ресурсы морского шельфа оцениваются в 450 млрд т нефтяного эквивалента (условного топлива — у.т.) (Нефтедобыча, 2019). Из них на долю России запасы природного газа, конденсата, нефти и растворенного газа в общем объеме составляют более 122 млрд т у.т. (Астафьев и др., 2018). По оценкам (Offshore, 2019) по приросту шельфовых запасов углеводородов Россия лидировала в 2019 г. Освоение нефтегазовых месторождений на шельфе в свою очередь стимулируют исследования геологических явлений на нем и прилегающих глубоководных участках (Миронюк, 2017). Обустройство морских нефтегазовых месторождений предъявляет повышенные требования к качеству инженерно-геологических работ. Месторождения Каспийской нефтегазовой провинции, которые осваиваются компанией ЛУКОЙЛ уже несколько лет, являются площадкой для отработки технологий инженерно-геологических исследований для целей сейсмического микрорайонирования (СМР) на морском шельфе России.

Прошедший в Калифорнии в 1992 г. Международный семинар по сейсмическому проектированию и переоценке оффшорных сооружений (Proceedings..., 1992) определил состояние сейсмического проектирования и направления будущих исследований в этой области. Вопросы, затронутые на семинаре, включали оценку локальной сейсмичности, прогноз сильных движений грунта, структурное моделирование, анализ динамического отклика структур фундамента и реакции конструктивных элементов оборудования. В последние годы все активно ведутся исследования на шельфах США, Канады, Норвегии, Японии и др. (Nedimović, 2019). По мнению О.В. Павленко (2015)¹, работы, связанные с инженерной донной сеймикой находятся в стадии накопления материалов, а в обработке данных делаются лишь первые шаги. Однако появление глобальных спутниковых систем сбора, передачи и

¹ Павленко О.В. Отзыв официального оппонента на диссертационную работу Крылова Артема Александровича «Оценка сейсмических воздействий на шельфе». 2015. 5 с. http://idg.chph.ras.ru/data_files/Отзыв%20%20оппонента%20Павленко%20О.В..pdf.

обработки сейсмологической информации в реальном времени (<https://www.offshore-technology.com/news/newshunter-nanometrics-to-develop-induced-seismic-and-microseismic-monitoring-resolution-4256095>) свидетельствует о хороших перспективах этого направления (<https://www.nanometrics.ca>). Тем не менее, в современной литературе имеется относительно мало сведений об особенностях реакции грунтов на сейсмические воздействия на шельфе. Наблюдения носят единичный характер в силу их высокой стоимости и сложности организации. Другой причиной недостаточных сведений о таких работах на фоне роста индустрии морских платформ являются ограничения со стороны компаний на публикацию информации (<https://www.offshore-mag.com/magazine>, <https://www.offshore-technology.com>, <https://www.offshore-technology.com/about-us-off>).

На конференций Offshore Mediterranean Conference в Равенне в 2005 г. (<https://www.omic.it/archive/2005/conference/conference.htm>, <https://www.omic.it/home.php>), была представлена работа итальянских исследователей по непрерывной регистрации микросейсмичности донными станциями (Varacchi et al., 2005). В отличие от автономных донных станций с ограниченным запасом электробатарей, наблюдения велись в режиме реального времени с кабельным электропитанием. Опытный проект был реализован вблизи г. Кротоне на восточном побережье южной Италии. Работы были инициированы итальянской нефтегазовой фирмой ENI в связи с перспективами газоносности залива Кротоне и планами установки двух морских платформ. Проведенные в течение года непрерывные наблюдения показали эффективность регистрации событий с $M \geq 3$, что позволяет учитывать опасность, связанную с землетрясениями малых магнитуд, при которых площадь поражения невелика, но возможен значительный ущерб, связанный с ценностью объекта изучения.

Автономная донная геообсерватория для широкого круга океанографических исследований была реализована в рамках Проекта GEOSTAR и его модификаций (Gasparoni et al., 2014). В рамках миссий Проекта (1995–2012 гг.) на мелкой воде (10–40 м) и на абиссали до глубины 3550 м проводилась регистрация 16 различных параметров, включая широкополосную 3х-компонентную запись акселерограмм. Современная японская сеть кабельных сейсмических донных станций обеспечивает непрерывные временные ряды записей о землетрясениях и цунами на морском дне (Mikada et al., 2020). Результаты аналогичных научных наблюдений, ведущихся в различных районах мира, существенно расширяют представления о движении морского грунта в моменты землетрясений.

В России донные сейсмологические наблюдения начали проводиться в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) с 2000-х годов (Ковачев и др., 2003; Кузин и др., 2009; Лобковский и др., 2002; Соловьев, 1997). Работы проводились на объектах нефтегазового комплекса на шельфах Черного и Каспийского морей. Вкладом в сейсмические исследования на шельфах является диссертационная работа сотрудника ИО РАН А.А. Крылова (2016). В ней развивается подход, основанный на выделении и изучении записей морских микроземлетрясений донными станциями (метод автоматического выявления сейсмических событий) с последующим анализом исходной сейсмичности на площадке исследования. Это позволило А.А. Крылову (2016) оценивать сейсмическую опасность на шельфе детерминистскими и вероятностными методами, получить синтетические акселерограммы и оценить отклик грунта на сейсмические воздействия. Одновременно с этим анализировались колебательные процессы, связанные также с техногенными землетрясениями, морскими шумами, движениями нефтедобывающих платформ и т. п. Методология работ по оценке сейсмических воздействий на шельфе, имеет много общего с таковой на суше (Крылов, 2016), что объясняется схожестью происходящих сейсмологических процессов и явлений. При работах на шельфе используются многие алгоритмы и компьютерные программы, зарекомендовавшие себя в инженерных изысканиях на суше.

Тем не менее, морские условия предполагают полную водонасыщенность донного грунта, что может менять в той иной мере упруго-вязкую реакцию среды на прохождение сейсмических волн на поро-упругую. Теоретическое рассмотрение кинематических и динамических особенностей распространения различных типов сейсмических волн в поро-упругой среде по модели Био (Biot, 1956) можно найти в монографии В.Н. Николаевского (1984). В программе NERA (Bardet, Tobita, 2001) при решении задач СМР, как и в других расчетных программах, не учитывается влияние водонасыщенности грунта и его пороупругого поведения на возможное изменение балльности при землетрясении. Используемая в программе NERA зависимость напряжения-деформация описывает поведение сухих грунтов. Теория Грассмана (Grassman, 1951), которую использовал А.А. Крылов (2016) для адаптации NERA к водонасыщенной поро-упругой среде является частным случаем теории Био-Френкеля-Николаевского (Николаевский, 1984) при ряде допущений.

Макросейсмические наблюдения показывают, что во многих случаях обводненность тонкодисперсных грунтов повышает сейсмиче-

ский эффект. На учет водонасыщенности грунта при СМР указывал еще С.В. Медведев в своих классических работах (Медведев, 1962; Медведев др., 1962). Инструментальные наблюдения за землетрясениями на четвертичных песчано-глинистых грунтах (Трифонов др., 2019) показывают, что, в отличие от мелкозернистых песков, усиление сейсмического эффекта при обводнении не наблюдается для плотных гравелистых, крупных песков и глинистых грунтов от тугопластичной до твердой консистенций.

Макросейсмическая балльность оценивается по степени разрушений от землетрясений средней и большой интенсивности. За счет нелинейных процессов в слабых грунтах, она может не соответствовать количественной оценке параметров сейсмических воздействий (амплитудный уровень колебаний в ускорениях, скоростях, смещениях) при использовании традиционных методов СМР. Каждый раз при расчетах сейсмических воздействий на шельфе по программам следует иметь представление и учитывать свойства изучаемого геологического разреза (в идеале следует проводить долговременные наблюдения с донными станциями на типовых грунтах шельфа).

