

Модель сейсмической опасности северо-западной части Черного моря

© Б. Г. Пустовитенко¹, В. Е. Кульчицкий², А. А. Пустовитенко¹, 2012

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений, Симферополь, Украина

Поступила 27 апреля 2012 г.

Представлено членом редколлегии А. В. Кендзерой

Розглянуто особливості оцінки сейсмічної небезпеки морських територій. Моделювання сейсмічної небезпеки північно-західної частини шельфу Чорного моря виконано на основі розроблених моделей: сейсмічності, вогнищ, загасання інтенсивності та зон виникнення вогнищ землетрусів. Наведено карти загального сейсмічного районування шельфу для періодів повторюваності сейсмічних впливів 1 раз у 500 і 1000 років. Відповідно до цих карт, вся територія шельфу належить до сейсмічно небезпечної зони з прогнозними інтенсивностями 6 і 7 балів.

Characteristics of seismic hazard assessment of marine areas have been considered. Modeling of seismic hazard of northwestern part of the Black Sea shelf is made on the basis of the developed models of seismicity, seismic sources, attenuation of the intensity and zones of earthquakes occurrence. Maps of general seismic zoning of the shelf are presented for return periods of seismic effects once in each 500 and 1000 years. According to these maps the entire territory of the shelf refers to the seismically dangerous zone with estimated intensities of 6 and 7 points.

Постановка задачі. Сущестующие в настоящее время карты общего сейсмического районирования Украины (ОСР-2004) [Пустовитенко и др., 2006 а] и государственные нормативные документы [Будівництво ..., 2006] регламентируют проектирование и строительство только наземных зданий и сооружений. Вместе с тем в Украине активно осваиваются шельфовые территории Черного и Азовского морей для добычи и транспортировки полезных ископаемых и, соответственно, ведется строительство протяженных и экологически опасных сооружений (платформ, коллекторов, трубопроводов и др.). Северо-западная часть шельфа Черного моря относится к наиболее перспективным районам для разработки месторождений нефти и газа. В настоящее время в этом районе установлены и промышленно осваиваются месторождения углеводородного (УВ) сырья: Голицынское, Шмидта, Безымянное, Одесское, Штормовое и др. [Перерва, 2002].

Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных последних 30 лет позволила построить прогнозную карту газоносности северо-западного шельфа [Кабанов и др., 2004] Черного моря и уточнить рейтинг газоперспективности 92 структур. Таким образом, очевидно, что строительство сооружений по добыче и транспортировке УВ сырья будет продолжаться и, следовательно, актуальной остается задача обеспечения необходимой степени сейсмобезопасности этих ответственных и экологически опасных объектов. Для снижения сейсмического риска, уменьшения (предотвращения) возможных экологических последствий в результате возможных сейсмических воздействий необходимо изучить современные сеймотектонические процессы и количественно оценить долговременную сейсмическую опасность данной территории.

Первый вариант оценки сейсмической опасности и карт ОСР северо-запада шельфа Чер-

ного моря был представлен в 2007—2008 гг. [Пустовитенко и др., 2007а, 2008]. После опубликования этих работ 7 мая 2008 г. на исследуемой территории произошло наиболее сильное землетрясение за весь период высокочувствительных инструментальных наблюдений с магнитудой $M_w = 4,8$ [Пустовитенко и др., 2010], M_s (MLH) = 4,4, $M_c = 5,1$ [Каталог ..., 2010] и расчетной интенсивностью в эпицентре $I = 6$ баллов при глубине очага 10 км. Это послужило поводом к дополнительному изучению сейсмичности, физических процессов в очаговых зонах местных землетрясений и уточнению степени сейсмической опасности северо-западной части Черного моря. В настоящей работе на основе новых данных рассчитаны параметры уточненных прогнозных моделей сейсмической опасности северо-западной части шельфа Черного моря для периодов повторяемости 1 раз в 500 и 1000 лет.

Общая характеристика сейсмичности района исследований. Основную сейсмическую опасность для территории северо-западной части Черного моря представляют сильные землетрясения крупных сейсмотектонических структур глубоководной зоны Вранча, района Добруджи и Крымско-Черноморского региона, а также локальных и местных сейсмоактивных структур шельфа и глубоководной части впадины Черного моря (рис. 1).

Сейсмичность зоны Вранча достаточно полно изучена и детально рассмотрена во многих работах [Radu et al., 1994; Oncescu et al., 1999; Алказ, 2007 и др.]. Это наиболее сейсмоактивная зона с наблюдаемыми магнитудами землетрясений в диапазоне $M_w = 6,0 \div 7,5$ и прогнозными магнитудами $M_w = 8$ на глубинах до 200 км [Пустовитенко и др., 2006а; Алказ, 2007]. Область сейсмических воздействий от этих подкорковых землетрясений охватывает всю территорию Украины [Карпатское ..., 1980]. Экстраполяция наблюдаемых изосейст на морскую территорию показывает, что в районе западной части шельфа известные сильнейшие землетрясения Вранча могли создавать сотрясения до 6 баллов.

За историческое время известно несколько землетрясений района Добруджа с глубинами очагов в земной коре, магнитудами $M = 3,5 \div 7,0$, интенсивностью в эпицентре $I = 5 \div 8$ баллов [Никонов, Никонова, 1990] и прогнозными значениями максимально возможных магнитуд $M_w = 7$ [Пустовитенко и др., 2004]. За последние 20 лет в этом районе произошло четыре ощутимых события: 9 ноября 1981 г. ($M = 4,5$), 13 ноября 1981 г. ($M = 5,2$), 12 марта 1985 г.

($M = 3,5$), 3 октября 2004 г. ($M = 4,5$). Сведений об ощущаемости более слабых землетрясений, произошедших в районе устья р. Дунай 4 января 2006 г. ($M = 3$) и на юге Одесской обл. 10 апреля 2008 г. ($M = 2,8$), не имеется [Каталог ..., 2008, 2011 а].

Для восточного края рассматриваемой территории шельфовой зоны сейсмически опасными являются сильные землетрясения западной части Крымско-Черноморского региона с прогнозными значениями магнитуд для крупных линейментов в интервале $M_w = 6,0 \div 7,2$ [Пустовитенко и др., 1999].

Местная сейсмичность, связанная с тектоническими нарушениями в фундаменте южного края Восточно-Европейской платформы, разрывными нарушениями в области шельфа и континентального склона западной части Черного моря, установлена высокочувствительными сейсмическими наблюдениями региональной сети станций Крыма. За период высокочувствительных инструментальных наблюдений с 1955 г. из этого района зарегистрировано несколько десятков относительно слабых землетрясений с магнитудами $M_w = 2,5 \div 4,8$ (рис. 1), что соответствует интенсивности в эпицентральной зоне $I_0 = 4—7$ баллов (при глубине очагов $h \sim 10$ км). Наиболее сильное из них 7 мая 2008 г. с $M_w = 4,8$, произошедшее в районе о-ва Змеиный, ощущалось на территории юго-запада Одесской обл. с интенсивностью до 4 баллов [Скляр, Князева, 2010]. Землетрясение сопровождалось тремя повторными толчками, наиболее сильное из которых с магнитудой $M_w = 3,7$ произошло 4 июля 2008 г.

Всплеск сейсмической активности в этом районе был отмечен также в 1992 г. Тогда накопленная энергия в сейсмотектонических структурах северо-западной части шельфа Черного моря вблизи о-ва Змеиный разрядилась в виде сложной последовательности сейсмических толчков с энергетическими классами $K = 7,1 \div 11,5$ ($M = 2,0 \div 3,8$) и глубинами очагов до 10 км (рис. 1). Главный толчок с $K = 11,5$ предварялся двумя форшоками с $K = 9,5$ и $K = 10,4$ и сопровождался шлейфом из 18 повторных толчков. При этом наиболее слабые толчки на уровне $K < 8$ были зарегистрированы только высокочувствительными станциями "Донузлав" и "Севастополь" [Каталог ..., 1995]. К этой же группе очагов относятся землетрясения 5 ноября 1998 г. с магнитудой $M_w = 4,5$ и 15 марта 2009 г. с $M_w = 3,2$ [Каталог ..., 2000, 2011 б]. Пространственная локализация морских эпицентров вытянута вдоль диагонального северо-восточного

направления, параллельно береговой линии (рис. 1).