В инженерной сейсмологии частотный состав колебаний принято описывать спектром реакции. В 1960–2000 гг. большинство стран перешло к сейсмическому районированию в терминах амплитудных параметров колебаний грунтов — максимальных ускорений, максимальных скоростей и уровней спектров реакции. В США отказались от карт максимальных ускорений и перешли к уровням спектра реакции; в Европе и Китае сохраняются максимальные ускорения и карты максимальных ускорений (Гусев, 2011а, 2011б). Подход к учету грунтовых условий при проектировании сейсмостойких строительных конструкций заложен в американских нормах, разработанных в рекомендациях Комиссии по сейсмической безопасности Национального института строительных наук (BSSC, 2003) и NEHRP (Национальная Программа Уменьшения Опасности Землетрясений, <https://www.nehrp.gov/>). Для всей территории США построен набор мелкомасштабных карт сейсмического районирования, отражающих распределение прогнозируемых исходных сейсмических воздействий в спектральных ускорениях на периодах 0.2 с и 1.0 с. Для типизации грунтов применялся комплекс литологических, геофизических и физико-механических параметров: скорости поперечных сейсмических волн, сопротивление стандартной пенетрации, сдвиговая прочность грунта (модуль сдвига), число пластичности, весовая влажность грунта, минимальные мощности учитываемых слоев со специфическими свойствами. Каждому

из шести выделенных классов грунтово-геологических условий, соответствует определенный «грунтовый» коэффициент, который корректирует исходную спектральную характеристику прогнозного сейсмического воздействия (спектрального ускорения) на скальных грунтах класса «В» (Site Class «В»). Класс (категория) местных грунтовых условий (Site Class) устанавливается на основании специальных геотехнических исследований с учетом литологического состава и скоростей поперечных волн. Согласно рекомендациям (BSSC, 2003), для территории исследования строятся карты распределения спектральной плотности ускорений (Spectral density of accelerations) короткопериодной части спектра Ss (S-Short) и карты SL (S-Long) для его длиннопериодной части. Затем в полученные значения спектральной плотности ускорений вносятся соответствующие поправки за счет коэффициентов грунтовых условий. С учетом этих поправок определяются расчетные спектры реакции, учитывающие региональные и локальные особенности сейсмических воздействий. Сходный методический подход реализован в европейских строительных нормах EUROCODE-8, 1998 (<https://eurocodeapplied.com/design/en1998>), состоящих из 10-ти европейских стандартов (EN 1990-EN, 1999) (<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu>).

Американские инженеры-строители первыми в мире приступили к систематической регистрации и обработке сильных движений (Алешин, 2010). Построение наборов карт с исходными сейсмическими воздействиями в спектральных ускорениях для всей территории США было возможным в связи с наличием огромного количества (тысячи) записей землетрясений разного энергетического класса, полученных при непрерывной регистрации широкой сетью сейсмических станций за продолжительное время.

Для объектов, расположенных на участках с пониженной сейсмической активностью, к которым относится большая часть территории России, применение метода регистрации землетрясений имеет ограниченные возможности. Кроме того, отсутствие на территории РФ достаточно густой сети сейсмологических станций не позволяет иметь надежные записи сейсмических событий. Все это требует выработки способов прогнозирования сейсмических воздействий, необходимых для оценки сейсмостойкости проектируемых сооружений на морском шельфе без имеющихся записей сейсмических событий.

Аналізу подходов и нормативов по оценке сейсмической опасности в различных странах посвящены многочисленные работы, например (Алешин, 2010, 2017; Guangren et al., 2016; Serous, 2015). В связи с разработкой нового варианта

карты общего сейсмического районирования (ОСР) территории России в терминах максимальных ускорений для скальных грунтов важны работы А.А. Гусева (2002, 2011а, 2011б). В этих работах предлагается переходить от описания грунтовых условий в терминах «приращения сейсмической интенсивности» к их спектральному описанию.

На территории России оценка сейсмических воздействий для площадок строительства в сейсмоопасных районах проводится в соответствии со сводом строительных норм и правил СП 14.13330.2014(15,16) (СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах). В новом СП 14.13330.2018, который введен с 24 мая 2020 г., положения в области оценки сейсмостойкости сооружений не изменились, несмотря на их критику с учетом мировой практики и научных достижений в этой области (Дешеревская, Павленко, 2020; Павленко, 2020).

Реальные записи сильных сейсмических событий, полученные на участке исследования морского шельфа донными сейсмологическими станциями, могут быть критерием правильной оценки сейсмической опасности грунтовые условия.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

В статье рассматривается подход, который может быть полезен при оценке сейсмической опасности сооружений на морском шельфе. В качестве примера развиваемого подхода авторы рассматривают результаты исследований по изучению сейсмической опасности на шельфе Каспийского моря с использованием расчетных методов СМР. Исследований по СМР были проведены на десяти участках Каспия в местах постановки морских буровых платформ на месторождениях им. Ю. Кувыкина, им. В. Филановского, им. Ю. Корчагина и др., расположение которых приведено в обзоре (Астафьев и др., 2018).

В мировой практике интенсивность землетрясений на площадках особо ответственных объектов, к которым относятся нефтедобывающие морские платформы, помимо макросейсмических оценок в баллах, оценивается инструментально измеренными величинами максимальных ускорений, спектральными характеристиками землетрясений, описываемых с помощью спектров Фурье и спектров реакции (Карчинский и др., 1971; Крылов, 2016). Сложность оценки сейсмической опасности на море включает в себя ряд дополнительных проблем, которые не свойственны аналогичным работам на суше. К ним можно отнести: ограниченное количество или полное отсутствие записей сильных движений на поверхности дна, слож-

ности в проведении инженерно-геологических и геофизических наблюдений на море; наличие когерентных шумов в условиях акваторий, создающих дополнительные трудности при микросейсмическом мониторинге на шельфе, а также присутствия в верхней части геологического разреза водонасыщенных песчано-глинистых слоев третьей категории по сейсмическим свойствам, склонных к разжижению и проседанию при сейсмических воздействиях. Ранее в работе Н.В. Шебалина (1975) отмечалась нелинейная связь логарифма амплитуды ускорения и балльности. Благодаря проявлению нелинейных явлений в толще донных грунтов при сильных (свыше 7-ми баллов) землетрясениях могут наблюдаться эффекты демпфирования и частотно зависимые эффекты усиления колебаний. (Дешеревская, Павленко, 2020, Миндель и др., 2014; Павленко, 2009). В своих исследованиях О.В. Павленко (2009) отмечает, что при слабом движении отклик грунта можно рассматривать как линейный, при сильном — как нелинейный, а степень его нелинейности зависит от интенсивности колебаний. А.А.Крылов (2016) приводит сравнение полученных спектров реакции для песков, глин и ила на поверхности упругого полупространства со спектрами при залегании грунтовой толщи на суше и на шельфе. Спектры для песков различались незначительно и изменялись сильнее при увеличении интенсивности исходного воздействия. Для глинистого ила сейсмический эффект проявлялся интенсивнее при высоком значении влажности. При увеличении исходного воздействия эффект насыщения амплитуды сейсмической волны наблюдался в большей степени для более влажного грунта.

В 2003 г. ИО РАН проводил исследования по изучению сейсмических колебаний при помощи донных станций на шельфе Черного моря. На основании этих работ было принято допущение о возможности применения методики оценки сейсмической опасности на суше к объектам, расположенным на морском шельфе (Ковачев и др., 2003, Крылов, 2016; Кузин др., 2009).

Наши исследования на морском шельфе Каспия показывают, что можно решать задачи СМР расчетными методами с получением количественных оценок сейсмической опасности на участке установки буровых платформ (Миндель и др., 2014, 2017). На примере одного из 10 отработанных участков (площадка «Титонская-1») рассмотрим некоторые подходы по оценке сейсмической опасности на морском шельфе Каспия. В задачу исследований входило получение прогнозных количественных характеристик сейсмических воздействий (синтезированных акселерограмм и спектров реакции) от землетрясений из наиболее опасных зон возникновения

очагов землетрясений (ВОЗ) для рассматриваемой территории Каспия.

Оценка сейсмической опасности на шельфе Каспия. Для оценки сейсмической опасности морских платформ и других объектов обустройства месторождений на конкретном участке Каспия по расчетному методу СМР необходимы данные о его инженерно-геологическом строении, физико-механических и сейсмических свойствах грунтового массива до упругого полупространства. Это позволяет скорректировать

расчетную сейсмогеологическую модель для Каспия (Миндель и др., 2017) с учетом особенностей инженерно-геологического строения изучаемой территории.

Рассматриваемая в статье площадка «Титонская-1» располагается в 32.5 км северо-восточнее центра площадки «Хазри-1», на удалении около 108 км к северо-востоку от г. Махачкала на окраине выположенного восточного шельфового склона, в пределах глубин моря 28–30 м (рис. 1).