Сведения об исторической сейсмичности данного района отсутствуют из-за удаленности от населенных пунктов. Можно отметить только упоминаемую в документах информацию о землетрясении 1865 г. с неуверенными координатами очага $\varphi = 44,5^\circ \pm 2^\circ$, $\lambda = 29,5^\circ \pm 2^\circ$ [Новый ..., 1977].

Регистрационные возможности сети сейсмических наблюдений в районе шельфа северо-запада Черного моря

Представительность сети станций. Слабая изученность сейсмичности шельфа северо-запада Черного моря обусловлена отсут-

ствием близко расположенных высокочувствительных станций, способных регистрировать слабые землетрясения. Ближайшая сеть, существующая с 1928 г., расположена на Крымском полуострове. Даже при наивысшей чувствительности (период 1980—1995 гг.) сейсмическая сеть Крыма была способна регистрировать только события с энергетическими классами порядка $K \geq 8$ [Кульчицкий, Пустовитенко, 2008]. Землетрясения с меньшими энергиями были "прозрачны" для сети и не регистрировались.

В настоящее время Крымская сеть, оснащенная цифровой сейсмической аппаратурой, имеет практически такие же регистрационные возможности для района северо-запада

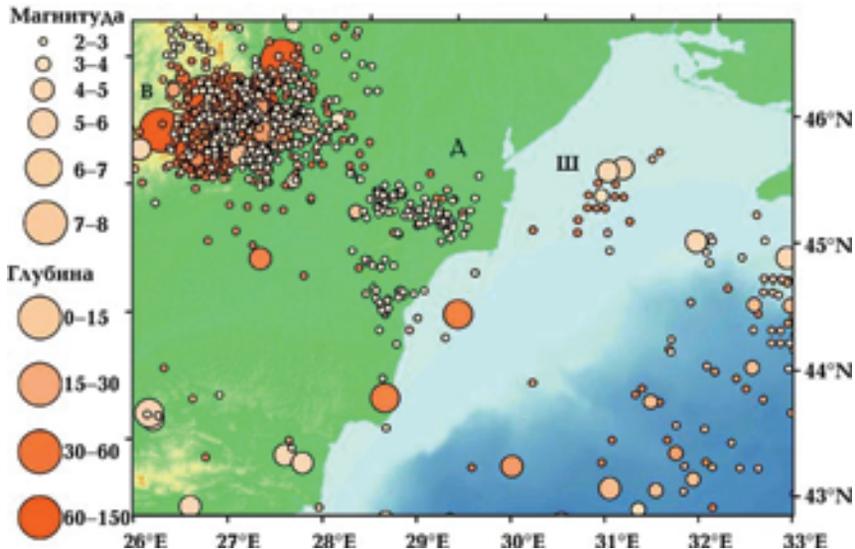


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений северо-западной части Черного моря. Размеры кружков пропорциональны магнитудам землетрясений. Цветом ранжированы глубины очагов. Районы: В — Вранча; Д — Добруджа; Ш — шельф.

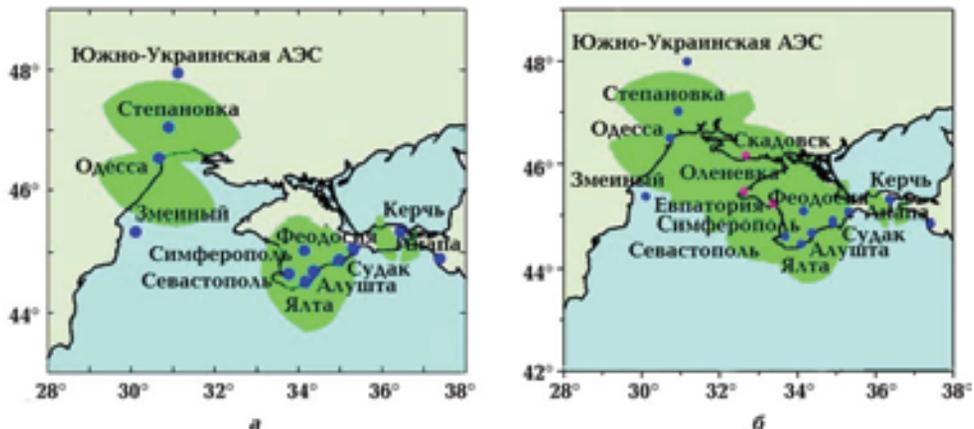


Рис. 2. Области представительности землетрясений (отмечены зеленым цветом) энергетического класса $K = 7,5$: а — современное состояние; б — необходимая оптимальная система регистрации.

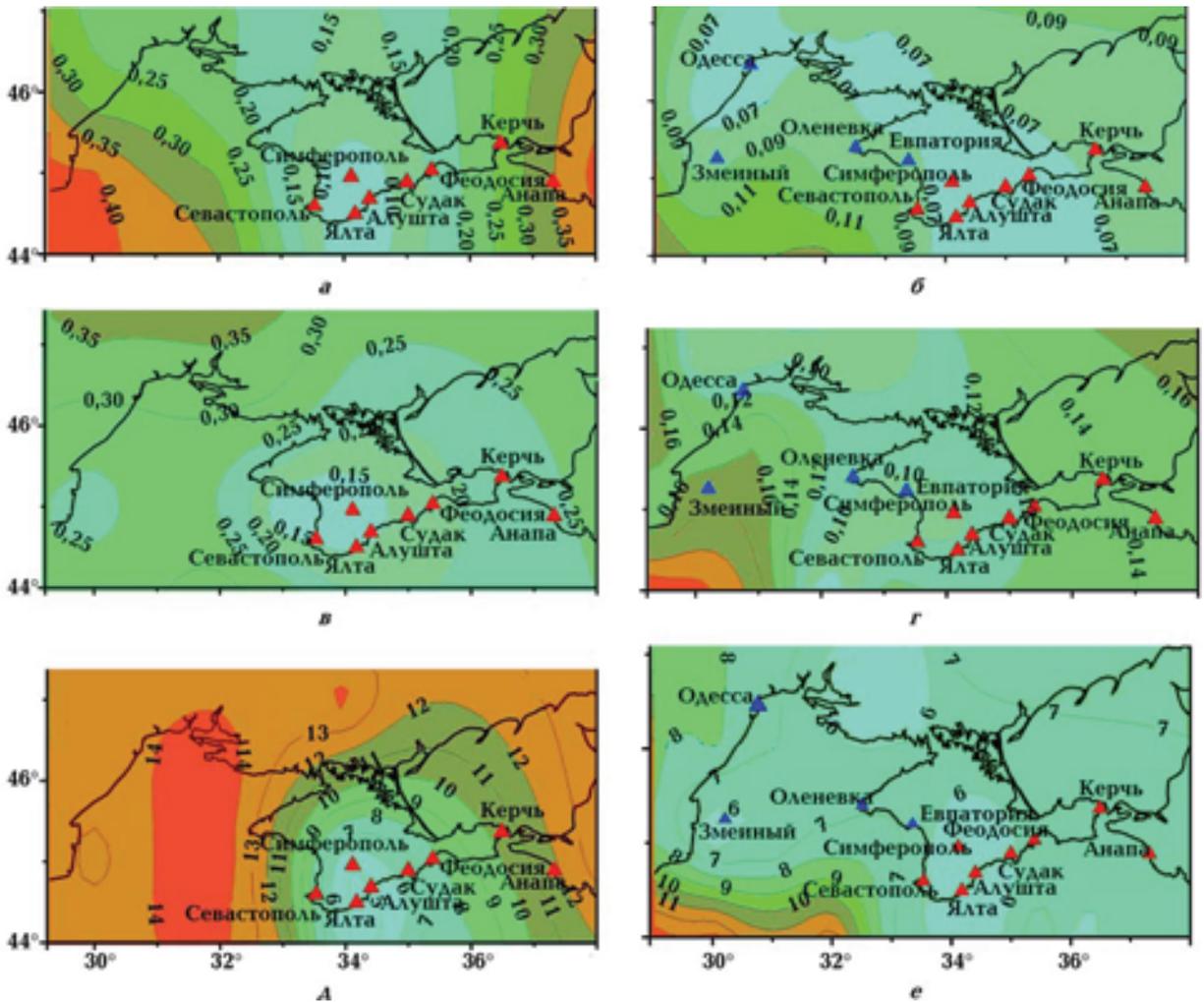


Рис. 3. Погрешности в определении параметров эпицентров землетрясений северо-западной части региона: а, б — широты эпицентра; в, г — долготы эпицентра; д, е — глубины очагов; а, в, д — современное состояние; б, г, е — перспектива.