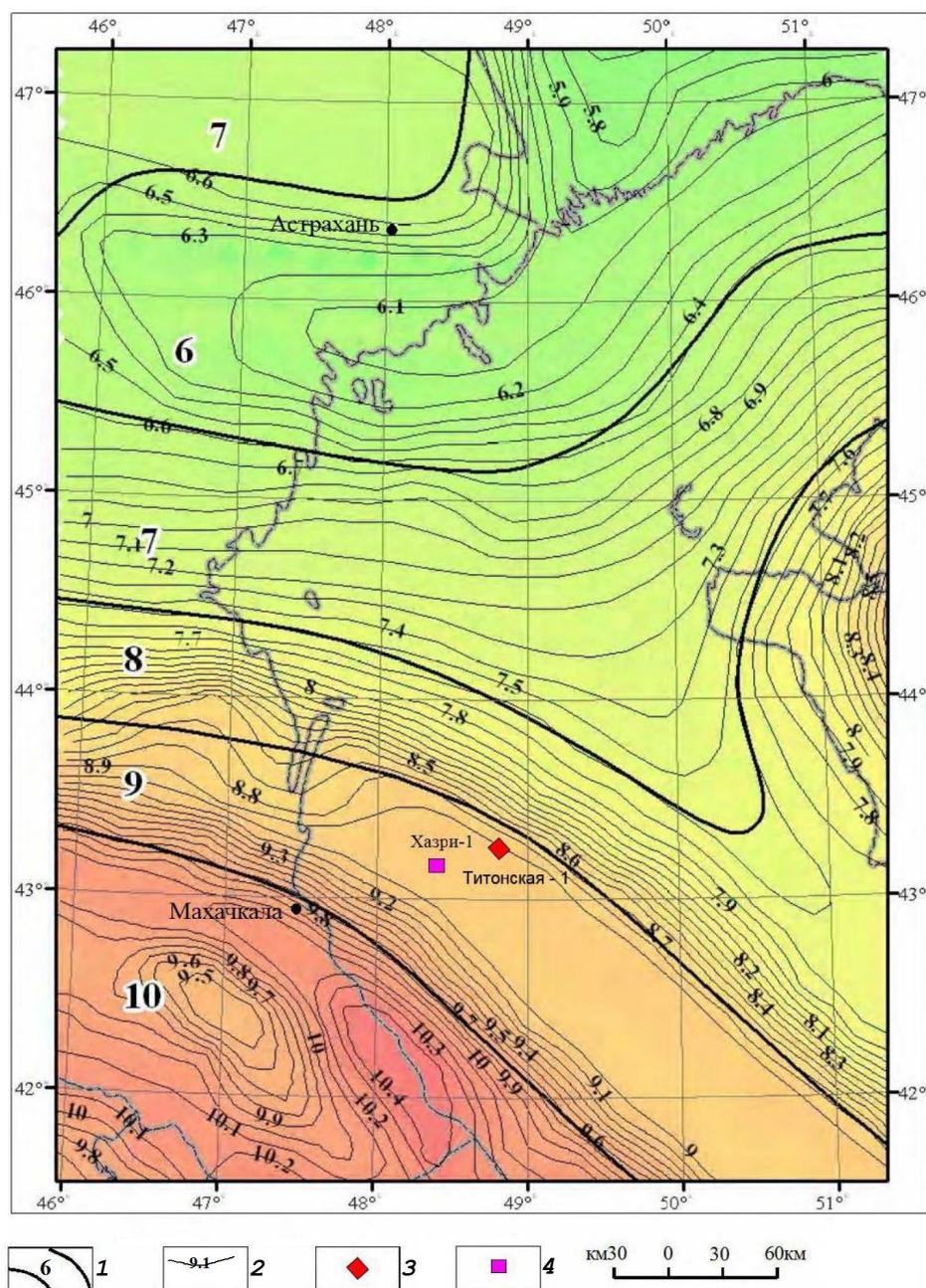


Рис. 1. Фрагмент уточненной карты ОСР-97-С (Уломов, Шумилина, 1999) для Каспийского региона: 1 — зоны интенсивности сотрясений в баллах; 2 — изосейсты в баллах; 3 — площадка «Титонская-1»; 4 — площадка «Хазри-1».

Fig. 1. Fragment of the revised OSR-97-C map (Ulomov, Shumilina, 1999) for the Caspian region: 1 — zones of intensity of ground intensity in points; 2 — isoseists in points; 3 — «Titonskaya-1» site; 4 — «Khazri-1» site.

Площадка «Титонская-1» находится в пределах Терско-Каспийского краевого прогиба (Короновский и др., 1990), характеризующегося повышенной мощностью кайнозойских отложений. По результатам инженерно-геологических работ (бурение опорной скважины с проведением полного комплекса исследований по определению свойств грунтов, включая статическое зондирование, а также проведение морских геофизических исследований), в сравнительно однородном грунтовом массиве были выделены до глубины 90 м от поверхности морского дна 15 инженерно-геологических элементов (ИГЭ), сложенных песчано-глинистыми отложениями с близкими значениями $V_s = 200\text{--}450$ м/с и $\rho = 1.89\text{--}2.0$ г/см³. Их мощность изменяется от 1.5 до 12 м.

Для решения задачи СМР по методу сейсмических жесткостей (МСЖ) были рассчитаны средневзвешенные значения V_s и ρ на глубину 30 м соответственно равные 270 м/с и 1.96 г/см³. М.В. Сакс в работе (Оценка..., 1988) отмечала, что при расчете сейсмических воздействий достаточно брать для теоретической модели разрез рыхлой толщи до границы сильного скачка скоростей поперечных волн. Так как скальные меловые и палеозойские породы в районе площадки залегают на глубине более 6.5–7.0 км, то залегающий на глубине 90 м слой плотного песка с включением ракушечника с V_s около 700 м/с и объемным весом $\rho = 2.05$ г/см³ был условно принят за упругое полупространство.

Сейсмическая опасность на площадке «Титонская-1» обусловлена землетрясениями из трех зон ВОЗ (табл. 1): 1 — ближней Дагестанской (Махачкалинской) зоны землетрясений с максимальной магнитудой $M = 7.0$ на эпицентральной дистанции 45–50 км (Годзиковская, 2000; Дагестанское..., 1981; Шебалин, 1997), 2 — зоны местных землетрясений из домена D0153 (Уло-

мов, 2008; Уломов и др., 2007) с максимальными $M = 5.5$ на глубине около 10 км, в пределах которого располагается площадка «Титонская-1», в самом неблагоприятном случае с очагом непосредственно под площадкой (Уломов, 2014); 3 — Красноводской зоны удаленных катастрофических землетрясений с $M = 8.0$ на эпицентральной дистанции 450 км (Шебалин, 1974).

Трудности освоения центральной и северной частей Каспийского шельфа связаны с высокой сейсмичностью Дагестанской зоны Северо-Восточного Кавказа (Маловичко и др., 2018; Павлова, Рузайкин, 2017). В соответствии с действующими нормативными документами (комплект карт ОСР-97 (<https://elima.ru/docs/?id=3224/>) и СП 14.13330.2014 (<https://meganorm.ru/Index2/1/4293771/4293771293.htm/>), разработанными в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта, территория ближайшего крупного населенного пункта (г. Махачкалы) в целочисленных значениях балла относится к 8-балльной зоне по карте А (повторяемость сотрясений 1 раз в 500 лет), по карте В — к 9-балльной зоне (повторяемость 1 раз в 1000 лет) и по карте С — к 10-балльной зоне (повторяемость 1 раз в 5000 лет) (Уломов, 2005; Уломов и др., 2014; Уломов, Шумилина, 1999). Указанная на картах ОСР-97 сейсмичность в баллах относится к грунтам второй категории по сейсмическим свойствам. Уточнение исходной сейсмичности производилось на основании карт общего сейсмического районирования (Уломов, Шумилина, 1999). На фрагменте карте ОСР 97-С, детализированном К.Н. Акатовой (рис. 1), площадка «Титонская-1» располагается вблизи изосейст 8.9–9.0 баллов. Для землетрясений из местных очагов и ближней зоны при оценке интенсивности сотрясений в баллах (I) шкалы MSK-64 (Медведев, 1968), была применена известная формула макросейсмического

Таблица 1. Основные параметры землетрясений из зон ВОЗ, наиболее опасных для территории северной части Каспия

Table 1. The main parameters of earthquakes from focal zones of possible earthquake sources most dangerous for the territory of the northern part of the Caspian

Сейсмогенерирующая зона	Магнитуда, М	Глубина очага, км	Эпицентральное расстояние до площадки, км	Сейсмическая интенсивность I, балл
Махачкалинская зона (Годзиковская, 2001; Дагестанское..., 1981; Шебалин, 1997)	7.0	10–15	45–50	8.9
Местное землетрясение из домена D0153 — очаг под площадкой (Уломов, 2008, 2014; Уломов и др., 2007)	5.5	8–12	0	8.1
Красноводская зона (Шебалин, 1974)	8.0	20–50	450	6.0

Примечание. Приведенные в таблице 1 интенсивности относятся к грунтам второй категории по сейсмическим свойствам с повторяемостью 1 раз в 5000 лет.

Note. The intensities given in table 1 refer to soils of category 2 according to seismic properties with a repeatability of once every 5000 years.

поля с уточненными для Дагестана коэффициентами (Шебалин, 1997):

$$I = 1.5M - 3.6 \lg(R) + 3.1, \quad (1)$$

где M — магнитуда, R — гипоцентральное расстояние в км, I — эпицентральная интенсивность сотрясений в баллах.