Черного моря, как и при сети с аналоговой аппаратурой [Свидлова и др., 2011]. В последнее десятилетие были установлены сейсмические станции в Одессе (с 2008 г.), Одесской обл. (с. Степановка), на Южно-Украинской АЭС, на о-ве Змеиный, которые пока не включены в сейсмическую службу. Расположенные северо-западнее и западнее, эти станции улучшают регистрацию слабых землетрясений северо-западного района Черного моря. При этом область представительных землетрясений с энергетическими классами $K = 7,5$ охватывает только часть территории шельфа, даже с учетом упомянутых новых станций (рис. 2, а).

Исходя из логлинейного закона повторяемости землетрясений (табл. 1), количество не-

зарегистрированных (пропущенных) землетрясений за период наблюдений 1955—2011 гг. из рассматриваемого района составляет порядка 40 событий на уровне $K = 7 + 8$. Пополнение статистики по слабым сейсмическим событиям и покрытие всей северо-западной части Черного моря областью представительных землетрясений могут быть осуществлены при условии открытия дополнительных пунктов сейсмических наблюдений на Тарханкутском полуострове (пгт. Оленевка), в г. Евпатория и в районе г. Скадовск (Херсонская обл.). В 2011 г. отделом сейсмологии Института геофизики НАН Украины проведены изыскания и выбраны места с низким уровнем естественных помех в пгт. Оленевка и районе г. Евпатория для организации в них стационарных

сейсмологических наблюдений в непрерывном режиме. Включение в систему наблюдений этих 2 сейсмических пунктов расширит границы представительности слабых землетрясений в западной части региона на уровне $K = 7,5$ (рис. 2, б).

Погрешности определения основных параметров землетрясений. Для существующей сети сейсмических станций в исследуемом районе расчетные максимальные погрешности определения географической широты эпицентров землетрясений составляют $\delta\varphi = 0,25^\circ \div 0,3^\circ$, долготы $\delta\lambda$ — примерно такие же значения, глубины — δh до 14 км (рис. 3, а, в, д). Такие погрешности обусловлены, в основном, тем, что станции находятся достаточно далеко от очагов на расстояниях регистрации головных волн, не позволяющих точно локализовать глубину очага. Азимутальное окружение очаговой зоны сейсмическими станциями имеют два пустых азимутальных сектора $\approx 40^\circ \div 90^\circ$ и $\approx 120^\circ \div 230^\circ$. Это затрудняет увеличение площади области представительной регистрации землетрясений и уменьшение погрешности в определении основных параметров землетрясений. Включение в непрерывную систему мониторинга новых станций в западной части региона приведет к значительному повышению точности локализации гипоцентров землетрясений (рис. 3, б, г, е).

Особенности оценки сейсмической опасности территорий морского дна. Основу современной методологии оценки сейсмической опасности составляют новые представления о сейсмогеодинамике, которая рассматривает сейсмичность как результат деформирования земной коры и литосферы с учетом ее слоисто-блоковой структуры, особенностей прочностных свойств среды, процессов разрушения, фрактального характера сейсмического процесса, подобия структур на различных иерар-

хических масштабных уровнях [Уломов, 1999]. Эта методология применялась при оценке сейсмической опасности и разработки карт общего сейсмического районирования (ОСР) территории Северной Евразии, Российской Федерации и Украины [Уломов, Шумилина, 1998; Уломов, 1999; Пустовитенко и др., 2006а].

Существующие карты ОСР различных масштабов охватывают лишь материковую часть и учитываются при строительстве только наземных объектов. Для акваторий Черного и Азовского морей карты ОСР до настоящего времени не были разработаны и соответственно не включены в нормативные документы ДБН Украины В.1.1.12-2006 [Будівництво ..., 2006].

Оценка сейсмической опасности морских территорий имеет свои особенности и трудности. Это связано, прежде всего, с тем, что количественные оценки сейсмических воздействий получены на материковой части и их экстраполяция на морскую территорию требует специального обоснования и исследования.

Проблемы и трудности оценки сейсмической опасности морских территорий подробно изложены в работах [Иващенко и др., 1990; Кузин, 1990]. Основные проблемы: каталоги исторических землетрясений, которые определяют статистику сильнейших землетрясений, для морских территорий неполны и часто недостоверны; подводные участки практически недоступны для прямых сейсмодатонических и геологических исследований; типичной особенностью морских площадок является наличие поверхностного слоя рыхлых, водонасыщенных осадков, практически отсутствующих на суше.

Перечисленные особенности оценки сейсмической опасности шельфовых зон требуют решения специфических задач [Кузин, 1990]: оценка влияния толщины водного слоя и реакции обводненных грунтов на сейсмические

Т а б л и ц а 1. Параметры моделей сейсмичности сейсмоактивных регионов, вносящих вклад в сейсмическую опасность северо-западной части Черного моря

| Параметр | Крым | Вранча | | Добруджа | Северо-западный шельф | Платформенная область |
|------------|---------|-------------|-------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| | | $h > 70$ км | $h < 70$ км | | | |
| A_6 | 0,007 | 0,12 | 0,004 | 0,005 | 0,001 | 0,0001 |
| b | 0,79 | 0,72 | 0,86 | 0,86 | 0,63 | 0,7 |
| h | 5—40 | 80—200 | 10—70 | 10—30 | 5—15 | 5—15 |
| M_{\max} | 6,0—7,2 | 7,5—8,0 | 6,0—6,5 | 5,5—7,0 | 5,5 | 4,0—4,5 |

воздействия; оценка интенсивности гидравлического удара при различных интенсивностях сотрясений дна, возможности возникновения повторных ударов вследствие интерференционных явлений в слое воды и цунами при подводных землетрясениях, а также оценка вероятности возникновения подводных оползней, разжижение грунта и т. д.

Необходимо также учесть изменение сейсмического режима в районах эксплуатации подводных месторождений УВ сырья. При этом возникает эффект наведенной сейсмичности, который может значительно увеличить величину прогнозируемой интенсивности.

В Украине исследования шельфовых областей с указанных и более упрощенных позиций до настоящего времени не проводились из-за отсутствия необходимых средств на крупномасштабный эксперимент. В этих условиях нами использованы экспериментальные данные, полученные при сейсмологических наблюдениях сильных движений грунта и проведении микрорайонирования с помощью донных сейсмографов в других районах [Катренко и др., 1990; Ковачев и др., 2002, 2003; Кузин и др., 2009] в предположении, что подобные результаты могут иметь место и применительно к северо-западу шельфа Черного моря.

Так, согласно результатам исследования спектральных мощностей ускорений грунта при землетрясении, зарегистрированном донными и наземными акселерографами на о-ве Шикотан [Катренко и др., 1990] (рис. 4), по амплитудному уровню записи мало различаются. Следовательно, интенсивности сотрясений на суше и на морском дне примерно одинаковы. Различие состоит только в частотном наполнении спект-

ра. Например, на спектре записи донного акселерометра практически отсутствуют высокочастотные компоненты. Численный эксперимент, оценивающий влияние водного слоя и водонасыщенности на спектр движения почвы, показывает аналогичное явление затухания высокочастотных компонент [Spudich, Orcutt, 1982].

Кроме того, работами по сейсмическому микрорайонированию, проведенными в последние годы с помощью донных сейсмографов на шельфе Черного и Каспийского морей [Кузин и др., 2009], установлено, что приращения сейсмической интенсивности за счет грунтовых условий на морских территориях находятся в тех же пределах, как и на материковой части и в целом колеблются в интервале от -1 до $+1$ балла с преобладанием приращений вблизи нуля (рис. 5).