Кроме того, для ближней (Махачкалинской) зоны, сейсмичность в баллах корректировалась с учетом уточненной карты изосейст Дагестанского землетрясения 1981 г. (Шебалин, 1997). Для удаленной Красноводской зоны при оценке балльности учитывалась карта изосейст Красноводского землетрясения 1895 г (Шебалин, 1974).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании данных из таблицы 1, были произведены расчеты исходных параметров сейсмических воздействий для площадки постановки морской буровой платформы (табл. 2).

Расчет исходных параметров сейсмических воздействий. Максимальные амплитуды ускорения (A) для «средних» грунтов второй категории в зависимости от сейсмической интенсивности I по шкале MSK-64 (Медведев, 1968) были получены по известной формуле В.И. Уломова (2005). Для очагов из домена D0153, Махачкалинской (Дагестанской) и дальней Красноводской зон (Шебалин, 1997) значения пиковых ускорений, преобладающих периодов колебаний $T(A)$, эффективная продолжительность колебаний $d(A)$ для максимальных ускорений, оценивались по известным зависимостям Ф.Ф. Аптикаева (2012) и приложения 4 (Руководства..., 1998). При синтезировании акселерограмм соотношение амплитуд ускорения между двумя горизонтальными компонентами колебаний согласно (Аптикаев, 2012) было принято таким, чтобы более интенсивная из двух горизонтальных компонент превышает случайно ориентированную компоненту в 1.133 раза. Исходные данные для расчетов акселерограмм на уровне условного скального грунта, за который принят слой плотного песка с включением ракушника с $V_s = 700$ м/с и $\rho = 2.05$ г/см³, были сгенерированы по программе «PSEQGN» (Ruiz, Penzien, 1969) (рис. 2).

Полученные синтезированные акселерограммы для условной скалы использовались в дальнейшем в качестве входных сигналов при расчете акселерограмм на поверхности донных отложений в районе установки площадки «Титонская-1» с учетом конкретного сейсмогеологического разреза. Обобщенное описание инженерно-геологического разреза площадки исследования обусловлено ограничением со стороны заказчика работ на публикацию такого рода информации.

Расчетные сейсмические воздействия для площадки исследования. Сейсмические воздействия от местных и удаленных землетрясений рассчитывались в программе NERA (Bardet, Tobita, 2001). Расчеты проводились на основании модели (сравнительно однородный по упругим свойствам грунтовый массив мощностью 90 м), учитывающей механизмы нелинейного поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях. Реакция слоистого грунтового массива рассчитывалась путем моделирования процесса распространения через грунтовый массив сейсмического сигнала (акселерограммы), заданного на уровне упругого полупространства.

При расчетах сейсмических воздействий одним из ключевых параметров в модели грунтового массива (расчетная модель в формате программы NERA) является скорость поперечных волн V_s . В случае шельфа задача ее определения решается различными способами (Акопова и др., 2016; Paoletti et al., 2010). На площадке исследования расчетная модель грунтового массива в значениях скоростей поперечных волн V_s задавалась системой слоев с учетом корректировки скоростной модели для шельфа Среднего Каспия (Миндель и др., 2017). По результатам дополнительных инженерно-геологических исследований на площадке вносились коррективы в значения V_s , ρ и мощности слоев соответствующих ИГЭ.

На площадке «Титонская-1» толща донных отложений представлена песчано-глинистыми грунтами III категории по сейсмическим свойствам с прослоями глинистых грунтов твердой и полутвердой консистенций (II категория по сейсмическим свойствам), что допускает использование алгоритмов программы NERA для упруго-вязкой реологии. Для площадки «Титонская-1» был рассчитан комплект акселерограмм и соответствующие им спектры реакции от каждой зоны ВОЗ.

По результатам расчетов наиболее интенсивные колебания на поверхности дна ожидаются от землетрясений из Махачкалинской зоны с магнитудой 7, где максимальное ускорение на компоненте X составляет 182 см/с² (рис. 3), что соответствуют 8 баллам по шкале MSK-64 и 7–8 баллов согласно СП 14.13330.2018. От местного землетрясения из домена D0153 (магнитуда 5.5), в случае расположения очага под площадкой на глубине 10 км, максимальное ускорение оценивается по данным расчетов на наиболее интенсивной компоненте X в 126 см/с² (около 7 баллов). В случае землетрясений из удаленной Красноводской зоны с магнитудой 8 максимальное ускорение на горизонтальной компоненте X были оценены в 54 см/с², что ~6 баллов.

Таблица 2. Параметры исходных сейсмических воздействий для площадки постановки морской буровой платформы от очагов трех наиболее опасных зон ВОЗ

Table 2. Parameters of initial seismic impacts on the offshore drilling platform installation site from the three most dangerous zones of possible earthquake sources

Наименование зоны	Категория грунтов	Максимальное ускорение, см/с ²	Преобладающий период T, с	Продолжительность d(A), с	Сейсмическая интенсивность I, балл
Махачкалинская	2	385	0.36	17	8.9
	1	191	0.31	13	7.9
Домен D0153	2	220	0.20	4	8.1
	1	110	0.17	3	7.1
Красноводская	2	50	1.1	45	6.0
	1	25	1.0	35	5.0

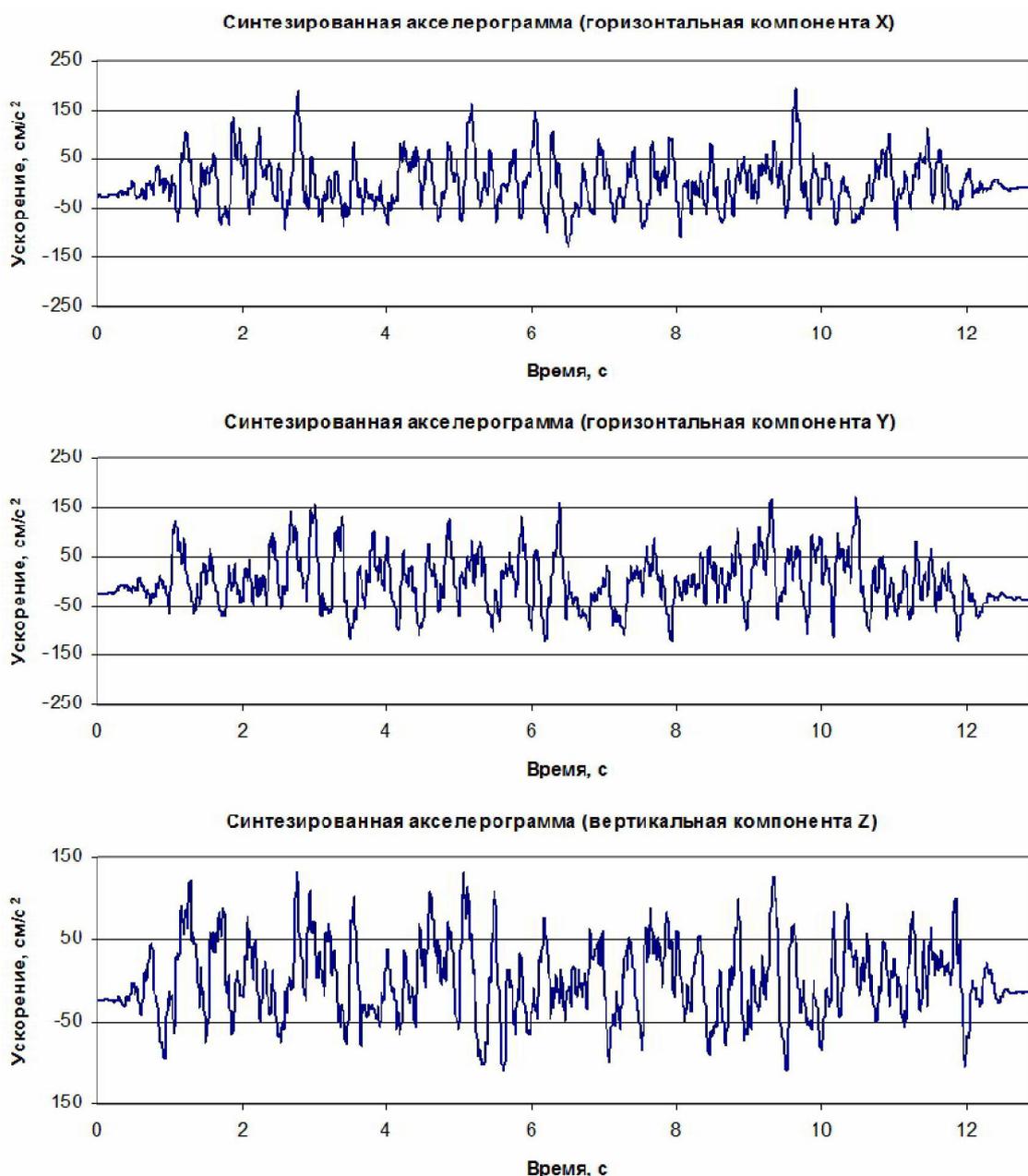


Рис. 2. Синтезированные акселерограммы (горизонтальные компоненты X, Y и вертикальная Z) на поверхности условной скалы от Махачкалинской зоны ВОЗ.