В местах установки донных станций ДС2 по 15 определениям получен диапазон приращения интенсивности $-0,85 \pm 0,44$ при среднем округленном -1 балл, а в пунктах ДС1, ДС3 и ДС5 — нулевое приращение с незначительным среднеквадратичным разбросом данных соответственно по 21, 18 и 17 замерам максимальных спектральных амплитуд [Кузин и др., 2009, табл. 2, с. 74]. Таким образом, можно считать допустимым применение существующих методик оценки сейсмической опасности континентальных территорий к шельфовым районам. Поэтому в данной статье расчеты сейсмической опасности северо-западной части шельфа Черного моря проведены с учетом средних грунтовых условий (как для материковой части) по методике, аналогичной той, которая была использована при разработке карт ОСР Евразии

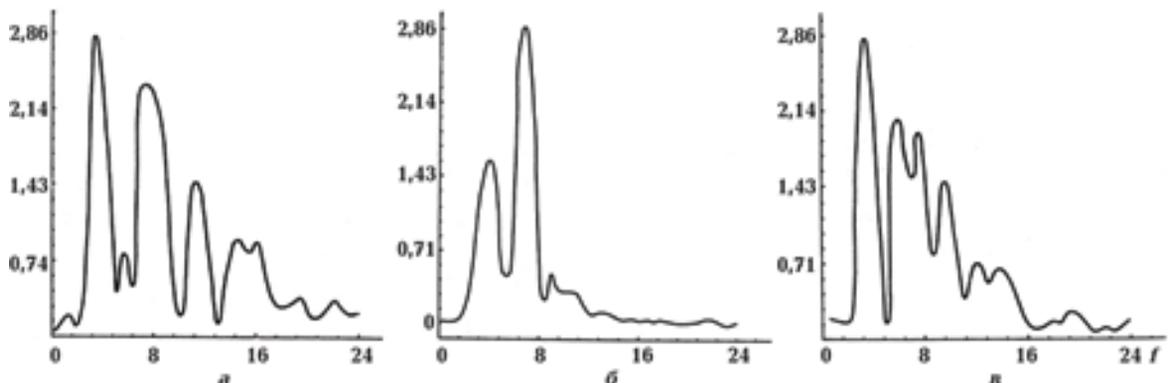


Рис. 4. Сглаженные спектры мощности ускорений грунта при землетрясении 20 августа 1988 г. [Катренко и др., 1990]. S-волны, зарегистрированные акселерометрами (о-в Шикотан): а — береговым, б — донным, в — наземным.

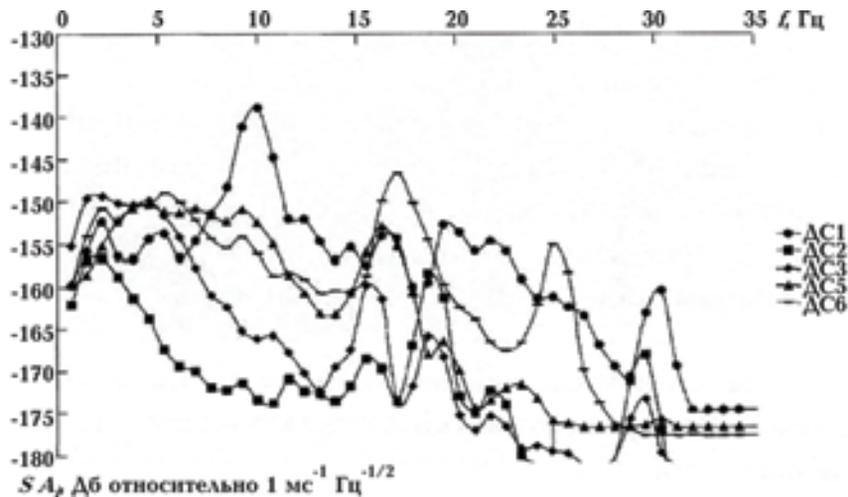


Рис. 5. Спектры колебаний грунта в разных точках наблюдения донными станциями (ДС1-ДС6) [Кузин и др., 2009].

и Украины [Уломов, 1999; Пустовитенко и др., 2006а].

Прогнозная модель сейсмической опасности. В качестве исходного материала оценки сейсмической опасности использовано пять взаимосвязанных моделей: сейсмичности, очага, зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ), затухания интенсивности с расстоянием, сейсмических воздействий [Уломов, 1999].

Для построения **модели сейсмичности** с целью оценки сейсмической опасности необходимо знать пространственно-временное распределение количественных параметров долговременной сейсмичности или сейсмического режима [Ризниченко, 1965.]. К таким параметрам прежде всего относятся: сейсмическая активность, закон повторяемости землетрясений (закон Гутенберга — Рихтера), магнитуда максимально возможного землетрясения в конкретных структурах, мощность сейсмоактивного слоя литосферы [Шебалин, 1971].

Главная характеристика долговременного сейсмического режима — закон повторяемости землетрясений $N(M)$ — статистическая функция распределения частоты N возникновения очагов землетрясений по величине энергий [Писаренко, 1989] (магнитуд M или энергетических классов K). В среднем экспериментальный график функции $N(M)$ в первом приближении прямолинеен и описывается уравнением

$$N = N_0 10^{-b(M - M_0)}.$$

Здесь b — угловой коэффициент наклона пря-

мой, аппроксимирующей график повторяемости, характеризует “сейсмическую дробность” среды, по определению Н. В. Шебалина [Шебалин, 1997], и имеет смысл фрактальной размерности [Писаренко, 1989; Садовский, Писаренко, 1991].

Сейсмическая активность $A = \lg N_0$ — это логарифм плотности потока эпицентров фиксированной магнитуды M_0 , т. е. логарифм средней частоты повторения землетрясений определенной величины энергии в магнитудах в единице объема (или площади) за единицу времени. В сейсмологической практике принято активность рассчитывать по $M_0 = 6$ или по энергетическим классам $K_0 = 10$ либо $K_0 = 15$.

Величина сейсмической активности также определялась методом суммирования по формуле [Ризниченко, 1985]:

$$A = \frac{(1 - 10^{-b})}{10^{-b(M_{\min} - M_0)}} \frac{S N_{\Sigma}}{\Delta S T},$$

где N_{Σ} — общее число землетрясений, начиная с M_{\min} и выше на площади осреднения ΔS ; M_0 — магнитуда, по которой определяется активность; S — соответствующая фиксированная единичная площадка суммирования; T — время наблюдения. Карты активности строятся *методом либо постоянной точности, либо постоянной детальности.*

Нами использовался комбинированный метод — *метод установленного качества*, когда в зависимости от плотности эпицентров подбиралось разумное соотношение между точно-

стью (по количеству N_{Σ}) и детальностью $\left(\frac{1}{\Delta S}\right)$.

Третья количественная величина сейсмического режима — сейсмический потенциал или максимально возможное (предельное по энергии) землетрясение с M_{\max} . Величина M_{\max} может быть определена по правому краю графика повторяемости $N_{\Sigma}(M)$ или по геолого-геофизическим признакам.

Мощность сейсмоактивного слоя, или диапазон глубин $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$, занятый очагами землетрясений, является четвертым важным параметром сейсмичности.

В зависимости от свойств и напряженно-деформированного состояния глубинной среды землетрясения возникают на разных глубинах литосферного слоя. Чем сильнее землетрясение, тем большие объемы среды участвуют в его формировании. Для каждого элемента зон ВОЗ в диапазоне Δh существует предельная глубина, выше которой не могут возникать землетрясения с $M_i > M_{\max}$, т. е. с ростом глубины возрастают потенциальные возможности активного слоя среды.

Сейсмический режим западной части Черного моря изучен по материалам инструментальных наблюдений за период 1955—2011 гг. с выборкой данных по землетрясениям с $M_w > 2$ в пределах географических координат: $\varphi = 44^{\circ} \div 46^{\circ}$; $\lambda = 30^{\circ} \div 32^{\circ}$. Число землетрясений N нормировано на время T и площадь S , сейсмическая активность A_6 рассчитана для уровня магнитуды $M_w = 6$ с учетом единого для данной территории закона повторяемости (рис. 6).

Кумулятивный график распределения $N_{\Sigma}(M)$ построен по всем магнитудам M землетрясений, начиная от представительной M_i и выше с подклассовыми интервалами $M \pm 0,25$. Получено, что в целом для всей совокупности землетрясений график повторяемости прямолинеен и описывается логлинейной зависимостью (рис. 6):

$$\lg N_{\Sigma} = -(0,63 \pm 0,05) M_w + (3,7 \pm 0,24), \rho = 0,98.$$

Аппроксимация экспериментальных точек на графике проводилась с использованием ортогональной регрессии.

Расчет долговременной сейсмической активности выполнен методом установленного качества для всей шельфовой зоны с шагом $\Delta S = 0,2^{\circ}$, $N_{\Sigma} > 3$ за период 1955—2011 гг. (рис. 7, а) и отдельно для района наибольшей плотнос-

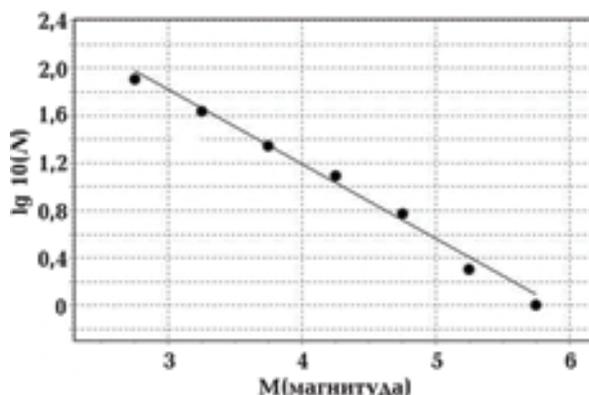


Рис. 6. Повторяемость землетрясений западной части Черного моря за период 1955—2011 гг.

ти эпицентров района о-ва Змеиный с шагом $\Delta S = 0,1^{\circ}$ за более короткий интервал времени 1992—2011 гг. (рис. 7, б). Отчетливо видна пространственная неоднородность поля активности A_6 с максимальными вершинами в западной части шельфа (район о-ва Змеиный) и в восточной — вблизи Крыма. Наиболее высокий уровень сейсмической активности $A_6 = 0,001$ относится к локальному сейсмическому линейменту северо-восточного простираения на северо-западе шельфа.

В детальном масштабе также выделяются места с максимальным и минимальным уровнями активности. Пиковое значение $A_6 = 0,007$ относится к очаговой зоне землетрясения 7 мая 2008 г. (рис. 7, б) и является временной флуктуацией сейсмичности на фоне средних долговременных параметров и потому далее при построении модели не учитывалось (табл. 1).

Другие параметры модели сейсмичности: мощность сейсмоактивного слоя или диапазон глубин очагов землетрясений ($h = 5—15$ км) оценен по инструментальным данным для всей шельфовой зоны; $M_{\max} = 5,5$ — максимально возможная магнитуда землетрясения в локальном сейсмолинейменте, входящим в крупный геоструктурный домен.

Параметры моделей сейсмичности сопредельных территорий взяты из работ [Пустовитенко и др., 2006 а, Пустовитенко, 2008].

Итоговые параметры моделей сейсмичности сейсмоопасных районов, оказывающих воздействие на морскую территорию северо-западной части Черного моря, даны в табл. 1.

Отметим, что в табл. 1 указаны долговременные параметры: A_6 — наибольшее значение; b — среднее для региона; h — весь диапазон сейсмоактивного слоя в регионе; M_{\max}

Т а б л и ц а 2. Основные параметры изученных землетрясений в районе шельфа Черного моря

| № п/п | Дата | | | Время в очаге | | | Координаты гипоцентра | | | Энергетические характеристики | |
|-------|------|-------|------|---------------|-----|------|-----------------------|-----------------|----------|-------------------------------|-----------|
| | год | месяц | день | ч | мин | с | φ° | λ° | h , км | M_w | $M_s(mb)$ |
| 1 | 1972 | 08 | 06 | 0 | 53 | 10 | 44,6 | 32,7 | 15 | 4,8 | (4,8) |
| 2 | 1988 | 04 | 02 | 08 | 13 | 07,6 | 44,98 | 32,01 | 33 | 4,2 | 4,4(4,5) |
| 3 | 1992 | 03 | 29 | 23 | 46 | 13,4 | 45,26 | 31,02 | 10 | 4,3 | (3,3) |
| 4 | 1998 | 10 | 18 | 05 | 22 | 10,0 | 44,05 | 33,68 | 22 | 4,9 | 4,3 |
| 5 | 2008 | 05 | 07 | 08 | 00 | 21,1 | 45,34 | 30,95 | 11 | 4,8 | 4,5(4,8) |

Примечание. Приведены основные параметры землетрясений по данным региональных станций Крыма.

— наибольшее значение для крупных структур зон ВОЗ. При расчете сейсмической опасности для каждого элемента зон ВОЗ (линеамента или домена) все параметры сейсмичности вычислялись отдельно.

Как видно из табл. 1, северо-западная часть шельфа Черного моря по параметрам сейсмического режима относится к умеренным сейсмическим регионам, в котором сейсмическая активность A_6 почти в 100 раз ниже, чем в зоне Вранча, и превосходит на порядок только сейсмичность платформенной области. Значение сейсмической дробности параметра b также меньше аналогичных параметров для всех остальных сейсмически опасных регионов. Сейсмический потенциал наиболее крупных структур, определяющий максимально возможную магнитуду землетрясений (M_{max}), существенно различен: наибольшие $M_{max} = 8$ возможны в

зоне Вранча, а наименьшие $M_{max} = 4,5$ — на платформенной территории. Значения A_6 и b платформенной территории взяты из работы [Ананьин, 1990].

Модель очага крупных линеаментов зоны Вранча и Крыма принята по параметрам очагов сильных землетрясений, как и при разработке комплекта карт ОСР территории Украины [Пустовитенко и др., 2006а].

В основу моделей очагов землетрясений шельфа западной части Черного моря положены данные о механизмах очагов наиболее сильных землетрясений ($M_w > 4$) и параметров разрывов, восстановленных по волновым формам записей объемных волн [Пустовитенко, 2003; Пустовитенко и др., 2007б, 2010]. Основные параметры изученных землетрясений шельфовой зоны даны в табл. 2, а их очаговые параметры — в табл. 3, 4.

Т а б л и ц а 3. Параметры механизмов очагов землетрясений

| № п/п, см. табл. 2 | Дата | Нодальные плоскости | | | | Оси главных напряжений | | | | | |
|--------------------|------|---------------------|----|-----|----|------------------------|----|-----|----|-----|----|
| | | NP1 | | NP2 | | P | | N | | T | |
| | | STK | DP | STK | DP | AZM | PL | AZM | PL | AZM | PL |
| 1 | 1972 | 131 | 69 | 228 | 72 | 90 | 28 | 265 | 62 | 359 | 2 |
| 2 | 1988 | 80 | 59 | 303 | 40 | 188 | 10 | 94 | 22 | 301 | 66 |
| 3 | 1992 | 122 | 86 | 263 | 4 | 35 | 48 | 302 | 2 | 210 | 42 |
| 4 | 1998 | 239 | 81 | 343 | 33 | 304 | 29 | 53 | 32 | 181 | 45 |
| 5 | 2008 | 81 | 45 | 264 | 45 | 172 | 0 | 82 | 1 | 172 | 90 |

Т а б л и ц а 4. Параметры разрывов в очагах землетрясений

| № п/п, см. табл. 2 | Дата | Az1, градусы | L1, км | C1, км/с | T1, с | Az2, градусы | L2, км | C2, км/с | T2, с |
|--------------------|------|--------------|--------|----------|-------|--------------|--------|----------|-------|
| 1 | 1972 | 250 | 10 | 3,5 | 2,8 | 250 | 11 | 4,8 | 2,3 |
| 2 | 1988 | 265 | 11 | 5,5 | 2 | — | — | — | — |
| 3 | 1992 | 140 | 7 | 3,4 | 2,1 | 264 | 26 | 5,2 | 5 |
| 4 | 1998 | 208 | 12 | 5,1 | 3,8 | 133 | 5 | 2,9 | 1,7 |
| 5 | 2008 | 138 | 25 | 4,9 | 5 | 274 | 29,6 | 5,1 | 5,7 |

Для большинства изученных землетрясений преобладают взбросо-сдвиговые подвижки с диагональной ориентацией крутопадающих плоскостей разрывов (рис. 8, а) и западное, юго-западное направления процессов разрывообразования в очаговых зонах (рис. 8, б).