Fig. 2. Synthesized accelerograms (horizontal components X, Y and vertical Z) on the surface of a conventional rock from the Makhachkala zone of possible earthquake sources.

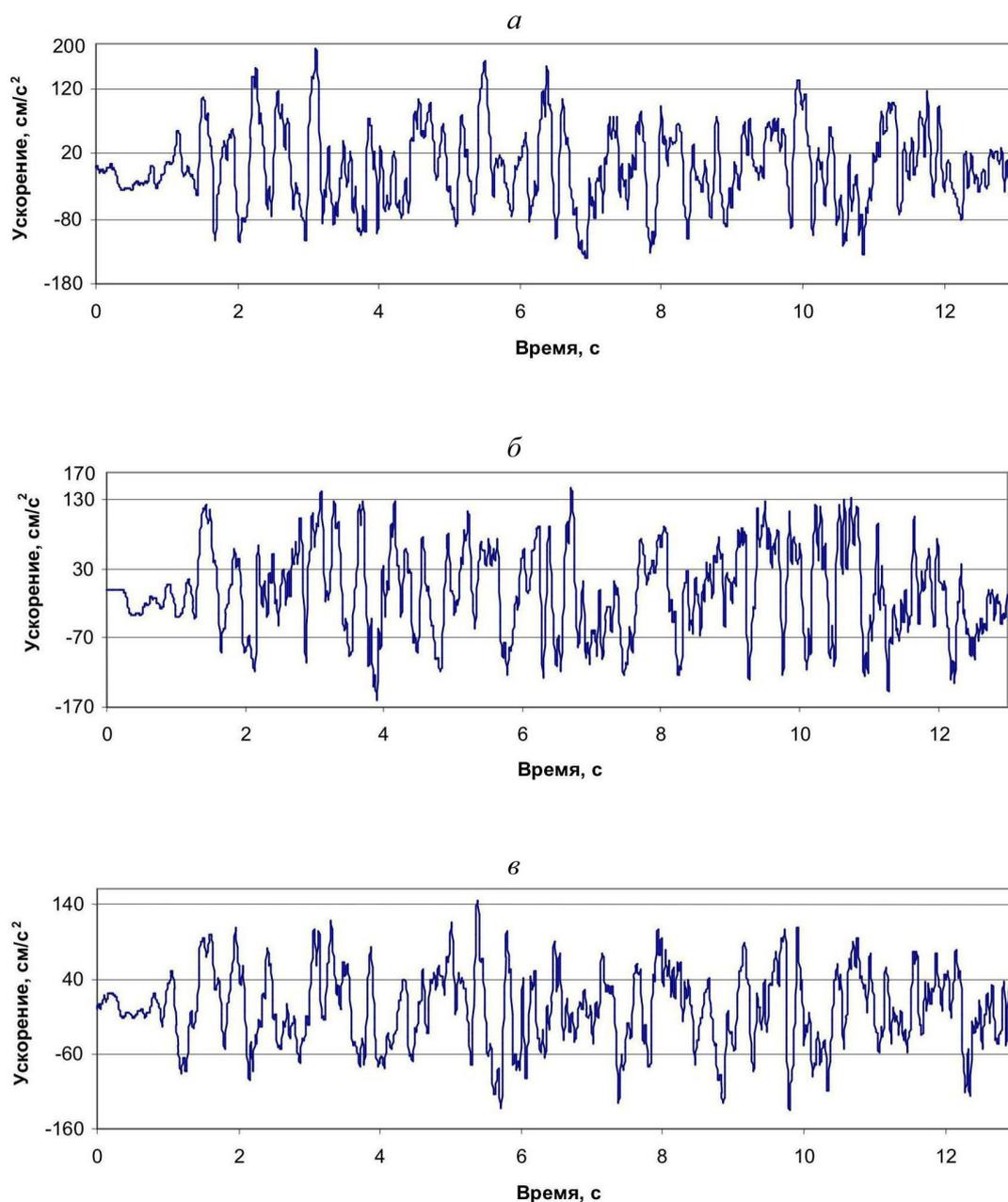


Рис. 3. Синтезированные акселерограммы на поверхности дна в месте постановки буровой платформы на площадке «Титонская-1» от землетрясения из Махачкалинской зоны с $M = 7.0$ и гипоцентральной расстоянием 45–50 км.: *a* — компонента X ($A_{max} = 182 \text{ см/с}^2$); *б* — компонента Y ($A_{max} = 161 \text{ см/с}^2$); *в* — вертикальная компонента Z ($A_{max} = 144 \text{ см/с}^2$).

Fig. 3. Synthesized accelerograms on the bottom surface at the location of the drilling platform on site «Titonskaya-1» from an earthquake from the Makhachkala zone with $M = 7.0$ and a hypocentral distance of 45–50 km: *a* — component X ($A_{max} = 182 \text{ см/с}^2$); *б* — component Y ($A_{max} = 161 \text{ см/с}^2$); *в* — vertical component of Z ($A_{max} = 144 \text{ см/с}^2$).

Полученные расчетные акселерограммы из Махачкалинской зоны и из домена D0153 по трем компонентам колебаний для расчета сейсмических нагрузок во временной области могут использоваться для сооружений, возводимых на шельфе, на уровне максимального расчетного землетрясения при повторяемости землетрясений 1 раз в 5000 лет (см. п.п. 8.1 и 8.4 СП 14.13330.2018). При необходимости учитывать сравнительно малые по интенсивности низко-

частотные колебания длительностью более 30 с, можно применять акселерограммы, полученные для Красноводской зоны.

Полученный набор спектров реакции (компоненты X, Y, Z) от сейсмических воздействий из трех сейсмических зон учитывает возможные периоды колебаний от 0.15–0.20 с до 0.30–0.80 с. Из этого набора для построения обобщенного спектра реакции от наиболее опасных землетрясений из Махачкалинской зоны и домена

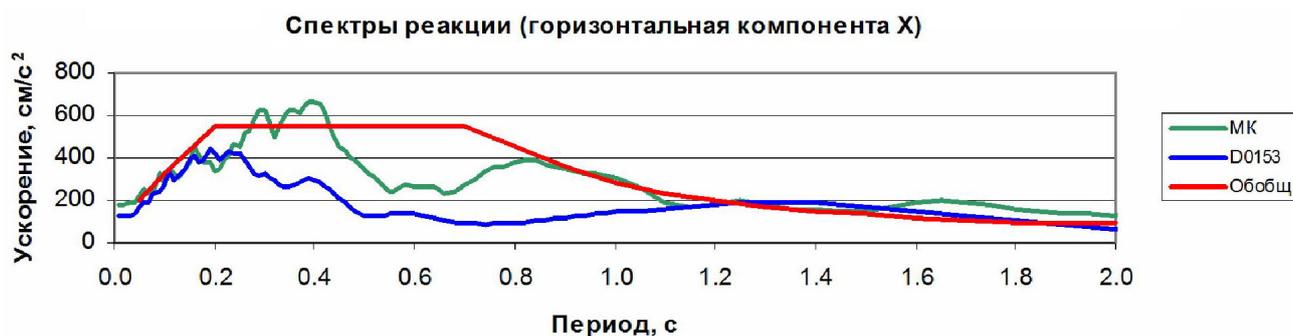


Рис. 4. Спектры реакции от расчетных акселерограмм на поверхности дна (площадка «Титонская-1») от близкого землетрясения из Махачкалинской зоны (МК) и от местных землетрясений из домена D0153.

Fig. 4. The reaction spectra from the calculated accelerograms on the bottom surface (site «Titonskaya-1») from a close earthquake from the Makhachkala zone (МК) and from a local earthquakes from the domain D0153.

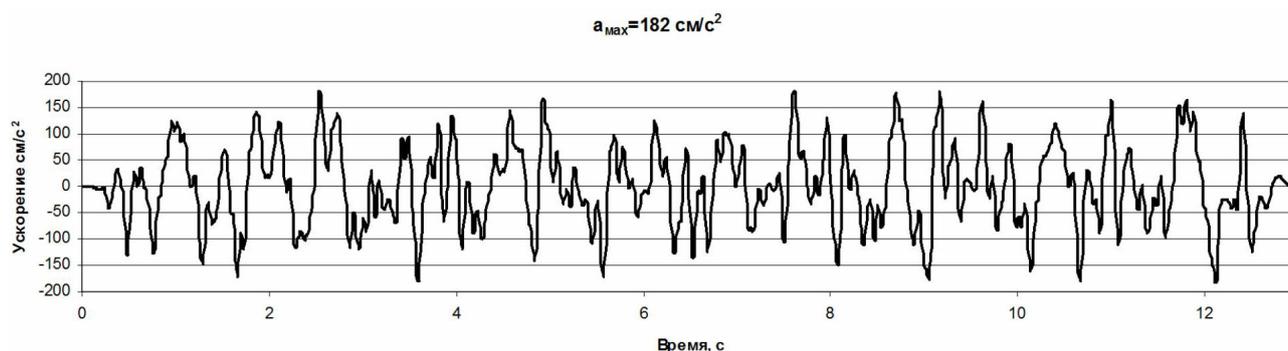


Рис. 5. Пример синтезированной акселерограммы, рассчитанной по обобщенному спектру реакции (горизонтальная компонента X).