Модели очагов сильных землетрясений сопредельных сейсмостектонических структур (крупных линеаментов), необходимых для интегральной оценки сейсмической опасности, приведены в работе [Пустовитенко и др., 2006 а]. Для доменов и линеаментов более низкого ранга, для которых очаговые параметры трудно определить, использована модель очагов с произвольной ориентацией разрывов. Такой подход оправдан тем, что вариации в модели очагов вносят наименьшую погрешность в расчетную интегральную интенсивность [Пустовитенко и др., 2006 б]

Модель зон ВОЗ представлена в виде сводной линеаментно-доменной схемы, состоящей из зон ВОЗ района Вранча, Добруджи, платформы, юга Украины [Пустовитенко и др., 1999; 2004], дополненная крупным доменом, простирающимся от западного побережья Крыма и охватывающим исследуемую территорию шельфа. Внутри этого домена выделена структура (локальный линеамент) с максимальным уровнем сейсмической активности и $M_{\max} = 5,5$. Для каждой модели зон ВОЗ подбирались модели сейсмичности и модели очагов, описанные выше.

В модели затухания интенсивности использована комбинированная модель, учитывающая анизотропный характер спада интенсивности от глубокофокусных землетрясений зоны Вранча и изотропный — для остальных коровых землетрясений. Функция затухания интенсивности с расстоянием в направлении на шельфовую зону, расположенную в азимуталь-

ном створе $Az = 60^\circ - 90^\circ$ по отношению к очаговой зоне Вранча (рис. 9), получена по реально наблюдаемым интенсивностям от сильнейших землетрясений 1977, 1986 и 1990 гг. [Пустовитенко и др., 2002].

Для описания макросейсмического поля сейсмических событий района Добруджи, Крыма и локальных структур шельфа использована изотропная модель Блейка — Шебалина со стандартными параметрами [Новый ..., 1977]. Расчет затухания интенсивности проводился согласно методике [Гусев, Шумилина, 1999].

Модель сейсмических воздействий. В соответствии с принятыми исходными параметрами перечисленных моделей создавались каталоги модельных землетрясений. Для этого в каждом элементе линеаментно-доменной модели с помощью датчика равномерно распределенных псевдослучайных чисел на интервале 50 000 лет случайно "разбрасывались" точечные "очаги" с магнитудами до M_{\max} . При этом соблюдалось статистическое подобие модельных и реальных сейсмических событий по параметрам сейсмического режима, структуре полей эпицентров внутри слоя домена или линеамента. Для землетрясений с магнитудой более 6 модельный очаг представлял собой площадку, ориентированную в пространстве в соответствии с механизмами очагов реальных землетрясений. Площадка-очаг состояла из точечных когерентных излучателей.

Для любой заданной точки земной поверхности, в соответствии с моделью затухания интенсивности, от каждого модельного источника излучения рассчитывались интегральные интенсивности максимальных возможных сотрясений. Затем проводился расчет интенсивностей для различных средних периодов T их повторения. В связи с установленной реальной пуассоновой статистикой распределения

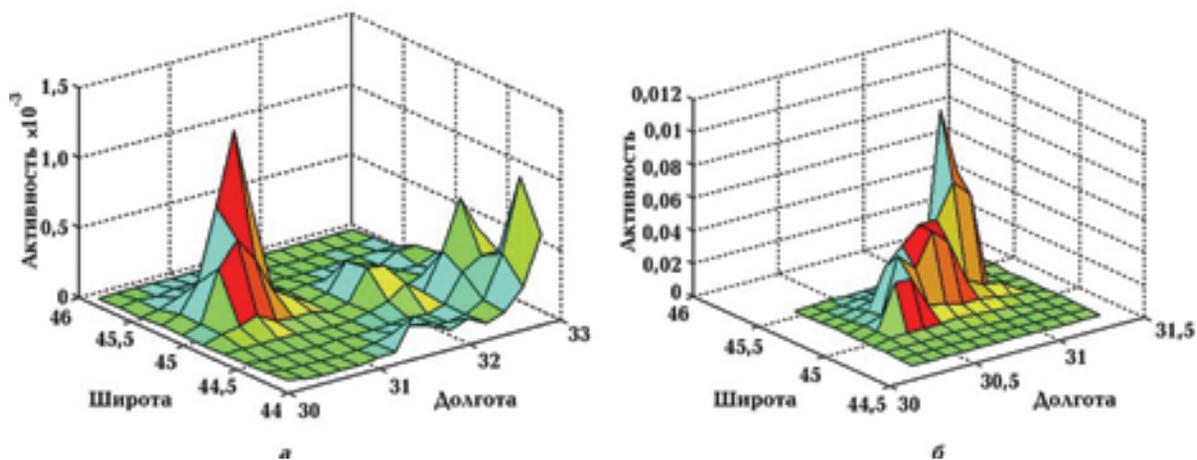


Рис. 7. Поверхности сейсмической активности (A_6) западной части Черного моря: *а* — обзорная для всего района шельфа за период 1955—2011 гг.; *б* — детальная для района о-ва Змеиний.

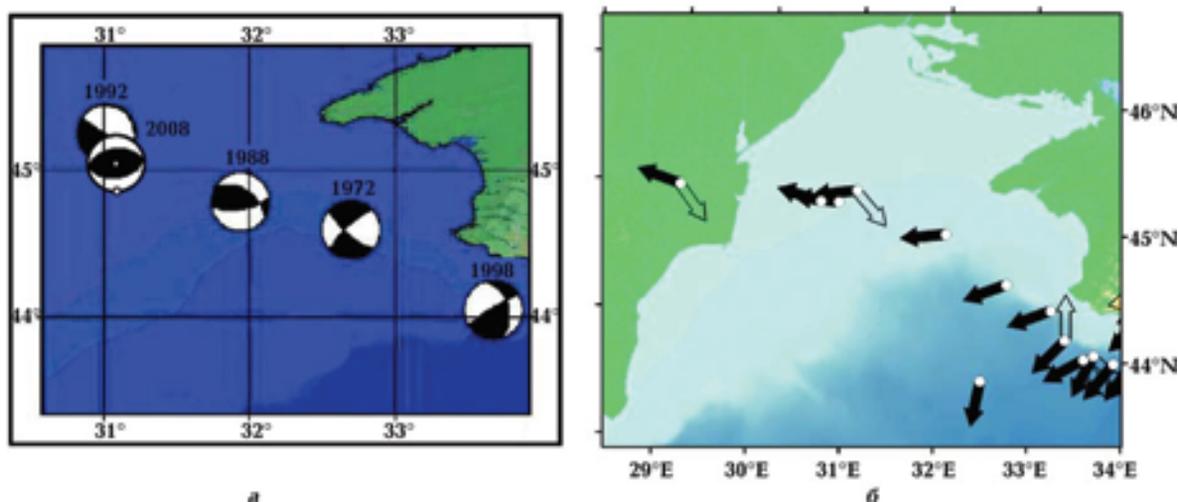


Рис. 8. Пространственное положение очаговых параметров землетрясений западной части Черного моря: *а* — диаграммы механизмов; *б* — направления разрывов.

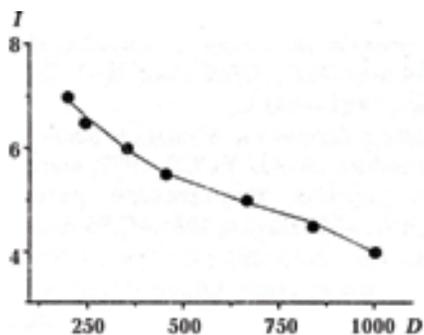


Рис. 9. Кривая затухания интенсивности I с расстоянием D в азимутальном створе $Az = 60^\circ$ — 90° .