Fig. 5. An example of a synthesized accelerogram calculated from the generalized reaction spectrum (horizontal component X).

D0153 для каждой компоненты колебаний были выбраны спектры для ближней и местной зон (рис. 4). По такому обобщенному спектру реакции были проведены расчеты соответствующих акселерограмм. Обобщенная акселерограмма, рассчитанная на поверхности морского дна в месте постановки буровой платформы (рис. 5) позволяет оценивать сейсмическую опасность как из наиболее опасной Махачкалинской зоны, так и из домена D0153.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования по оценке ожидаемой сейсмической опасности на морском шельфе расчетными методами показывают, что следует учитывать возможность отличия этих оценок от результатов по другим методам СМР (инженерно-геологических аналогий и МСЖ). Расчетами установлено, что нелинейный характер соотношения между деформациями и напряжениями существенно меняют величину и частотный состав сейсмического сигнала (Крамнин и др., 1978). Сейсмика традиционно основывается на предположении линейного характера зависимости напряжений и деформаций. В этом случае

МСЖ из-за не учета нелинейных процессов демпфирования на слабых грунтах третьей категории, дает завышенную оценку ожидаемого сейсмического эффекта в величинах балльности (Дешеревская, Павленко, 2020).

На площадке исследования при СМР сейсмичность грунтового массива на глубину 30 м по методу инженерно-геологических аналогий и МСЖ оценивалась более 9 баллов, что согласно СП 14.13330.2018 (СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах) соответствует A_{\max} более 400 см/с^2 . Известно, что МСЖ работает только при слабых движениях и его нельзя применять при сильных движениях (Алешин, 2010). Вследствие проявления нелинейных явлений в толще водонасыщенных песчаных и глинистых донных грунтов третьей категории по сейсмическим свойствам, в частности, эффекта демпфирования, на площадке исследования при ожидаемых сильных движениях получены расчетные величины ускорений при землетрясении из самой опасной зоны ВОЗ равные $A_{\max} = 182 \text{ см/с}^2$ (на горизонтальной компоненте X), что соответствует 8 баллам по шкале MSK-64 и 7–8 баллов согласно СП 14.13330.2018. Как уже отмечалось, несоответствие в получаемых результатах между

расчетным методом и традиционными методами СМР объясняется не учетом нелинейных процессов, связанных с поглощением энергии сейсмических волн в грунтах третьей категории при сильных землетрясениях (Дещеревская, Павленко, 2020, Миндель и др., 2014; Павленко, 2009). В таких грунтах происходит ослабление сейсмических колебаний и уменьшение их амплитуды. При этом нелинейные эффекты не зависят от скорости распространения волны (Павленко, 2009). Несоответствие в результатах оценок ожидаемых сейсмических воздействий с учетом реальных грунтовых условий по различным методам отмечал также в своих работах А.А. Гусев (2002, 2011а, 2011б).

Таким образом, использование расчетного метода при СМР на донных песчано-глинистых грунтах позволяет оценить снижение величины ожидаемой сейсмической интенсивности (балльности) за счет эффекта демпфирования.

В перспективе, при СМР на территории шельфа для грунтов различных категорий по составу, пористости, связности и дисперсности необходимо учитывать эффекты их полного водонасыщения, связанные с возможностью пороупругой реакции грунтов на прохождение сейсмических волн (Николаевский, 2014). При оценке ожидаемых сейсмических воздействий на ложе шельфа, необходимо иметь детальные данные об инженерно-геологических условиях среды, чтобы правильно оценить проявление сейсмических эффектов. Теоретические модели желательно верифицировать натурными измерениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что использование расчетных методов сейсмического микрорайонирования дает возможность оценки сейсмической опасности для сооружений, расположенных на шельфе, таких как буровые платформы и др., когда другие методы СМР не могут обеспечить получение надежного результата.

Наши исследования показали, что расчетные методы СМР позволяют учитывать особенности нелинейного поведения грунтов при определении величины сейсмической опасности на морском шельфе. Они дают возможность оценки величины ускорения и ожидаемого сейсмического эффекта на поверхности донных отложений за счет их нелинейного поведения. При этом величины оценки сейсмического эффекта отличаются в сторону уменьшения от результатов традиционных методов СМР (инженерно-геологических аналогий и МСЖ).

Построение синтезированных акселерограмм и обобщенных спектров реакции, объединяющих воздействия из нескольких наиболее

опасных для изучаемой территории сейсмогенерирующих зон, позволяет упростить и сократить количество расчетов ожидаемых сейсмических нагрузок.

Авторы признательны рецензентам за высказанные замечания и пожелания по содержанию статьи.

Список литературы [References]

- Акопова С.С., Бирюков Е.А., Григорьев А.Г. и др.* Экспериментальное исследование возможности использования поверхностной волны Шолте для изучения строения верхней части разреза на акваториях // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 4. С. 77–86 [*Akopova S.S., Biryukov E.A., Grigoriev A.G. et al.* An experimental study of the possibility of using the surface Scholte wave to study the structure of the upper part of the section in water areas // Problems of Engineering Seismology. 2016. V. 43. № 4. P. 77–86 (in Russian)].
- Алешин А.С.* Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Москва: Светоч Плюс, 2010. 304 с. [*Aleshin A.S.* Seismic microzoning of especially critical objects. Moscow: Svetoch Plus, 2010. 304 p. (in Russian)].
- Алешин А.С.* Основы континуальной теории сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир, 2017. 300 с. [*Aleshin A.S.* Fundamentals of the continuum theory of seismic microzoning. Moscow: Scientific World, 2017. 300 p. (in Russian)].
- Аптикаев Ф.Ф.* Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. Москва: Наука и образование, 2012. 175 с. [*Aptikaev F.F.* Instrumental scale of seismic intensity. Moscow: Science and Education, 2012. 175 p. (in Russian)].
- Астафьев Д.А., Толстиков А.В., Наумова Л.А., Кабалин М.Ю.* Перспективные направления газонефтепоисковых работ на морском шельфе России в XXI веке // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2018. № 4(36) С. 4–18 [*Astafiev D.A., Tolstikov A.V., Naumova L.A., Kabalin M.Yu.* Promising areas of oil and gas exploration on the offshore of Russia in the twenty-first century. // Scientific and technical collection «News of gas science». 2018. № 4 (36) P. 4–18 (in Russian)].
- Годзиковская А.А.* Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4,0$ ($K \geq 11,0$) с древнейших времен по 2000 г. // Центр Службы Гсодинамических наблюдений в Электроэнергетической отрасли. 2001. Москва: Министерство топливной энергетики. <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/> [*Godzikovskaya A.A.* The catalog of Caucasian earthquakes with $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) from ancient times to 2000 // Center for the Service of Hydrodynamic Observations in the Electric Power Industry. 2001. Moscow: Ministry of Fuel Energy. (<http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/>) (in Russian)].
- Гусев А.А.* О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Физика Земли. 2002. № 12. С. 56–70 [*Gusev A.A.* On the seismological basis for the seismic building code in Russia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2002. V. 38. № 12. P. 1044–1056].