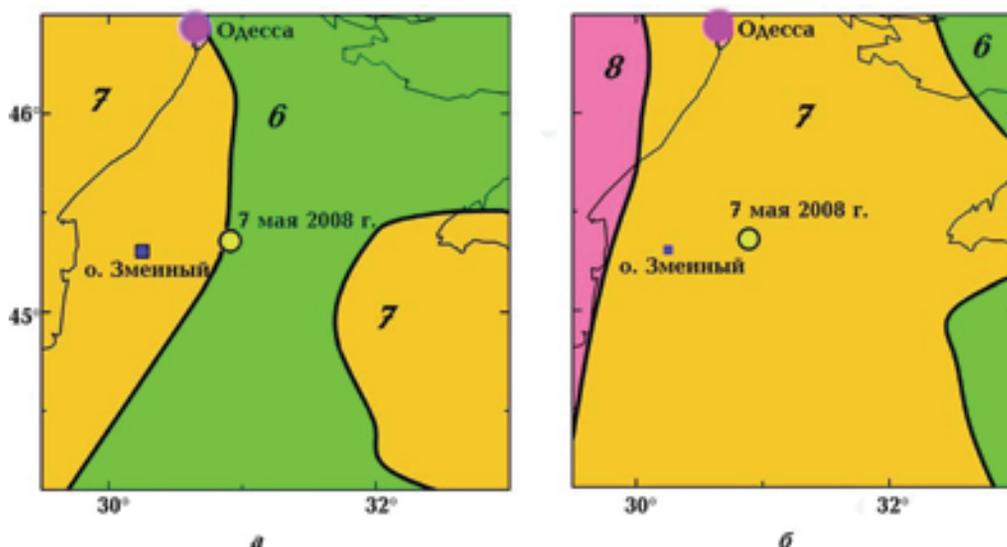


Рис. 10. Карта-схема общего сейсмического районирования северо-западной части шельфа Черного моря для периодов повторяемости: а — 500 лет; б — 1000 лет. Кругом отмечен эпицентр землетрясения 7 мая 2008 г.

времен сейсмических событий вычислялась вероятность P непревышения расчетной интенсивности в течение последующего выбранного промежутка времени (в данном случае 50 лет).

Картирование расчетных значений сейсмической опасности в терминах интенсивности в сейсмических баллах I по шкале MSK-64 выполнено для периодов повторяемости интенсивностей $T=500$ лет с вероятностью непревышения $P=0,9$ и $T=1000$ лет с вероятностью $P=0,95$ (карта ОСР-А и ОСР-В) (рис. 10) в масштабе 1 : 1 000 000.

Суммарная интенсивность от всех очаговых зон рассчитывалась с точностью до сотых долей балла в узлах сетки с ячейкой размером $0,1 \times 0,1^\circ$. Затем для каждого периода выбранных интенсивностей сглаживались числовые поля и выделялись области, оконтуренные величинами в интервалах $(I_0 - 0,5, I_0 + 0,5)$ балла, где I_0 — целое число, которое присваивалось оконтуренной области.

Наибольшая сейсмическая опасность $I=7$ баллов по карте ОСР-А приходится на прибрежную зону южной части Одесской обл. и шельфовую зону вблизи юго-западного побережья Крыма, центральный и северный районы относятся к 6-балльной территории. Для периода повторяемости $T=1000$ лет (карта ОСР-В) вся шельфовая зона, где ведется интенсивное освоение недр по добыче и транспортировке УВ сырья, относится к сейсмически опасной с прогнозной интенсивностью $I=7$ баллов. В

соответствии с нормативным документом ДБН В.1.1-12:2006 [Будівництво ..., 2006], карта ОСР-В с вероятностью $P=0,95$ непревышения расчетной интенсивности в течение ближайших 50 лет предназначена для проектирования и строительства сооружений повышенного уровня ответственности, повреждение или разрушение которых может привести к чрезвычайной ситуации регионального уровня. Протяженные нефтепроводы и газопроводы относятся именно к таким ответственным сооружениям.

Землетрясение 7 мая 2008 г. произошло позже построенной предварительной карты [Пустовитенко и др., 2007а, 2008]. Его расчетная интенсивность $I=6$ баллов в эпицентральной зоне не превысила прогнозных значений, а эпицентр располагался на изолинии смены зон интенсивности от 7 до 6 баллов по карте ОСР-А. Это свидетельствует о соответствии реальной и расчетной максимальной сейсмичности, подтверждающей корректность построения карт ОСР для западной части Черного моря.

Согласно нормативным документом [Будівництво ..., 2006], экологически опасные объекты относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности, повреждение и разрушение которых от сейсмических воздействий может привести к чрезвычайной ситуации регионального или государственного уровня. При проектировании таких объектов необходимо в качестве фоновых интенсивностей применять карту ОСР для периода $T=1000$ лет, что соот-

ветствует интенсивности на большей части северо-запада шельфа Черного моря 7 баллам.

Заключение. Проблема оценки сейсмической опасности северо-западной части Черного моря возникла в связи с практическим освоением недр шельфа и усилением в последнее время сейсмической активности в этом районе. Все возрастающая интенсивность освоения недр шельфа может провоцировать наведенную сейсмичность. В настоящее время строительство объектов на территории шельфа Черного моря проводится без учета сейсмической опасности района.

Анализ результатов исследований по оценке сейсмической опасности шельфов Каспийского, Черного и Охотского морей [Кузин, 1990; Катренко и др., 1990; Ковачев и др., 2002, 2003; Кузин и др., 2009] позволил сделать заключение о возможности применения существующей современной методологии сейсмического районирования и для морских районов.

Исходя из этого, построена модель сейсмической опасности и разработана карта общего сейсмического районирования (ОСР) северо-западной части шельфа Черного моря масштаба 1 : 1 000 000 для периодов повторяемости 1 раз в 500 и 1000 лет. Для периода 500 лет выделена 6-балльная полоса, расположенная между 7-балльными участками. Семибалльная зона на карте ОСР-В (период 1000 лет) практически полностью охватывает всю северо-западную часть Черного моря. Таким образом, установлено, что северо-западный участок шельфа относится к сейсмически опасным районам с возможными проявлениями сильных и разрушительных сотрясений с фоновыми сейсмическими воздействиями интенсивностью до 7 баллов.

Разработанные карты ОСР для шельфа северо-запада Черного моря рекомендуется применять при планировании строительства на шельфе экологически опасных объектов: про-

тяженных нефте- и газопроводов и различных других промышленных морских объектов. Кроме фоновой сейсмической опасности, представляемой в картах ОСР, дополнительное усиление сейсмических воздействий могут оказывать инженерно-геологические грунтовые условия на различных участках шельфа. При этом расчетная интенсивность может быть увеличена на 1 балл и более по сравнению с прогнозными фоновыми значениями.

В связи с этим для уточнения расчетных значений сейсмических воздействий на конкретные строящиеся морские объекты требуется проведение дополнительного комплекса детальных геолого-геофизических, инструментальных сейсмологических, инженерно-геологических, гидрогеологических, геодинамических и других необходимых изысканий.

Необходимо также контролировать возможное изменение естественного хода сейсмического режима и активизации потенциально опасных локальных геологических структур под влиянием техногенных воздействий в районах добычи полезных ископаемых на шельфе. Это особенно актуально в связи с положительными прогнозами на нефтегазоносность недр шельфа западной части Черного моря [Кабанов, 2004] и перспективами дальнейшего промышленного освоения этого района.

Исследования регистрационных возможностей крымской сети сейсмических станций, территориально близко расположенных к очагам землетрясений шельфа, показали недостаточную эффективность сейсмического мониторинга этого района. Для снижения порога предсказательности землетрясений, увеличения точности локализации слабых сейсмических событий шельфа необходимо расширить азимутальный створ регистрации, организовав сейсмические станции в районе мыса Тарханкут, городов Евпатория (Западный Крым) и Скадовск (юг Херсонской обл.).