- Гусев А.А.* О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений (часть 1) // Инженерные изыскания. 2011а. № 10. С. 20–29 [*Gusev A.A.* About the principles of mapping of seismic hazardous regions of the Russian Federation and rationing of seismic loads in terms of seismic accelerations (part 1) // *Engineering Surveys*. 2011a. № 10. P. 20–29 (in Russian)].
- Гусев А.А.* О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений (часть 2) // Инженерные изыскания. 2011б. № 11. С. 66–77 [*Gusev A.A.* About the principles of mapping of seismic hazardous regions of the Russian Federation and rationing of seismic loads in terms of seismic accelerations (part 2) // *Engineering Surveys*. 2011b. № 11. P. 66–77 (in Russian)].
- Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Москва: Наука, 1981. 260 с. [Dagestan earthquake on May 14, 1970. Moscow: Nauka, 1981. 260 p. (in Russian)].
- Дещеревская Е.В., Павленко О.В.* Частотно-зависимый отклик мягких (песчаных и лессовых) грунтов на сейсмические воздействия и метод сейсмических жесткостей. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 53–62 [*Deshchevskaya E.V., Pavlenko O.V.* Frequency-dependent Response of Soft (Sandy and Loess) Soils in Seismic Motion and Seismic Rigidity Method. *Earthquake engineering constructions safety*. 2020. № 1. P. 53–62 (in Russian)].
- Карчинский И.Л., Бородин Л.А., Гроссман А.Б. и др.* Сейсмостойкое строительство зданий. М.: Высшая школа, 1971. 320 с. [*Karchinsky I.L., Borodin L.A., Grossman A.B. et al.* Earthquake-resistant building construction. Moscow: Higher School, 1971. 320 p. (in Russian)].
- Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И.* Детальные сейсмологические наблюдения на центральной части шельфа и континентального склона северо-восточной части Черного моря с помощью донных станций // Физика Земли. 2003. № 1. С. 21–27 [*Kovachev S., Kuzin I.P., Lobkovsky L.I.* Detailed seismological observations on the central shelf and continental slope of the northeastern Black Sea using sea-bottom stations // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2003. V. 39. P. 19–24].
- Короновский Н.В., Гуцин А.И., Никитин М.Ю. и др.* Геологическое развитие и становление современной структуры Терско-Каспийского передового прогиба // Тектоника орогенных сооружений Кавказа и вредней Азии. М.: Наука, 1990. С. 4–35 [*Koronovskiy N.V., Gushchin A.I., Nikitin M.Yu. et al.* Geological development and formation of the modern structure of the Terek-Caspian foredeep // *Tectonics of orogenic structures of the Caucasus and harmful Asia*. М.: Science, 1990. P. 4–35 (in Russian)].
- Крамнин П.И., Чернов Ю.К., Штейнберг В.В.* Ускорение колебаний скальных и рыхлых грунтов при сильных землетрясениях // Вопросы инженерной сейсмологии. 1978. Вып. 19. С. 140–148 [*Kraminin P.I., Chernov Yu.K., Shteinberg V.V.* Acceleration of vibrations of rocky and loose soils during strong earthquakes // *Questions of engineering seismology*. 1978. V. 19. P. 140–148 (in Russian)].
- Крылов А.А.* Оценка сейсмических воздействий на шельфе. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Москва, 2016. 150 с. [*Krylov A.A.* Assessment of seismic effects on the shelf. Diss. Cand. Phys.-Math. sciences. Moscow, 2016. 150 p. (in Russian)].
- Кузин И.П., Ковачев С.А., Лобковский Л.И.* Об оценке сейсмической опасности и сейсмическом и микрорайонировании участков строительства морских сооружений на слабосейсмических акваториях // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 67–80 [*Kuzin I.P., Kovachev S.A., Lobkovskii L.I.* Seismic microzonation and assessment of earthquake hazard for the construction sites of sea-based facilities in low seismicity water areas // *Journal Volcanologia and Seismology*. 2009. № 3. P. 131–143. <https://doi.org/10.1134/S0742046309020067>].
- Лобковский Л.И., Кузин И.П., Ковачев С.А.* Детальные сейсмологические исследования с донными сейсмографами у кавказского побережья Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А.Г. Зацепин, М.В. Флинт. М.: Наука, 2002. С. 373–380 [*Lobkovsky L.I., Kuzin I.P., Kovachev S.A.* Detailed seismological studies with bottom seismographs off the Caucasian coast of the Black Sea // *Comprehensive studies of the North-Eastern part of the Black Sea / Executive editors A.G. Zatsepin, M.V. Flint*. Moscow: Nauka, 2002. P. 373–380 (in Russian)].
- Маловичко А.А., Коломиец М.В., Рузайкин А.И.* Сейсмичность России в 2017 году // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 6. С. 59–68. <https://doi.org/10.1134/S0869780318050046> [*Malovichko A.A., Kolomiets M.V., Ruzaykin A.I.* Seismicity of Russia in 2017. // *Geocology. Engineering, hydrogeology, geocryology*. 2018. № 6. P. 59–68 (in Russian)].
- Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Стройиздат, 1962. 284 с. [*Medvedev S.V.* Engineering seismology. Moscow: Stroyizdat, 1962. 284 p. (in Russian)].
- Медведев С.В.* Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 8–25 [*Medvedev S.V.* International scale of seismic intensity / *Seismic zoning of the USSR*, part 1. Moscow: Nauka, 1968. P. 8–25 (in Russian)].
- Медведев С.В., Бунэ В.И., Гзелишвили И.А. и др.* Инструкция по проведению сейсмического микрорайонирования. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 7. 1962. С. 112–122 [*Medvedev S.V., Bune V.I., Gzelishvili I.A. et al.* Instructions for conducting seismic microzoning. // *Questions of engineering seismology*. 1962. Iss. 7. P. 112–122 (in Russian)].
- Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Кауркин М.Д.* Особенности сейсмических воздействий на шельфе Северного и Среднего Каспия с учетом исходной сейсмичности и грунтовых условий // Инженерные изыскания. 2017. № 6–7. С. 108–117 [*Mindel I.G., Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Kaurkin M.D.* Peculiarities of seismic impacts on the shelf of the Northern and Central parts of the Caspian Sea with account of initial seismicity and ground conditions // *Engineering surveys*. 2017. № 6–7. P. 108–117 (in Russian)].

- Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Рагозин Н.А.* Особенности реакции слабых водонасыщенных грунтов на динамические воздействия при землетрясениях. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 5. С. 387–401 [*Mindel I.G., Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Ragozin N.A.* Features of the reaction of weak water-saturated soils to dynamic effects during earthquakes. // *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology.* 2014. № 5. P. 387–401 (in Russian)].
- Миронюк С.Г.* Сравнительный анализ инженерно-геологических условий на шельфах морей различного типа. Электронный журнал ГеоИнфо. 27 марта 2017 года (<https://www.geoinfo.ru/product/mironyuk-sergej-grigorevich/sravnitelnyj-analiz-inzhenerno-geologicheskikh-uslovij-na-shelfah-morej-razlichnogo-tipa-35095.shtml>). [*Mironyuk S.G.* Comparative analysis of engineering and geological conditions on the shelves of the seas of various types. *GeoInfo electronic journal.* March 27, 2017 (<https://www.geoinfo.ru/product/mironyuk-sergej-grigorevich/sravnitelnyj-analiz-inzhenerno-geologicheskikh-uslovij-na-shelfah-morej-razlichnogo-tipa-35095.shtml>) (in Russian)].
- Нефтедобыча // Техническое приложение к газете «Коммерсант». Наука. Декабрь, 2019. С. 22–25 [Oil production // Technical supplement to the newspaper *Kommersant.* Science. December, 2019. P. 22–25 (in Russian)].
- Николаевский В.Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. М., 1984. 232 с. [*Nikolaevsky V.N.* *Mechanics of porous and fractured media.* M., 1984. 232 p. (in Russian)].
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: метод. руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 224 с. [Assessment of the influence of soil conditions on seismic hazard: method. seismic microzoning guide Moscow: Nauka, 1988. 224 p. (in Russian)].
- Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир, 2009. 260 с. [*Pavlenko O.V.* *Seismic waves in soil layers: nonlinear soil behavior during strong earthquakes of recent years.* Moscow: Scientific World, 2009. 260 p. (in Russian)].
- Павленко О.В.* Современные методы оценки локальных эффектов землетрясений. Физика Земли, 2020. № 5. С. 59–69. <https://doi.org/10.31857/S0002333720040067> [*Pavlenko O.V.* Modern methods for estimating local effects of the earthquakes // *Physics of the Earth,* 2020. V. 56. Iss. 5. P. 59–69. <https://doi.org/10.1134/S1069351320040060>].
- Павлова Н.Д., Рузайкин А.И.* Сейсмичность России в 2011–2016 годах. // Вестник ОНЗ РАН. 2017. Т. 9. NZ9001. <https://doi.org/10.2205/2017NZ000350> [*Pavlova N.D., Ruzaykin A.I.* Seismicity of Russia in 2011–2016 // *Vestnik ONZ RAN.* 2017. V. 9. NZ9001. (in Russian)].
- Руководства по безопасности определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ (РБ-006-98) // Постановление Госатомнадзора России от 29 декабря 1998г. №3 (<https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-gosatomnadzora-rf-ot-29121998-n-3-ob-utverzhdenii/>) [Safety guidelines determination of initial seismic soil vibrations for design basis (RB-006-98) // Resolution of the Gosatomnadzor of Russia dated December 29, 1998. №3 (<https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-gosatomnadzora-rf-ot-29121998-n-3-ob-utverzhdenii/>) (in Russian)].
- Соловьев С.Л.* Достижения и проблемы морской сейсмологии. М.: Наука, 1997. 329 с. [*Soloviev S.L.* *Achievements and problems of marine seismology.* Moscow: Nauka, 1997. 332 p. (in Russian)].
- Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Милановский С.Ю., Несынов В.В.* Оценка сейсмических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при решении задач сейсмического микрорайонирования // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 5. С. 74–81. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019574-81> [*Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Milanovskiy S.Yu., Nesynov V.V.* Evaluation of seismic properties of water-saturated soils for solving problems in seismic microzonin // *Geocology. Engineering, hydrogeology, geocryology.* 2019. № 5. P. 74–81 (in Russian)].
- Уломов В.И.* Вероятностно-деформационная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и суммарных землетрясений. Сейсмостойкое строительство. // Безопасность сооружений. 2005. № 4. С. 60–69 [*Ulomov V.I.* Probabilistic deformation assessment of seismic impacts based on OSR-97 maps and total earthquakes. *Earthquake-resistant construction.* // *Safety of facilities.* 2005. № 4. P. 60–69 (in Russian)].
- Уломов В.И.* Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Монография в 8 томах / Ред. академ. Н.П. Лаверов. Т. 1. «Сейсмические процессы и катастрофы» / Отв. ред. академ. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 127–146 [*Ulomov V.I.* Identification of potential sources and long-term forecast of strong earthquakes in the North Caucasus // *Changes in the environment and climate. Natural and related technological disasters. Monograph in 8 volumes / Ed. Acad. N.P. Laverov. V. 1 «Seismic processes and disasters» / Executive editor Acad. A.O. Gliko. Moscow: IFZ RAS, 2008. P. 127–146 (in Russian)].*
- Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С. и др.* К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика Земли. 2007. №7. С. 31–35 [*Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S. et al.* Assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Izvestiya Physics of the Solid Earth.* 2007. V. 43. Iss. 7. P. 559–572. <https://doi.org/10.1134/S1069351307070051>].
- Уломов В.И., Перетокин С.А., Медведева Н.С. и др.* Сейсмологические аспекты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (Карты ОСР-97, ОСР-2012, ОСР-2014) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 4. С. 5–24 [*Ulomov V.I., Peretokin S.A., Medvedeva N.S. et al.* Seismological aspects of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation (Maps OSR-97, OSR-2012, OSR-2014) // *Issues of engineering seismology.* 2014. V. 41. № 4. P. 5–24 (in Russian)].
- Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплекс карт общего сейсмического районирования территории

- Российской Федерации – ОСР_97. Масштаб 1 : 8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с. [Ulomov V.I., Shumilina L.S. A set of maps for general seismic zoning of the territory of the Russian Federation – OSR_97. Scale 1: 8000000. Explanatory note and list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Moscow: OFZ. 1999. 57 p. (in Russian)].
- Шебалин Н.В.* О сложном характере основного толчка Дагестанского землетрясения по макросейсмическим данным // Сильные землетрясения. М.: Издательство Академии горных наук. 1997. С. 124–129 [Shebalin N.V. On the complex nature of the main shock of the Dagestan earthquake according to macroseismic data // Strong earthquakes. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences. 1997. P. 124–129 (in Russian)].
- Шебалин Н.В.* Очаги сильных землетрясений на территории СССР. Москва: Наука. 1974. 54 с. [Shebalin N.V. Foci of strong earthquakes in the USSR. Moscow: Science. 1974. 54 p. (in Russian)].
- Baracchi M., Barzaghi L., Ceresani S. et al.* Permanent Real Time Offshore Microseismic System For Geophysical Monitoring // Offshore Mediterranean Conference. OMC-2005-079. OMC. 16–18 March 2005, Ravenna, Italy, 10 p.
- Bardet J.P., Tobita T.* NERA: a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. USA. California. Los Angeles, University of Southern California, 2001. 44 p.
- Biot M.A.* Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid // Journal of the Acoustical Society of America. V. 28. № 2. 1956, P. 168–191.
- BSSC (BUILDING SEISMIC SAFETY COUNCIL) NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures. Part 1: Provisions, Prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report FEMA 450), USA, Washington, D.C., 2003. 356 p.
- Calarco M., Zolezzi F., Parker Eric J, Traverso C.M.* Geohazards: lowering the project risk profile // Conference: Offshore Mediterranean Conference and Exhibition in Ravenna, Italy, March 25–27, 2015. P. 1–6.
- Gasparoni F., Furlan F., Bruni F. et al.* GEOSTAR-class observatories 1995–2012. A technical overview. October 2014 // Seafloor observatories: a new vision of the Earth from the Abyss, Edition: Springer-Praxis Books in Geophysical Sciences. / Editors: P. Favali, L. Beranzoli, A. De Santis. Chapter: 11. Publisher: Springer-Verlag Berlin. Heidelberg, 2014. P. 229–303. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11374-1_11.
- Gassmann, F.* Uber Die elastizitat poroser medien // Vier, der Natur Gesellschaft. 1951. № 96. P. 1–23.
- Guangren Yu., Asce M., Chock G., Asce F.* Comparison of the USA, China and Japan seismic design procedures. Conference: Civil Engineering Conference in the Asia Region CECAR 7, USA: Honolulu, Hawaii, 2016, P. 1–16.
- Mikada Hitoshi, Junichi Takekawa, Shiori Kamei.* Active and passive monitoring toward geophysical understanding of offshore interplate seismogenesis / Editor(s): Junzo Kasahara, Michael S. Zhdanov, Hitoshi Mikada. Chapter 5.7. Active Geophysical Monitoring (Second Edition), Elsevier, 2020. P. 441–463. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026847000212>.
- Nedimović Mladen R.* Ocean Bottom Seismometer Instrumentation in Canada. GCEG Recorder, V. 44. Iss. 2019. № 2. P. 12–17.
- Ocean-bottom seismographs improve data resolution offshore Australia. Oil and Gas Magazine. October. 2016. Электронный ресурс. (<https://www.ogj.com/exploration-development/article/17209751/oceanbottom-seismographs-improve-data-resolution-offshore-australia>).
- Offshore Deepwater leading the way in discovered resources. 2019. Электронный ресурс (<https://www.offshore-mag.com/deepwater/article/14036076/deepwater-leading-the-way-in-discovered-oil-and-gas-resources>).
- Paoletti L., Mouton E., Liposcak I.* Comparison of underwater MASW, Seismic CPT, and downhole methods: offshore Croatia / Project: Marine surface wave (Scholte) measurement and processing using a Scholte wave numerical model for the inversion. 2010. P. 1–9. <https://www.researchgate.net/publication/269146569>.
- Proceedings of the International Workshop on Seismic Design and Reassessment of Offshore Structures, 1992 / Ed. Iwan, Wilfred D. California Institute of Technology. (Unpublished), 1992. 213 p. https://authors.library.caltech.edu/26530/1/Iwan_1992.pdf.
- Ruiz P., Penzien J.* Probabilistic Study of Behavior of Structures During Earthquake. Earthquake engineering research center. Report №UCB/EERC 769-3. University of California, Berkley, California, March. 1969. 45 p.
- Serous A.* Seismic design in Europe and the Russian Federation. Finland. Bachelor's thesis Construction engineering Visamäki. HAMK University of Applied Sciences, 2015. 96 p. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/96440/Seismic_Design_in_Europe_and_the_Russian_Federation.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
**ON THE POSSIBILITY OF ASSESSING SEISMIC HAZARD
FOR OFFSHORE CONSTRUCTIONS ON THE CASPIAN SHELF
BY CALCULATION METHODS**

В.А. Трифонов¹, С.Ю. Милановский², I.A. Mindel¹, В.В. Несинов¹

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian, 101000; e-mail: igelab@mail.ru*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, 1232; e-mail:svetmil@mail.ru*

In recent years the world has been actively developing oil and gas fields on the shelf, including in seismically active areas. On the seabed it is very difficult to carry out qualitative geological and geophysical studies and seismological observations in full, which are a part of seismic microzoning works. Programs for computational methods during seismic microzoning allow taking into account nonlinear soil properties. In the article the experience of studies on seismic microzoning (2012–2015) for the installation area of offshore structures on the shelf of the Middle Caspian Sea is considered. In conditions of absence of observations by bottom seismic stations the possibility of seismic hazard assessment by computational methods taking into account local soil conditions is shown. Thus the obtained values of seismic intensity are lower in comparison with the results of estimations by method of engineering and geological analogies and method of seismic rigidity. Maximal impacts from zones of possible earthquake sources most dangerous for Middle Caspian Sea have been taken into account by peculiarities of spectral composition of vibrations of ground bases in the form of reaction spectra.

Keywords: Caspian Sea, zones of possible earthquake sources, accelerograms, spectrum of reaction.

Поступила в редакцию 27.06.2020 г.

После доработки 25.10.2020 г.

Принята в печать 16.12.2020 г.