Список литературы

Алказ В. Г. Основы прогноза сейсмической опасности и сейсмического риска территории республики Молдова. — Ch: Elena — VI SRL, 2007. — 229 с.

Ананьин И. В. Сейсмичность и закономерности проявления землетрясений на Восточно-Европейской платформе и в прилегающих облас-

тях: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Москва, 1990. — 66 с.

Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН України В.1.1.12-2006. — Київ: Мінбуд України, 2006. — 83 с.

Гусев А. А., Шумилина Л. С. Моделирование свя-

- зи балл — магнитуда — расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. — 1999. — № 4-5. — С. 29—40.
- Иващенко А.И., Ким Ч.У., Федоришин М.С.* Определение сейсмической опасности на шельфе // Сейсмическое районирование шельфа. — Владивосток, 1990. — С. 5—21.
- Кабанов В., Поливцев А., Чепиль П., Филатова Т., Щербина В.* Прогноз газоперспективных объектов украинской зоны шельфа Черного моря // Проблемы геодинамики и нефтегазоносности Черноморско-Каспийского региона. — Симферополь, 2004. — С. 107—116.
- Карпатское землетрясение 4 марта 1977 года и его последствия* / Под ред. А.В. Друмя. — Москва: Наука, 1980. — 226 с.
- Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1992 год* / Сост. В.А. Свидлова // Сейсмол. бюл. Украины за 1992 год. — Симферополь: ИГФ НАН Украины, КЭС, 1995. — С. 7—8.
- Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 1998 год* / Сост. В.А. Свидлова // Сейсмол. бюл. Украины за 1998 год. — Симферополь: ИГФ НАН Украины, КЭС, 2000. — С. 13—14.
- Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2006 год* / Сост. М.В. Чуба, И.Н. Келеман, И.А. Гаранжа и др. // Сейсмол. бюл. Украины за 2006 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2008. — С. 138—143.
- Каталог и подробные данные о землетрясениях Карпатского региона за 2009 год* / Сост. М.В. Чуба, И.Н. Келеман, И.А. Гаранжа и др. // Сейсмол. бюл. Украины за 2009 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011а. — С. 142—144.
- Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2008 год* / Отв. сост. В.А. Свидлова, З.Н. Сыкчина, Н.М. Козиненко // Сейсмол. бюл. Украины за 2008 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2010. — С. 51—88.
- Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2009 год* / Отв. сост. В.А. Свидлова, З.Н. Сыкчина, Н.М. Козиненко // Сейсмол. бюл. Украины за 2009 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011б. — С. 68—71.
- Катренко В.Г., Спириш А.И., Уломов И.В., Фремд В.М., Цыганов В.М., Чилибьева Е.А., Школьников С.А.* Регистрация землетрясений донными и наземными акселерометрами на острове Шикотан (Курильские острова) // Сейсмическое районирование шельфа. — Владивосток, 1990. — С. 173—188.
- Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И.* Детальные сейсмологические наблюдения на центральном участке шельфа и континентального склона северо-восточной части Черного моря с помощью донных станций // Физика Земли. — 2003. — № 1. — С. 21—27.
- Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И.* Первый опыт сейсмического микрорайонирования морского дна с помощью донных сейсмографов // Вулканология и сейсмология. — 2002. — № 5. — С. 59—64.
- Кузин И.П.* О сейсмическом районировании шельфов (на примере Охотского моря) // Сейсмическое районирование шельфа. — Владивосток, 1990. — С. 66—98.
- Кузин И.П., Ковачев С.А., Лобковский Л.И.* Об оценке сейсмической опасности и сейсмическом микрорайонировании участков строительства морских сооружений на слабосейсмичных акваториях // Вулканология и сейсмология. — 2009. — № 2. — С. 67—80.
- Кульчицкий В.Е., Пустовитенко Б.Г.* 80 лет инструментальным сейсмическим наблюдениям в Крыму. История создания, итоги и перспективы // Геофиз. журн. — 2008. — 30, № 5. — С. 9—49.
- Никонов А.А., Никонова К.И.* О сейсмической опасности дельты р. Дуная по данным об исторических землетрясениях // Вопр. инж. сейсмологии. — 1990. — Вып. 31. — С. 127—134.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года* / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. — Москва: Наука, 1977. — 536 с.
- Перерва В.М.* Геофлюидодинамика, разрывные структуры и нефтегазоносность северо-западного шельфа Черного моря // Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона: Материалы конференции. — Симферополь, 2002. — С. 152—154.
- Писаренко В.Ф.* О законе повторяемости землетрясений // Дискретные свойства геофизической среды. — Москва: Наука, 1989. — С. 47—61.
- Пустовитенко Б.Г.* Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Киев, 2003. — 387 с.

- Пустовитенко А.А. Сейсмологические основы прогноза сейсмической опасности территории юга Украины: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2008. — 21 с.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Капитанова С.А. О затухании сейсмической энергии землетрясений зоны Вранча // Сейсмол. бюл. Украины за 2000 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2002. — С. 80—89.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Сейсмическое районирование территории северо-западной части Черного моря // Будівельні конструкції. — 2008. — Вип. 69. — С. 55—62.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Влияние вариаций сейсмологических параметров на прогнозные характеристики долговременной сейсмической опасности // Будівельні конструкції. — 2006а. — Вип. 69. — С. 281—287.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // Геофиз. журн. — 2006б. — 28, № 3. — С. 54—77.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Об оценке сейсмической опасности морских территорий (на примере северо-западного шельфа Черного моря) // Уроки и следствия сильных землетрясений (к 80-летию разрушительных землетрясений в Крыму). Матер. Междунар. конф. — Симферополь: ИГФ НАН Украины, КЭС, 2007а. — С. 147—149.
- Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А. Экспериментальные данные о процессах в очагах Черноморских землетрясений // Сейсмол. бюл. Украины за 2005 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2007б. — С. 152—163.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречнова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофиз. журн. — 1999. — 21, № 6. — С. 3—15.
- Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Калинин И.В. Очаговые параметры землетрясения 7 мая 2008 г. в районе о. Змеиный (западная часть шельфа Черного моря) // Сейсмол. бюл. Украины за 2008 г. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2010. — С. 20—27.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Вольфман Ю.М., Пустовитенко А.А., Сафронов О.Н. Сейсмическая опасность юго-западной части Украины // Будівельні конструкції. — 2004. — Вип. 60. — С. 114—119.
- Ризниченко Ю.В. От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1965. — № 11. — С. 1—12.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. — Москва: Наука, 1985. — 408 с.
- Саговский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. — Москва: Наука, 1991. — 93 с.
- Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Пасынков Г.Д. Оценка представительности землетрясений Крыма по материалам цифровых станций // Сейсмол. бюл. Украины за 2009 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011. — С. 65—67.
- Скляр А.М., Князева В.С. Проявление макросейсмического эффекта Черноморского землетрясения 7 мая 2008 г. на территории южных областей Украины // Сейсмол. бюл. Украины за 2008 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2010. — С. 16—19.
- Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вестн. ОГН РАН. — 1999. — № 1. — С. 1—32.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. — 1998. — № 4. — С. 30—34.
- Шебалин Н.В. О предельной магнитуде и предельной балльности землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1971. — № 6. — С. 12—20.
- Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. Избранные труды. — Москва: Наука, 1997. — 540 с.
- Onescu M., Marza V., Popa M., Rizescu M. The Romanian Earthquake 1999 Catalogue between 1994—1997 Vrancea area Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and a Risk Mitigation / Eds F. Wenzel, D. Lungu // Hazards Res. — Kluwer: Acad. Publ., 1999. — P. 43—47.
- Radu C., Lunge D., Demitriu S., Coman O. Recurrence, attenuation and dynamic amplification for intermediate depth Vrancea earthquakes // Proc. XXIV ESK. — Atense, 1994. — 3. — P. 1736—1745.
- Spudich P., Orcutt J. Estimation of earthquake ground motions relevant to the triggering of marine mass movement // Marine slides and other mass movement. — New York: Plenum, 1982. — P. 219—231.